

А. Л. ДУШКИН, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, старший научный сотрудник, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (Россия, 125993, г. Москва, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4)

С. Е. ЛОВЧИНСКИЙ, инженер, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (Россия, 125993, г. Москва, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4; e-mail: Lovchinskiy@inbox.ru)

Н. Н. РЯЗАНЦЕВ, старший научный сотрудник, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (Россия, 125993, г. Москва, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4; e-mail: n-r-60@mail.ru)

УДК 614.841

НОВЫЙ КЛАСС МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ВОЗГОРАНИЙ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Освещены преимущества использования тонкораспыленной воды для противопожарной защиты различных объектов, в том числе энергетических под напряжением. Показано, что для создания мелкодисперсных потоков необходимы новые виды распылителей струйного типа, которые отвечают требованиям безопасности при эксплуатации и обеспечивают высокоэффективную противопожарную защиту. Разработаны распылители, действие которых основано на эффекте кавитации в каналах и жидкостных вихрях. Экспериментальными исследованиями подтверждены заявленные дисперсные и электрические параметры созданных мелкодисперсных распылителей, а также их высокая пожаротушающая эффективность.

Ключевые слова: тонкое распыление; пожаротушение; кавитация; дисперсность; электробезопасность.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.59-68

Успешное тушение пожара тонкораспыленной водой (ТРВ) обуславливается разработкой новых типов распылителей, их размещением, скоростью потоков окружающего газа и типом горючего вещества.

Экспериментальные работы с тонкораспыленной жидкостью показывают, что такой агент, как ТРВ, может иметь широкое распространение в области пожаротушения и подавления очагов легковоспламеняющихся жидкостей и тлеющих пожаров. Хорошие результаты были получены при тушении больших пожаров на энергетических объектах при помощи тонкораспыленной воды, называемой за рубежом “водяным туманом”.

В настоящее время установлено [1–3], что наибольшей эффективностью при тушении пожаров класса А (твердых горючих материалов) обладает тонкораспыленная вода с размером капель до 150 мкм. Для получения капель наиболее оптимального размера необходимо использовать распыляющее устройство специальной конструкции с оптимальным давлением перед ним. Применение воды высокой степени дисперсности позволяет значительно интенсифицировать процесс охлаждения поверхности энергетического оборудования с высокой температурой.

Помимо этого, мелкие капли воды, диаметр которых совместим с диаметром пор трещин, имеющихся на поверхности горящего материала, проникают внутрь его, где происходит их испарение и, как следствие, ликвидация гетерогенного горения.

Тонкораспыленная вода может использоваться при защите кабельных тоннелей и электрооборудования под напряжением [4, 5] при малой объемной концентрации капель в потоке ($< 0,05$), что обуславливает слабое изменение активной электрической проводимости воздушно-капельной среды относительно воздушной. Этот эффект был изучен экспериментально.

Смачивания и охлаждения твердого горючего легче достичь при использовании распыленной воды с размером капель более 400 мкм, однако для этого требуется большее количество воды. Основное преимущество водяного тумана с размером капель менее 150 мкм состоит в более высокой скорости поглощения тепла от горючих газов и пламени. Как показали расчеты по зависимостям, приведенным в [6], время преобразования капель воды в пар при движении в горючем газе с температурой 700 °С составляет при диаметре 40–80 мкм 0,02–0,06 с,

а при диаметре 180–200 мкм — 0,20–0,26 с, т. е. в несколько раз больше. При этом увеличивается расстояние, которое проходят капли в зоне пламени, например от 0,15 до 1 м при их начальной скорости 20 м/с. По этой причине крупные капли (более 200 мкм) проходят зону пламени, почти не испаряясь, особенно на начальной очаговой стадии развития пожара, когда зона горячих газов не превышает 0,1–0,2 м. Суммарная площадь поверхности капельного объема, отнесенная к массе всех капель, увеличивается обратно пропорционально радиусу капель ($1/r$), поэтому, кроме повышения скорости испарения, увеличивается суммарная площадь испарения мелких капель и общий уровень потерь тепла при пожаре. Известно, что тепловыделение при развитии пожара, например, класса А составляет 70–90 кВт/м². Тогда при коэффициенте использования воды, равном 1 (поглощение ~2,5 МДж/кг при парообразовании), необходима интенсивность ее подачи 0,030–0,039 кг/(м²·с) для полного поглощения выделяющегося тепла и снижения температуры примерно до 100 °С. По другим данным для локализации пожара необходимо поглощение 20 % удельной теплоты пожара [7]. Например, при горении древесины в стандартных условиях тепловыделение равно 0,26 МВт/м², тогда поглощение составляет 0,052 МВт/м², необходимая минимальная интенсивность орошения — 0,023 кг/(м²·с). Имеется еще достаточно большое количество данных по тепловыделению от очагов возгораний различных классов.

Однако расчеты, основанные исключительно на тепловом балансе, не учитывают эффекта снижения концентрации кислорода в зоне пламени. При быстром испарении водяной пар замещает воздух в зоне горения, что пропорционально снижает скорость горения материала и интенсивность тепловыделения. Если количество присутствующего в данном объеме кислорода уменьшается с 23 до 13 %, то тепловыделение сокращается почти вдвое, поэтому возгорание может быть легче подавлено. Как уже говорилось, этот эффект достигается прежде всего тонкораспыленной водой с малым размером капель. В то же время существует ограничение по минимальному размеру капель, так как от очага горения исходит конвективный поток горячих газов (со скоростью порядка 7,7 м/с при развитом пожаре [8]), который уносит мелкие капельки не только от горячей поверхности, но и от диффузионного пламени. Теоретические расчеты показали, что названный эффект уноса капель от зоны горения наиболее ярко проявляется для капель размером менее 20 мкм [8]. Механизм тушения вытеснением кислорода из зоны горения становится доминирующим при увеличении времени тушения, так как для его проявле-

ния необходима определенная концентрация паров во всем помещении.

