

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

ПЕРВИЧНЫЕ СРЕДСТВА ПОЖАРОТУШЕНИЯ ДЛЯ АРКТИКИ

Освещены вопросы по применению первичных средств пожаротушения в Арктике. Показано, что в качестве такого средства следует использовать огнетушитель закачного типа, генерирующий поток тонкораспыленной воды с добавками антифриза и галогенсодержащего пенообразователя. С помощью аналитической модели рабочего процесса в закачном огнетушителе определены оптимальные параметры его заполнения газом и жидкостью. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили полученные оптимальные соотношения и продемонстрировали высокую пожаротушающую эффективность огнетушителя в условиях отрицательных температур. В результате экспериментов показана возможность использования тонкораспыленных потоков растворов для тушения электроустановок под напряжением.

Ключевые слова: тонкораспыленная вода; низкие температуры; антифризы; огнетушитель; пожаротушение.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.66-74

Огнетушители являются самым распространенным первичным средством тушения пожаров. В настоящее время 90 % возгораний тушатся с помощью огнетушителей. Это обусловлено тем, что они обладают полной автономностью и высокой огнетушащей способностью при ручном тушении и вместе с тем имеют относительно низкую стоимость во всех странах по сравнению с другими средствами автоматического и неавтоматического пожаротушения [1, 2]. Однако при столь широком распространении и использовании огнетушителей нет четких правил и рекомендаций по созданию этих устройств с оптимальными параметрами для условий пониженных температур (Арктические и Антарктические районы Земли). Большинство производителей ориентируются на сложившиеся в данной области традиции, которые часто не отвечают возросшим требованиям к первичным средствам подавления возгорания. Конечно, не последнюю роль в создании новых устройств играет их стоимость. При этом большая часть стоимости приходится на рабочую емкость огнетушителя, к которой предъявляются повышенные требования по прочности при высоких уровнях давления наддува. Это приводит к повышению стоимости огнетушителя и его массы из-за необходи-

мости использования высокопрочных материалов и увеличенной толщины стенок. Кроме того, повышаются требования к коррозионной стойкости в среде огнетушащих веществ (ОТВ). В настоящее время в мировой практике сложилось мнение о необходимости ограничения уровня давления наддува рабочей емкости до 2 МПа (20 бар).

Интенсификация освоения арктических районов России в последнее время путем создания новых военных и исследовательских центров и предприятий по добыче нефти и газа, в том числе со дна арктических морей, выдвигает в число первоочередных задач разработку устройств и средств противопожарной защиты этих уникальных районов. При этом необходимо учитывать специфические условия эксплуатации этих устройств, которые существенно отличаются от условий эксплуатации аналогичных устройств в средней полосе России. Характерные особенности эксплуатации средств противопожарной защиты в основном определяются географическим положением и климатическими условиями.

К таким особенностям относятся:

- специфические условия развития аварийных ситуаций в Арктике, сопровождающихся растеплением грунта, разливом нефти и т. д.;

- сложность использования ряда традиционных огнетушащих веществ и установок пожаротушения (водяных, порошковых и т. д.);
- трудности доставки пожарной техники к местам аварий из-за низких температур, ледостава, ледохода и т. п.;
- быстрый рост энергонасыщенности объектов и освоение новых технологий;
- несовершенство нормативных документов, регламентирующих правила пожарной безопасности для Арктики.

Следует отметить, что чем ниже температура воздуха на аварийных объектах, тем больше среднее время ликвидации пожара из-за сложности оперативной обстановки в условиях холодного климата, а также из-за снижения работоспособности технических средств тушения. Наибольшее количество отказов пожарной техники приходится на напорно-рукавные системы мобильных водяных систем при низких температурах.

В последнее время наиболее перспективным направлением противопожарной защиты объектов различного назначения является применение тонкораспыленной воды (ТРВ) [3–5] как средства подавления возгораний разных классов. Особенно актуально ее использование на объектах в арктических районах, где требуется высокая эффективность тушения, имеются ограничения по водоснабжению и транспортировке и необходима минимизация вторичного ущерба от проливов ОТВ. Установки ТРВ имеют более широкий спектр использования и более универсальны, чем остальные средства пожаротушения. Так, в закрытых помещениях они демонстрируют пожаротушение, аналогичное газовому, при размере капель распыленной жидкости менее 30 мкм, а в открытых — поверхностное, как и традиционное, водяное, но более эффективное по потребному количеству воды [6]. По сравнению с порошковыми и газовыми установками пожаротушения (хладоновыми, углекислотными и т. п.) установки ТРВ безопасны для людей и обеспечивают равномерное охлаждение оборудования и предметов в зоне пожара. Что касается газовых и порошковых систем пожаротушения, то они не должны применяться для тушения горючих материалов, склонных к тлению, к которым относятся органические материалы на основе целлюлозы — древесина, бумага, хлопок и т. д. (пп. 7.1 и 8.1 НПБ 88–2001 с дополнением ВНИИПО МЧС РФ от 09.04.2002 № 4.3/2.1/836).