Одним из условий подавления огня является затухание теплового излучения. Эксперименты показали, что тепловой поток в области длин волн 1–6 мкм от стандартных очагов возгорания снижается более чем в 4 раза на расстоянии от них 1,7 м при наличии в помещении водяного тумана [9]. Высокие поверхностные температуры, которые наблюдаются при пожарах классов А и Б, обычно значительно повышают потери тепла от горящих материалов. Поэтому для толстых бревен и других массивных предметов процесс горения возможен лишь при наличии внешнего теплового потока от других раскаленных поверхностей, пламени с частичками сажи и горячих газов над потолком. Тепловое излучение можно уменьшить путем его экранирования и поглощения мелкими частицами воды при их большой концентрации и радиусах, сравнимых с длиной волны теплового излучения.

Условия тушения пожара тонкораспыленной водой диктуют необходимость в каждом конкретном случае уточнять интенсивность ее подачи. Наиболее сложным при этом является вопрос об оптимальной дисперсности капель жидкости для эффективного тушения пламени.

Для прекращения процесса горения необходимо понизить температуру поверхности жидкости или твердого вещества ниже температуры воспламенения. При пожаре температура поверхности поддерживается на высоком уровне за счет теплообмена с газом, который нагревается при экзотермической реакции окислителя в газовой фазе (горения). Таким образом, принципиально существует два пути ликвидации очага пламени: охлаждение пристенных газов за счет блокирования выделения тепла реакции окислителя либо охлаждение поверхности горючего материала. Энтальпия газовой фазы в сумме с теплотой горения всегда значительно выше энтальпии материала. Сток тепла за счет фазового превращения воды в пар ограничен теплом фазового перехода, умноженным на расходную концентрацию капель. При подаче водяных капель снижение энтальпии, а следовательно, и температуры поверхности материала всегда более существенно, чем газа в зоне реакции. В большинстве случаев названные механизмы при тушении проявляются одновременно, а время тушения зависит от продолжительности пребывания и концентрации капель воды в зоне горения и от количества воды, достигающей поверхности горения. Мощный конвективный поток устремляющихся вверх горячих газов уносит с собой не только охлажденные водой продукты горения, но и сами капли. Способность капель противостоять этому зависит от их размера. Очевидно, очень мелкие кап-

ли (~1 мкм) полностью следуют за потоками газа и не попадают ни на поверхность, ни в зону горения. Большие капли (если они будут каким-либо способом доставлены к поверхности горения) проходят зону горения и достигают ее поверхности, но при том же расходе их концентрация будет значительно меньше и, следовательно, их охлаждающее действие будет только локальным. Другими словами, в одних местах капель будет много, а в других — их вообще не будет. По этим “пустотам” вновь будет распространяться процесс горения. К тому же при больших каплях отношение их объема к площади поверхности всегда будет больше, чем для мелких капель, а процесс испарения и, следовательно, сток тепла будет происходить с поверхности. Тогда при том же расходе воды наибольшая интенсивность этого стока может оказаться вне зоны максимального тепловыделения и поверхности горения.

Движение капель в вихревом поле, образующемся около пламени, имеет чрезвычайно сложный характер и зависит от структуры вихрей. Под действием градиента скорости газовой среды капли начинают вращаться, что приводит к появлению дополнительной составляющей скорости частицы (эффект Магнуса). В зависимости от структуры газового вихря частицы будут мигрировать к пламени или от него. В большинстве случаев частицы двигаются в сторону меньших градиентов скорости среды, т. е. для нашего случая от пламени. По этой причине необходимо создание направленного высокоскоростного дальнобойного потока капель, особенно мелких — размером менее 100 мкм. Это важно для обеспечения для пожарных возможности тушить пламя с большого расстояния.

В мировой практике понятие “тонкое распыление воды” при использовании ее в качестве огнетушащего вещества характеризуется условием создания на расстоянии 1 м от распылителя облака водяных капель, 99 % объема которых имеет диаметр менее 1 мм.

В настоящее время у нас в стране принято понятие тонкораспыленной воды как капельного потока со средним арифметическим диаметром капель $D_{10} \leq 150$ мкм. Во многих отношениях установку для пожаротушения, использующую тонкораспыленную воду, можно считать гибридом известных систем, осуществляющих как объемное, так и поверхностное тушение. Задачами противопожарной защиты, решаемыми при использовании систем с тонким распылением воды, являются:

- а) тушение пожаров;
- б) подавление возгорания;
- в) регулирование пожаров, т. е. ограничение распространения горения.

Тушение пожара — это полная ликвидация любого вида горения различных веществ и материалов. Подавление пожара — резкое снижение температуры в зоне пожара и предотвращение повторного распространения огня путем предварительного увлажнения расположенных рядом с очагом горения легковоспламеняющихся веществ и контроль температуры газов с помощью датчиков в целях предотвращения повреждения конструкции.

Кроме того, система тонкого распыления воды как составная часть комбинированной системы пожаротушения, которая включает еще, например, газовую (хладоновую) систему пожаротушения, решает задачи регулирования температуры в помещении и защищает его от теплового (инфракрасного) излучения.

При проектировании распылителей (форсунок) необходимо достаточно ясно представлять механизм дробления жидкости. В настоящее время широкое распространение получает представление о процессе дробления как о явлении развития неустойчивости течения жидкости со свободными границами в виде струй или плен. При этом разделяют это явление на неустойчивость, связанную с воздействием твердой стенки газа или жидкости на поверхность жидкого образования перпендикулярно вектору его скорости или ускорения, и неустойчивость, обусловленную касательными напряжениями, возникающими за счет разности скоростей в жидкости и обтекающем ее газе. Первый тип механизма дробления характерен для диспергаторов ударного типа и механических форсунок с большой начальной скоростью истечения жидкости (100 м/с) в неподвижный газ, второй тип превалирует в газожидкостных орошителях и в струйных форсунках при малых начальных скоростях истечения жидкости. В реальных диспергаторах оба механизма действуют одновременно. Развитие процесса неустойчивости течения приводит к деформации и разрушению струй, пленок и капель жидкости. В силу сложности этого явления сам процесс разрушения в настоящее время не имеет полного математического описания. Очевидно, при дроблении реализуется баланс сил поверхностного натяжения, вязкости и инерции. При различных начальных скоростях жидкости относительно газа и физических параметрах жидкости и газа (плотность, вязкость, поверхностное натяжение) характер дробления существенно меняется. В общем случае силы давления, возникающие в движущейся жидкости при воздействии на ее поверхность другой жидкости, газа или твердой стенки, стремятся увеличить объем тела, а силы поверхностного натяжения — уменьшить площадь поверхности.

Механизм дробления струи, покинувшей насадок, зависит главным образом от формы вытека-

ющей струи и соотношения скоростей струи и окружающего газа, которые, в свою очередь, определяются способом распыления, классом и конструкцией выходного устройства. Наиболее вероятная картина разрушения струй связана с упругими колебаниями ее поверхности. Колебания имеют затухающий характер, а распад струи может произойти в месте возникновения колебаний. Черда сужений и расширений по длине струи обуславливается не упругими колебаниями, а лапласовыми силами, имеющими постоянное направление. Жидкость из места сужения будет перетекать в места расширения, и этот переток необратим, поскольку лапласовы силы действуют в том же направлении. Начавшееся в данном сечении сужение будет только сужаться, а расширение — только расширяться. Так образуется последовательная цепь сужений и расширений по длине струи. На длину нераспавшегося участка струи влияет перепад давления на насадке. В [10] установлены два максимума давления, определяющие длину нераспавшегося участка.

Истекающие из соплового насадка капли взаимодействуют с окружающим воздухом, который может существенно деформировать их или же полностью разрушить. На это взаимодействие накладывается нестационарность режима движения капель: они могут либо тормозиться, либо ускоряться потоком газа. Так как первоначальный распыл полидисперсен, на некотором расстоянии от насадка скорость капель различных размеров может существенно различаться, что служит причиной их взаимных столкновений. Последнему может способствовать также пересечение траекторий движения частиц, обусловленное соударением струй в насадках с пересечением струй и в кольцевых насадках.

Различная организация процесса движения и взаимодействия жидкостных струй [11] позволяет создавать диспергаторы различных типов и схем. Центробежные и эвольвентные распылители используют для создания направленного потока капель взаимодействие пелен жидкости, которые обладают большой тангенциальной скоростью распространения в пространстве распыления, поэтому использование их для нужд пожаротушения нецелесообразно. В струйных распылителях при достаточно больших скоростях истечения жидкости из насадков различных форм дробление на капли осуществляется за счет кинетической энергии жидкости при преобразовании потенциального перепада давления.

Основными гидравлическими характеристиками любого типа распылителей (форсунок) являются: коэффициент расхода μ , дисперсность распыления, которая характеризуется усредненными диаметрами совокупности капель D_{10} , D_{32} и др., а также углом распыления и равномерностью распределе-

ния жидкости на орошаемой поверхности или в объеме факела. В общем случае поток капель является полидисперсным. Для его описания пользуются средними радиусами (диаметрами) частиц, определяемыми с помощью счетной функции распределения $f(r)$ ($f(D)$).

В настоящее время применяется нормально-логарифмический закон распределения, предложенный А. Н. Колмогоровым:

$$f(r) = \frac{\lg e}{\sqrt{2\pi r} \lg G} \exp \left[- \left(\frac{\lg r - \lg r_0}{\sqrt{2} \lg G} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где r_0 , $\lg G$ — соответственно математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение логарифмов радиусов капель.

При расчетах течений для нужд пожаротушения полезно заменить полидисперсный поток монодисперсным с некоторым эквивалентным радиусом при сохранении истинных площади и объемов капель, чему соответствует средний размер D_{32} :

$$D_{32} = \frac{\int_0^\infty D^3 f(D) dD}{\int_0^\infty D^2 f(D) dD}, \quad (2)$$

где D — диаметр капель; $D = 2r$.

Для определения эффективности тушения необходимо знать площадь поверхности капель F , находящихся в зоне горения, которую можно определить по формуле [10]:

$$F = f_{уд} Q t, \quad (3)$$

где $f_{уд}$ — удельная площадь поверхности;

Q — объемный расход жидкости;

t — время воздействия капель на очаг горения.