Наибольшие трудности, возникающие при использовании ТРВ в арктических районах, сопряжены с низкими температурами окружающей среды, которые существенно ниже температуры замораживания воды (даже морской), и с отсутствием оптимальных по необходимым параметрам типов рас-

пылителей, генерирующих тонкораспыленную воду. Основные требования к распылителям ТРВ изложены в ГОСТ Р 51043–2002 (Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытаний), но положительные примеры их конкретного использования не систематизированы, отрывочны и зачастую носят рекламный характер.

Для того чтобы классифицировать воду как ТРВ, в странах таможенного союза установлен средний арифметический размер (диаметр) капель d_{10} не более 150 мкм. Такая вода является мелкодисперсной, а вода с размером капель более 150 мкм относится к крупнодисперсной.

Одним из наиболее важных параметров, определяющих эффективность систем пожаротушения ТРВ, является плотность потока капель распыленной воды на защищаемой поверхности, в объеме защищаемого помещения, вероятность достижения каплями очага пожара [7], а также размеры защищаемых площадей и объемов, образующих эпюру орошения. На все эти параметры влияет способ получения капель и конструкция распылителей. Тонкодисперсный распыл воды достигается прежде всего за счет конструкции распылителя и давления воды, подаваемой в него. Давление от 10 до 60 бар является оптимальным для образования мельчайших капель с достаточной кинетической энергией для охвата больших высот. Такие капли улучшают процесс пожаротушения, но из-за наличия конвективного тока газов от очага пожара они не достигают зоны реакции и нагретых поверхностей.

Вода способна поглотить 0,335 МДж при нагреве 1 дм³ воды от 20 до 100 °С. При переходе этого объема воды в пар (при этом образуется 1,675 м³ пара) дополнительно будет поглощено еще 2,257 МДж. Теоретически, для того чтобы вытеснить весь кислород и потушить объятую огнем комнату средних размеров, достаточно одного ведра распыленной воды. Согласно современным представлениям поток воды можно считать тонкораспыленным, если 99 % капель от всего распыленного объема воды имеют размер менее 1000 мкм.

Взаимодействие потока капель с очагом горения представляет собой тепломассообменный процесс, для которого важна площадь поверхности контакта F капель с горячими газами и поверхностями [8]: $F = fQ_{\text{ж}}\tau$ (где f — удельная площадь, м⁻¹; $Q_{\text{ж}}$ — объемный расход воды, м³/с; τ — время нахождения потока капель в зоне очага возгорания, с).

Очевидно, что чем больше эта площадь, тем эффективнее протекает процесс тушения. Определив удельную площадь как $f = 6R_i^2 n_i / (\sum R_i^3 n_i)$ и средний объемно-поверхностный диаметр по Заутеру [8]

как $d_{32} = \Sigma d_i^3 n_i / (\Sigma d_i^2 n_i)$, получим вытекающее из них соотношение: $f = 6/d_{32}$.

Как известно, высокая эффективность ТРВ [9–11] по сравнению с традиционными водяными системами обусловлена тем, что d_{32} ТРВ значительно меньше, чем у крупнодисперсной воды. Заметим, что средний диаметр по Заутеру d_{32} всегда больше среднего арифметического диаметра d_{10} : для равномерного распределения капель по размерам $d_{10} = 0,66d_{32}$, а для обычно используемого в настоящее время нормально логарифмического распределения капель по размерам (А. Н. Колмогорова) $\ln d_{10} = 3 \ln d_{32} - 2 \ln d_{43}$ (где d_{43} — средний массовый диаметр капель).