Удельная площадь поверхности определяется как

$$f_{уд} = \frac{6 \sum D_i^2 n_i}{\sum D_i^3 n_i}, \quad (4)$$

где n_i — численная концентрация капель диаметром D_i .

Из выражений (2) и (4) нетрудно получить взаимосвязь удельной площади $f_{уд}$ со средним диаметром D_{32} [8]:

$$f_{уд} = 6/D_{32}. \quad (5)$$

Измерение диаметров D_{32} и D_{10} производится оптическим измерителем типа “Malvern Spraytek”, основанным на дифракции полидисперсного потока капель. Такие измерения приняты в мировой практике как наиболее информативные.

Рассмотрим принципиальные особенности разработанных мелкодисперсных распылителей, гене-

рация тонкораспыленной струи в которых осуществляется за счет кавитации.

Высокоскоростной поток капель создается при течении жидкости (воды) в канале с пережатием типа сопла Лаваля [12]. Распыляющее устройство такого типа обладает наибольшей энергетической эффективностью при генерировании высокоскоростного потока капель, так как в них практически нет передачи энергии жидкости материалу стенок диспергатора или газу-пропилену, которая осуществляется в известных механических или газожидкостных форсунках. При кавитации в воде происходит высвобождение растворенного воздуха при давлении $p \leq 10$ кПа, а затем водяного пара — при $p \leq 3$ кПа непосредственно в самой жидкости. Парогазовые включения преобразуют поток в сжимаемый с микроволновыми процессами, возникающими при схлопывании пузырьков при попадании струи в атмосферу. Эти эффекты способствуют интенсивному дроблению такой струи.

Было обнаружено, что в конфузorno-диффузornом сопле образуется струйный газожидкостный поток, который интенсивно распыляется при попадании в воздушное пространство. Наиболее полно данный эффект реализуется, если угол сужения во входном конфузоре меньше угла расширения в выходном диффузоре. Такое сопло распылителя создает поток капель со среднеобъемным диаметром капель $D_{32} = 160 \dots 200$ мкм ($D_{10} = 90 \dots 120$ мкм) при давлении подачи 0,8 МПа. Скорость распыленной струи на расстоянии 3,5 м от среза насадка составляет 35 м/с. Таким образом, до сих пор нежелательное явление кавитации в гидравлических устройствах нашло новое высокоэффективное применение в мелкодисперсных распылителях.

Диспергаторы, использующие дробление соударяющихся струй, достаточно широко применяются в различных областях техники, в том числе в США при создании ракетных двигателей. Однако до сих пор использовалось соударение двух струй под углом, не превышающим 90° . Распылитель жидкости выполнен в виде корпуса с двумя соосными каналами одинакового поперечного сечения, предназначенными для встречной подачи жидкости и сопла, входное отверстие которого образовано пересечением внутренних поверхностей каналов с образующей сопла поверхностью [13]. Сопло имеет форму конического диффузора и ориентировано поперек каналов, а площадь входного отверстия диффузора не превышает суммарную площадь поперечного сечения каналов. При фронтальном “лобовом” столкновении двух струй в ограниченном объеме образуется кавитационный вихрь.

Полученный капельный поток имеет дисперсность $D_{32} = 100 \dots 130$ мкм ($D_{10} = 67 \dots 80$ мкм) при

давлении 1,2...2,5 МПа. Замеренные пьезоэлектрическим датчиком непосредственно перед распылителем частоты колебаний в подводящем канале составляют $f = 4 \dots 12$ кГц.

Дальнейшее развитие эффекта соударения струй реализовано в распылителе, выходное отверстие которого образовано пересечением поверхностей конуса и цилиндра [14]. Тонкое распыление воды с размером капель $D_{10} = 30 \dots 150$ мкм при давлении подачи ~ 1 МПа обеспечивается сложной геометрической формой сечения выходного отверстия сопла, образованного за счет частичного пересечения конической проточки внешней поверхности корпуса с двойными соосными цилиндрическими каналами для прохода и соударения жидкости. Формирование вихревого потока происходит дополнительно на кромках корпуса выходных каналов сложной геометрии. Форсунки распределены по наружной поверхности корпуса, по крайней мере, двумя горизонтальными рядами и выполнены в виде двойных соосных каналов в корпусе с одним выходным соплом.

Использование вихревой кавитации демонстрируется в распылителе более технологичной конструкции [15]. Распылитель жидкости содержит корпус с двумя перегородками, разделяющими внутреннюю полость вдоль направления течения жидкости на напорную и выходную камеры. В первой перегородке выполнены два отверстия равного диаметра, расположенные симметрично относительно оси симметрии напорной камеры. Во второй перегородке, служащей торцевой стенкой (кольцом) корпуса распылителя, имеется выходное отверстие распылителя, расположенное соосно с выходной камерой. Выходное отверстие распылителя выполнено такого размера, чтобы проекция кромки выходного отверстия распылителя на плоскость первой перегородки разделяла поперечное сечение каждого из двух отверстий первой перегородки на два сегмента. Боковая поверхность выходной камеры распылителя выполнена сужающейся в направлении течения жидкости.

Генерация потока капель осуществляется за счет взаимодействия двух дугообразных потоков, образующихся на кромке выходного отверстия в виде кольца, с размером капель $D_{32} = 150 \dots 200$ мкм, $D_{10} = 80 \dots 120$ мкм. Взаимодействие этих потоков жидкости с центральным жидкостным потоком приводит к генерации тонкораспыленного потока [16].