Для использования воды в качестве агента пожаротушения при отрицательных температурах Арктики в нее необходимо добавлять вещества, понижающие температуру замерзания растворов, — антифризы. В настоящее время в качестве антифризов используются органические (этиленгликоль, пропиленгликоль, глицерин, этиловый, изопропиловый, метиловый спирты) и неорганические (соли щелочных и щелочноземельных металлов) соединения. Горючесть гликолей не позволяет применять их при пожаротушении с концентрацией более 30 %. К тому же гликоли относятся к токсичным веществам, что осложняет их эксплуатацию.

В настоящее время в качестве хладагентов, антифризов и средств против обледенения летных полей аэродромов используются растворы хлоридов магния и кальция как дешевые и нетоксичные соединения [12]. Растворы солей щелочных металлов NaCl, LiCl, K₂CO₃, CH₃COONa, CH₃COOK до сего времени не получили широкого распространения из-за их высокой коррозионной активности. Самой низкой температурой замерзания (минус 67,8 °С) обладает раствор хлорида лития LiCl. Однако он образует с водой кристаллогидраты, т. е. твердые вещества, которые меняют количество связанной воды ступенчато при температурах минус 63; минус 20,5; 19,5 и 93,5 °С. Этого можно избежать добавлением небольших количеств веществ, препятствующих росту кристаллов.

Работоспособными в характерном для Арктики температурном диапазоне являются водные растворы хлоридов кальция и лития. Причем, как оказалось, добавление небольшого количества мочевины снижает вероятность образования нерастворимых кристаллогидратов хлоридов кальция и лития за счет блокирования кристаллообразования при температурах выше эвтектической [13, 14]. При этом добавка определенного количества фторированных ПАВ (фторПАВ) (типа AFFF) практически не повышает температуру замерзания ОТВ и в то же время не снижает эффективности пожаротушения.

Создание эффективных устройств пожаротушения требует решения ряда научных, конструкторских и экономических задач. Разработчик должен полагаться на технические знания, для того чтобы выбрать характеристики системы, которые были бы самыми подходящими для целей локализации и тушения очагов возгорания твердых, жидких и газообразных веществ. При этом желательно применять один и тот же огнетушащий состав, что связано с универсальностью использования устройства на различных очагах возгорания (классов А, В, Е).

Кроме универсальности и эффективности аппарата пожаротушения, не последнюю роль играет его стоимость. Высокая стоимость ранцевого противопожарного устройства, в десятки раз превосходящая стоимость стандартного огнетушителя, очень сильно снижает возможность его широкого применения, несмотря на все его преимущества при использовании в условиях положительных температур.

Рассмотрим более подробно основные закономерности, которые описывают процессы в закачных аппаратах, подобных традиционному огнетушителю.

Уравнение энергии для закачного аппарата вытекает из первого закона термодинамики и имеет вид:

$$\frac{P_0}{m_{\text{ж}}} \frac{V_0}{V_{\text{ж}}^2} \frac{2F_n^2 (1 - K^{\gamma-1})}{\gamma - 1} \mu^2 = \frac{1}{\tau^2}, \quad (1)$$

где P_0 — начальное давление в емкости, Па;

$m_{\text{ж}}$ — масса (начальная) жидкости в емкости, кг;
 V_0 — начальный объем газа в “подушке” емкости, м³;

$V_{\text{ж}}$ — начальный объем жидкости в емкости, м³;

F_n — площадь проходного сечения распыляющего насадка, м²;

K — коэффициент заполнения, т. е. доля “подушки” относительно общего объема; $K = V_0/V_{\Sigma}$;

V_{Σ} — общий объем емкости для аккумуляирования, м³;

γ — показатель политропы;

μ — коэффициент расхода соплового насадка или форсунки;

τ — время выпуска жидкости из емкости, с.

Уравнение записано без потерь кинетической энергии в сопловом насадке. При учете этих потерь истинная скорость истечения $W_{\text{ист}}$ (м/с) уменьшается пропорционально потерям энергии так:

$$W_{\text{ист}}^2 = \frac{W_{\text{ж}}^2}{1 + \xi}, \quad (2)$$

где $W_{\text{ж}}$ — усредненная по массовому расходу скорость истечения жидкости, м/с;

ξ — коэффициент потерь энергии с выходной скоростью, который в общем случае связан с коэффициентом расхода сопла (форсунки) по из-

вестным формулам гидравлики и определяется путем экспериментальных исследований.

Остановимся на влиянии комплекса, включающего в себя коэффициент заполнения K и показатель политропы (адиабаты) γ . Уравнение (1) может быть преобразовано, если параметр $W_{\text{ж}}$ выразить через известные начальную массу жидкости $m_{\text{ж}}$ и время ее выпуска τ :

$$W_{\text{ж}} = \frac{m_{\text{ж}}}{F_{\text{н}} \mu \rho_{\text{ж}} \tau}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, кг/м^3 .

Тогда с учетом выражения массы жидкости через объем при постоянной плотности жидкости $\rho_{\text{ж}}$ и выражения для коэффициента заполнения из (1) и (3) получим:

$$W_{\text{ж}}^2 = \frac{2P_0}{\rho_{\text{ж}}} B, \quad (4)$$

где

$$B = \frac{K}{K-1} \left(\frac{1-K^{\gamma-1}}{\gamma-1} \right). \quad (5)$$

Примечательно, что зависимость (4) соответствует выражению для скорости по уравнению Бернулли при истечении в вакууме. Учет переменности давления, или, вернее, ограниченности запасенной энергии, осуществляется исключительно через комплекс B .

Влияние вида газа определяется в соответствии с уравнением энергии только через показатель адиабаты (или политропы) γ . Как известно, показатель адиабаты для идеального газа зависит от числа атомов в его молекуле и увеличивается от многоатомных газов ($\gamma = 1,33$) к одноатомным ($\gamma = 1,66$). Графические зависимости для комплекса B в зависимости от коэффициента заполнения и показателя адиабаты представлены на рис. 1.

Данные зависимости указывают на слабую зависимость комплекса B от показателя процесса γ , а стремление использовать одноатомный газ в закачных аппаратах не может быть оправданно. Основное влияние на энергию выходящей струи $W_{\text{ж}}^2$ оказывает коэффициент заполнения K , т. е. относительный объем газа в огнетушителе. Из рис. 1 видно, что для получения половины максимальной кинетической энергии достаточно иметь объем “подушки” в емкости, превышающий 0,4 от суммарного объема емкости (для $\gamma = 1,4$, воздух). Увеличение первоначального объема газа требует увеличения объема емкости при том же количестве огнетушащей жидкости. Увеличение объема емкости огнетушителей закачного типа приводит к росту его массы. С другой стороны, повышение кинетической энергии струи возможно путем увеличения начального давления заправки, что также повлечет за собой увеличение

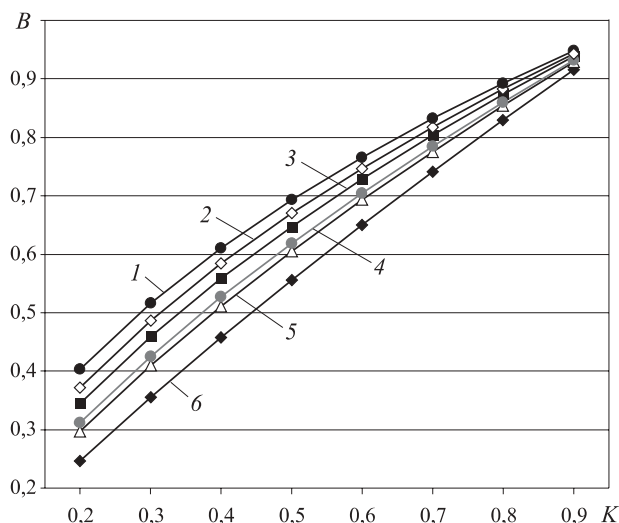


Рис. 1. Зависимость комплекса B от коэффициента заполнения K и показателя адиабаты γ : 1 — 1,0; 2 — 1,1; 3 — 1,2; 4 — 1,3; 5 — 1,4; 6 — 1,6

массы емкости с учетом обеспечения необходимого запаса прочности.

Приведенные на рис. 1 зависимости характеризуют количество потенциальной энергии, запасенной в емкости, но не позволяют определить, как она расходуется в процессе опорожнения емкости.