Распылитель жидкости содержит корпус с подводящим жидкость штуцером, завихритель центробежного типа, выполненный в виде полой вставки с входным осевым каналом и тангенциально направленными входными каналами в боковой стенке вставки. Полость цилиндрической вставки сообщается с входным отверстием профилированного, сужающегося в направлении течения сопла. Причем

площадь сечения тангенциальных каналов превышает в 4...6 раз площадь осевого канала. Жидкость из тангенциальных каналов смешивается с осевым потоком в суживающемся выходном сопле, в результате чего образуется устойчивый капельный поток с углом распыла $17...23^\circ$ и средним диаметром капель $D_{10} \leq 150$ мкм, $D_{32} \leq 200$ мкм.

Реализация распылителей принципиально нового класса заключалась в создании опытных образцов распылителей, которые испытывались на эффективность применения для тушения модельных очагов пожара классов А и В, а также на возможность тушения электроустановок.

Метод определения характеристик распылителей основан на замере расхода через распылитель при ступенчатом изменении давления перед ним. Одновременно производился замер распределения капель по размерам с использованием дифракционного лазерного измерительного комплекса "Malvern Insitac System". Во время испытания проводилось ступенчатое изменение давления перед оросителем от 0 до 1,0 МПа с интервалом 0,2 МПа. На каждом уровне давления замеряли расход жидкости. Данные замеров давления подачи, расхода жидкости и средних размеров капель заносились в таблицу.

Метод снятия карты орошения и определения средней интенсивности орошения макетных образцов распылителей соответствует п. 5.14 [17].

Метод определения тока утечки по струе ОТВ на специализированном электростенде основан на замере переменного тока, проходящего по струе ОТВ при орошении мишени, находящейся под напряжением (36 ± 2) кВ, и соответствует методике, изложенной в [18].

Скорость капельного потока определялась лазерным корреляционным датчиком ЛКДС-1 с погрешностью $\pm 7\%$.

Полученные для каждого типа распылителя данные приведены в табл. 1–5.

Результаты измерений рабочих характеристик распылителей дают возможность отметить следующее. С повышением давления подачи и, следовательно,

расхода жидкости среднеарифметический размер D_{10} уменьшается из-за увеличения в потоке количества мелких капель, а среднеобъемный заутеровский размер D_{32} изменяется слабо при повышении давления с 0,4 до 1,0 МПа. Последнее обстоятельство объясняется тем, что заутеровский диаметр D_{32} малочувствителен к появлению мелких капель, объем которых пренебрежимо мал, а повышение расхода жидкости в связи с ростом давления ведет к увеличению суммарного объема всех капель. Удельная площадь поверхности капель при этом уменьшается или остается той же, что указывает на отсутствие однозначного положительного влияния повышения давления подачи жидкости на массотеплообмен распыленной

Таблица 2. Результаты экспериментального исследования распылителя с соударяющимися струями [13]

Параметр	Давление перед оросителем p , МПа				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
m , л/с	0,620	0,870	1,07	1,240	1,385
D_{10} , мкм	212,86	138,50	119,07	108,83	88,12
I_{yt} , мА	0,21	0,11	0,17	0,12	0,11
D_{32} , мкм	358,71	267,74	252,16	222,46	258,52
v , м/с	18,1	23,9	30,1	31,8	37,9
J , л/(м ² ·с)	–	–	–	0,109	–

Таблица 3. Результаты экспериментального исследования распылителя с выходным отверстием сложной формы [14]

Параметр	Давление перед оросителем p , МПа				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
m , л/с	0,190	0,260	0,325	0,375	0,420
D_{10} , мкм	244,06	143,66	131,02	109,85	72,10
I_{yt} , мА	0,13	0,17	0,16	0,17	0,15
D_{32} , мкм	314,25	288,03	257,31	225,12	254,92
v , м/с	18,4	26,0	31,8	37,0	41,1
J , л/(м ² ·с)	–	–	–	0,041	–

Таблица 1. Результаты экспериментального исследования кавитационного сопла [12]

Параметр	Давление перед оросителем p , МПа				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
m , л/с	0,250	0,350	0,430	0,5	0,560
D_{10} , мкм	190,75	144,87	102,14	83,45	62,28
I_{yt} , мА	0,23	0,22	0,23	0,18	0,17
D_{32} , мкм	327	290,39	227,54	194,52	261,53
v , м/с	17,2	24,4	30,0	34,0	38,7
J , л/(м ² ·с)	–	–	–	0,059	–

Таблица 4. Результаты экспериментального исследования распылителя с соударением струй в сопловом кольце [15]

Параметр	Давление перед оросителем p , МПа				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
m , л/с	0,330	0,460	0,57	0,65	0,730
D_{10} , мкм	204,09	161,61	124,75	103,18	99,80
I_{yt} , мА	0,16	0,12	0,26	0,23	0,18
D_{32} , мкм	339,21	304,31	252,23	225,67	203,6
v , м/с	17,4	23,7	30,6	32,5	38,4
J , л/(м ² ·с)	–	–	–	0,073	–

Таблица 5. Результаты экспериментального исследования струйно-вихревого распылителя [16]

Параметр	Давление перед оросителем p , МПа				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
m , л/с	0,470	0,670	0,82	0,950	1,06
D_{10} , мкм	220,56	129,80	101,73	86,07	67,14
$I_{\text{ут}}$, мА	0,11	0,09	0,12	0,10	0,10
D_{32} , мкм	356,88	274,16	229,68	195,55	236,89
v , м/с	8,4	16,2	24,4	32,1	40,8
J , л/(м ² ·с)	—	—	—	0,11	—

жидкости с продуктами горения и эффективность тушения при давлении $p > 1,0$ МПа.

В то же время весь спектр размеров сдвигается в сторону мелких капель. В некоторых распылителях обнаруживается существенная неравномерность интенсивности орошения защищаемой площади. В этом отношении лучшие показатели наблюдаются у струйно-вихревых распылителей, а также у распылителей с соударяющимися струями. Это обстоятельство особенно важно учитывать для автоматических систем пожаротушения, для которых наличие участков защищаемой поверхности с недостаточной интенсивностью орошения может привести ко вторичному возгоранию.

Дополнительно проведены испытания по определению влияния пленкообразующего пенообразователя типа AFFF на характеристики распылителей. Гидравлические характеристики определялись при добавлении в воду 3...6 % пенообразователя. При этом размер капель D_{10} увеличился только на 10...12 %, что говорит об отсутствии ожидаемой сильной коагуляции. Это можно объяснить следующим обстоятельством. Стабилизация распыленного потока обеспечивается тем, что при обтекании капель происходит утончение разделяющих их прослоек поверхностно-активного вещества (ПАВ) и, как следствие, нарушение адсорбционного равновесия. Восстановление этого равновесия приводит к гидродинамическому сопротивлению такому вытеснению и к предотвращению слипания капель.

Необходимо также обратить внимание практически на неизменность тока утечки (± 3 %). На электростенде, кроме того, были проведены исследования по установлению предельных электробезопасных интенсивностей орошения мишени при характерных скоростях потока, для чего распылитель приближали к мишени. Вследствие этого орошаемая площадь уменьшалась, а интенсивность орошения увеличивалась [19].

Величина тока утечки по струе не превышала порогового нормативного значения 0,5 мА при ин-

тенсивности орошения мишени 0,4...0,6 л/(м²·с) и при скоростях капельного потока перед мишенью 21...35 м/с.

Для определения эффективности пожаротушения тонкораспыленной водой, генерируемой распылителями нового класса, на модельных очагах класса А (твердые горючие вещества) и класса В (горючие жидкости) были проведены испытания в огневом боксе, оборудованном контрольно-измерительными приборами для регистрации давления, расхода, времени свободного горения и тушения, а также тепловизором (типа FLIR System Termokam S60) для определения температуры модельных очагов возгорания.

Для очагов класса А использовались бруски из дерева хвойных пород, а для очага класса В — бензин АИ-92. Размер очага А соответствовал стандартному очагу 0,3А, который представлял собой штабель из брусков 0,03×0,03×0,5 м с количеством их в слое 4, количеством слоев 8, площадью свободной поверхности 1,27 м². Очаг класса В представлял собой круглый противень из листовой стали диаметром 200 мм и высотой 100 мм, в который заливали 0,3 дм³ воды и 0,7 дм³ бензина. Распылители были установлены на высоте 2,5 м от модельных очагов. Время свободного горения жидкости составило 60 с, твердого горючего материала — 6 мин. Для зажигания очага класса А применяли бензин в количестве 0,3 дм³, который заливали в поддон размером 200×200×100 мм.

Очаг типа 0,3А считался потушенным, если в штабеле отсутствовали светящиеся угли, а температура не превышала ~100 °С (что определялось тепловизором). После окончания тушения осуществлялось наблюдение за штабелем в течение 10 мин. Опыт считался положительным, если в течение этого периода отсутствовало открытое пламя. Отсчет

Таблица 6. Результаты тушения модельных очагов классов А и В

Тип распылителя по источнику	Тип очага	Время тушения, с, в трех опытах			J , л/(м ² ·с)
[12]	0,3А	38	37	39	0,059
[12]	1В	15	14	16	0,059
[13]	0,3А	32	30	28	0,109
[13]	1В	13	10	14	0,109
[14]	0,3А	39	33	34	0,0132
[14]	1В*	11	10	12	0,0132
[15]	0,3А	41	37	32	0,073
[15]	1В	17	20	18	0,073
[16]	0,3А	23	18	30	0,110
[16]	1В	15	17	13	0,110

* Тушение очага проводилось 3 %-ным водным раствором пенообразователя AFFF.

времени свободного горения очага 0,3А начинался с момента, когда открытым пламенем было охвачено не менее половины наружной поверхности материала и ее температура превышала 400 °С. После выгорания бензина поддон убирала из-под очага. На каждом распылителе проводилось не менее трех опытов при давлении подачи воды 1,0 МПа. Результаты испытаний представлены в табл. 6.

Из экспериментальных данных видно, что новый класс мелкодисперсных распылителей демонстрирует высокую эффективность подавления очагов пламени горючих твердых и жидких материалов. Для сравнения были проведены испытания стандартного оросителя ДУСО-РНО0,77-Р1/2-В1,5-ОПДР-15-УСА с интенсивностью орошения $J = 0,18 \dots 0,2 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

При этом очаг 0,3А не был потушен, а очаг В был потушен за 21 с только при использовании воды с 6 % пенообразователя типа АFFF. При испытании дренчера "Marioff" 4S000МС с интенсивностью орошения $0,06 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ очаг 0,3А был потушен за 86 с, очаг 1В при использовании чистой воды в неизолированном помещении — за 40 с. Следует отметить, что в соответствии с требованиями производителя давление подачи составляло 10 МПа, что в 10 раз больше, чем требуется для распылителей нового класса. Таким образом, потребная удельная энергия $E = JP$ для нового класса распылителей в 10 раз меньше по сравнению с известными классами распылителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A. Fire suppression tests using a handheld water mist extinguisher designed for the International space station // 42nd International Conference on Environmental Systems. USA, California : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012. — P. 115–118. DOI: 10.2514/6.2012-3513.
2. Branelle Rodriguez, Gina Young. Development of the International space station fine water mist portable fire extinguisher // 43rd International Conference on Environmental Systems. — CO, Vail : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013. DOI: 10.2514/6.2013-3413.
3. Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J. T. On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires // Suppression and Detection Research and Applications Conference. — USA, Orlando, 2007. — P. 217–223.
4. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник : в 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. II. — 774 с.
5. Сегаль М. Д. Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2011. — № 4. — С. 61–64.
6. Ольшанский В. П., Ольшанский С. В. К расчету предельной дальности подачи испаряющихся тонкораспыленных огнетушащих веществ установками импульсного пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. — 2005. — Т. 14, № 4. — С. 67–70.
7. Иванов Е. Н. Расчет и проектирование систем противопожарной защиты. — М. : Химия, 1990. — 384 с.
8. Душкин А. Л., Ловчинский С. Е. Взаимодействие пламени горючей жидкости с тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 11. — С. 53–55.
9. McCarthy M. J., Molloy N. A. Review of stability of liquid jets and the influence of nozzle design // The Chemical Engineering Journal. — 1974. — Vol. 7, No. 1. — P. 1–20. DOI: 10.1016/0300-9467(74)80021-3.
10. Чохонелидзе А. Н., Галустов В. С., Холпанов Л. П., Приходько В. П. Справочник по распыливающим, оросительным и каплеулавливающим устройствам. — М. : Энергоатомиздат, 2002. — 608 с.
11. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. — М. : Наука, 1973. — 848 с.
12. Пат. 2184619 С1 Российская Федерация. МПК В05В 1/00. Распылитель жидкости (варианты) / Душкин А. Л., Карпышев А. В. — № 2001107433/12; заявл. 22.03.2001; опубл. 10.07.2002.
13. Пат. 2158151 С1 Российская Федерация. МПК А62С 13/00, А62С 31/02, В05В 1/02. Распылитель жидкости и огнетушитель, снабженный распылителем / Душкин А. Л., Карпышев А. В. — № 2000100616/12; заявл. 13.01.2000; опубл. 27.10.2000.
14. Пат. 2111033 С1 Российская Федерация. МПК А62С 31/02. Спринклерный мелкодисперсный ороситель / Долотказин В. И., Душкин А. Л., Рязанцев Н. Н., Смирнов В. Д. — № 97102072/12; заявл. 12.02.1997; опубл. 20.05.1998.
15. Пат. 2264833 С1 Российская Федерация. МПК А62С 13/62, А62С 31/02, В05В 1/34. Распылитель жидкости и огнетушитель / Долотказин В. И., Душкин А. Л., Карпышев А. В. — № 2004126285/12; заявл. 02.09.2004; опубл. 27.11.2005, Бюл. № 33.

16. Пат. 2284868 С1 Российская Федерация. МПК В05В 1/14 (2006.01). Распылитель жидкости / Душкин А. Л., Карпышев А. В. — № 2005108634/12; заявл. 28.03.2005; опубл. 10.10.2006, Бюл. № 28.
17. ГОСТ Р 51043–2002. Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытаний. — Введ. 01.07.2003. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. — 31 с.
18. ГОСТ Р 51057–2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний. — Введ. 01.07.2002. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. — 48 с.
19. Алешков М. В., Емельянов Р. А., Колбасин А. А., Федяев В. Д. Применение сплошных водных струй при тушении электроустановок под напряжением на объектах атомной энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2014. — № 4. — С. 17–23.

Материал поступил в редакцию 14 декабря 2015 г.

Для цитирования: Душкин А. Л., Ловчинский С. Е., Рязанцев Н. Н. Новый класс мелкодисперсных распылителей для подавления возгораний на энергетических объектах под напряжением // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 2. — С. 59–68. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.59-68.

English

NEW CLASS OF ATOMIZED WATER SPRAYERS FOR LIVE EQUIPMENT FIRE SUPPRESSION

DUSHKIN A. L., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Senior Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye Shosse, 4, Moscow, GSP-3, 125993, Russian Federation)

LOVCHINSKIY S. Ye., Engineer, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye Shosse, 4, Moscow, GSP-3, 125993, Russian Federation; e-mail address: Lovchinskiy@inbox.ru)

RYAZANTSEV N. N., Senior Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye Shosse, 4, Moscow, GSP-3, 125993, Russian Federation)

ABSTRACT

Atomized water sprayer advantages and fields of their application have been shown. Fine dispersion droplet flow characteristics most vital for firefighting such as averaged flow droplet diameter, spray intensity and flow rate, were determined.

A new class of atomized water sprayers that mainly employ cavitation effects in channels and liquid vortices has been illustrated.

Sprayer prototypes fully complying with atomized water flow dispersion characteristics were designed and tested ($D_{10} < 150 \mu\text{m}$ at pressure more than 0,4 MPa). AFFF-type foam agent additive to water wouldn't distort their hydraulic, electrical, and dispersion features.

Firing tests on model fire site of liquid and solid combustibles demonstrated high fire extinguishing efficiency with a new class of sprayers applied, thus achieving model fire site extinction that wouldn't be suppressed by standard conventional sprayers.

Electrical safety margins have been determined by live equipment spray intensity $J < 0,4 \dots 0,7 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ with a new sprayer class used at 0,4...1,0 MPa delivery pressure.

Keywords: water atomization; fire extinguishing; cavitation; dispersion; electrical safety.

REFERENCES

1. Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A. Fire suppression tests using a handheld water mist extinguisher designed for the International space station. *42nd International Conference on Environmental Systems*. USA, California, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2012, pp. 115–118. DOI: 10.2514/6.2012-3513.

2. Branelle Rodriguez, Gina Young. Development of the International space station fine water mist portable fire extinguisher. *43rd International Conference on Environmental Systems*. CO, Vail, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013. DOI: 10.2514/6.2013-3413.
3. Abbud-Madrid A., Watson D., McKinnon J. T. On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression and extinction of spacecraft fires. *Suppression and Detection Research and Applications Conference*. USA, Orlando, 2007, pp. 217–223.
4. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. Pozharovzryvopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik. 2-e izd. [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting. Reference book. 2nd ed.]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part II, 774 p.
5. Segal M. D. Ispolzovaniye tonkoraspynennoy vody dlya povysheniya protivopozharnoy zashchity kabelnykh sooruzheniy AES [The water mist system for cable construction of nuclear power plant fire protection]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Safety and Emergencies Problems*, 2011, no. 4, pp. 61–64.
6. Olshanskiy V. P., Olshanskiy S. V. K raschetu predelnoy dalnosti podachi ispariyayushchikhsya tonkoraspynennykh ognnetushashchikh veshchestv ustanovkami impulsnogo pozharotusheniya [To a calculation of an extreme distance of the delivery of vaporable finely-sprayed fire extinguishing substances with the impulse fire extinguishing devices]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2005, vol. 14, no. 4, pp. 67–70.
7. Ivanov Ye. N. *Raschet i proyektirovaniye sistem protivopozharnoy zashchity* [Fire protection systems calculation and design]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 384 p.
8. Dushkin A. L., Lovchinskiy S. Ye. Vzaimodeystviye plameni goryuchey zhidkosti s tonkoraspynennoy vodoy [Combustible liquid flame and water mist interaction]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 11, pp. 53–55.
9. McCarthy M. J., Molloy N. A. Review of stability of liquid jets and the influence of nozzle design. *The Chemical Engineering Journal*, 1974, vol. 7, no. 1, pp. 1–20. DOI: 10.1016/0300-9467(74)80021-3.
10. Chokhonelidze A. N., Galustov V. S., Kholpanov L. P., Prikhodko V. P. *Spravochnik po raspylivayushchim, orositelnyim i kapleulavlivayushchim ustroystvam* [Reference book on dispersing, spraying, and droplet catching devices]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2002. 608 p.
11. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 848 p.
12. Dushkin A. L., Karpyshev A. V. *Raspylitel zhidkosti (varianty)* [Liquid sprayer (options)]. Patent RU, no. 2184619, 10.07.2002.
13. Dushkin A. L., Karpyshev A. V. *Raspylitel zhidkosti i ognnetushitel, snabzhennyy raspylitelem* [Liquid sprayer and fire extinguisher fitted with sprayer]. Patent RU, no. 2158151, 27.10.2000.
14. Dolotkazhin V. I., Dushkin A. L., Ryazantsev N. N., Smirnov V. D. *Sprinklernyy melkodispersnyy orositel* [Finely dispersing sprinkler water sprayer]. Patent RU, no. 2111033, 20.05.1998.
15. Dolotkazhin V. I., Dushkin A. L., Karpyshev A. V. *Raspylitel zhidkosti i ognnetushitel* [Liquid sprayer and fire-extinguisher]. Patent RU, no. 2264833, 27.11.2005.
16. Dushkin A. L., Karpyshev A. V. *Raspylitel zhidkosti* [Liquid sprayer]. Patent RU, no. 2284868, 10.10.2006.
17. *State standard of Russian Federation 51043–2002. Automatic water and foam fire fighting systems. Sprinklers, spray nozzles and water mist nozzles. General technical requirements. Test methods*. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov Publ., 2002. 31 p. (in Russian).
18. *State standard of Russian Federation 51057–2001. Fire fighting equipment. Portable fire extinguishers. General technical requirements. Test methods*. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov Publ., 2002. 48 p. (in Russian).
19. Aleshkov M. V., Emelyanov R. A., Kolbasin A. A., Fedyaev V. D. Primeneniye sploshnykh vodnykh struy pri tushenii elektroustanovok pod napryazheniyem na ob'yektakh atomnoy energetiki [Application of water jets in extinguishing energized electric installations at nuclear power facilities]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya — Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2014, no. 4, pp. 17–23.

For citation: Dushkin A. L., Lovchinskiy S. Ye., Ryazantsev N. N. Novyy klass melkodispersnykh raspyliteley dlya podavleniya vozgoraniy na energeticheskikh ob'yektakh pod napryazheniyem [New class of atomized water sprayers for live equipment fire suppression]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 59–68. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.59-68.