Используя уравнение Бернулли для расхода через сопловый насадок и адиабатическое соотношение $V = V_0(P_0/P)^{1/\gamma}$, получим выражение, описывающее изменение давления P (МПа) по времени t (с) (текущее время) при опорожнении закачного аппарата:

$$-P \frac{V_0}{\gamma P} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{1/\gamma} \frac{dP}{dt} = F_{\text{н}} \sqrt{2P\rho_{\text{ж}}}. \quad (6)$$

После интегрирования в пределах от P_0 до P и проведения соответствующих алгебраических преобразований получим зависимость давления от времени истечения:

$$\frac{P}{P_0} = \left[1 + \frac{F_{\text{н}} \mu \gamma}{V_0} \sqrt{\frac{2P_0}{\rho_{\text{ж}}}} (0,5 + 1/\gamma) t \right]^{-\frac{1}{0,5 + 1/\gamma}}. \quad (7)$$

В результате рассмотрения уравнения (6) получена гиперболическая зависимость изменения давления в емкости в процессе истечения из нее жидкости.

Расчет по формуле (7) следует вести до момента времени истечения, определяемого в соответствии с уравнением энергии в форме (1), т. е. $t = \tau$.

Из выражения (7) видно, что увеличение объема V_0 , занятого газом в первоначальный момент, приводит к более плавному изменению расхода и скорости истечения жидкости, а повышение начального давления P_0 — к более резкому падению данных параметров. Для оценки неравномерности истече-

ния были проведены расчеты по истечению 6 л воды при начальном давлении $P_0 = 2$ МПа из емкости объемом 7,4 л ($V_0 = 1,4$ л) и объемом 10 л ($V_0 = 4$ л) при том же давлении.

В первом случае изменение расхода жидкости $G_0/G_k = 2,58$, во втором — $G_0/G_k = 1,82$ (здесь G_0 — начальный расход жидкости, л/с; G_k — конечный расход при $t = \tau$). Кроме того, во втором случае общая запасенная энергия выше в 1,9 раза, чем в первом, в соответствии с уравнением баланса (4). Таким образом, увеличение объема “подушки” приводит к двойному положительному эффекту: росту запасенной энергии при том же давлении и уменьшению неравномерности расхода жидкости и скорости ее истечения из аппарата закачного типа.

Повышение начального давления увеличивает не только средний расход жидкости и запасенную энергию, но и степень изменения расхода и скорости истечения жидкости в процессе опорожнения емкости. Следует отметить, что как увеличение объема, так и повышение давления приводит к росту массы аппарата: в первом случае — за счет увеличения габаритных размеров (длины цилиндрического баллона), во втором — толщины стенки при сохранении того же запаса прочности.

Условие равенства средних кинетических энергий позволяет разработчику определить начальное давление при выбранном объеме V_0 или наоборот — определить V_0 (комплекс B) по выбранному давлению в соответствии с равенством $P_{ст} = P_0 B$ (где $P_{ст}$ — стационарное давление в аппарате с баллоном и редуктором при $B = 1$). Так, например, при $P_{ст} = 1$ МПа, $K = V_0/V_\Sigma = 0,3$, $\gamma = 1,4$ необходимо иметь $P_0 = 1/0,4095 = 2,44$ МПа.

Если задать начальное давление закачки P_0 равным 2 МПа, то аналогично можно определить необходимый относительный объем $K = 0,39$. При выбранном давлении P_0 средний расход может быть определен путем подбора площади проходного сечения сопла при давлении $P = P_0 B$. Этот расход, таким образом, оказывается усредненным по энергии, запасенной в емкости под давлением.

В условиях низких отрицательных температур особенно остро стоит вопрос о минимизации потерь энергии при работе аппаратов, в том числе индивидуальных средств пожаротушения (огнетушителей и ранцевых установок). При работе индивидуальных аппаратов энергия черпается от энергии газа, аккумулированной либо в отдельном от рабочей жидкости сосуде (как в ранцевой установке традиционного типа), либо в одном баке совместно с жидким средством пожаротушения. Отметим, что использование порошковых средств пожаротушения сопряжено со многими известными трудностями, такими, например, как слеживание порошка, что

усугубляется увеличением сил адгезии при капиллярной конденсации паров воды на поверхности твердых частиц в условиях низких отрицательных температур Арктики. В раздельной ранцевой системе газ высокого давления дросселируется в редукторе и только потом воздействует на жидкий агент подобно поршню. Не следует забывать, что из-за эффекта Джоуля–Томсона и без того низкая температура газа в неотапливаемом помещении в условиях Арктики при редуцировании давления с 20 до 1 МПа понижается еще на 50 °С. Работа раздельной системы при очень низких температурах редуцированного газа отличается низкой надежностью, что связано как с увеличением отказов механических устройств (редуктора), так и с возможностью обледенения даже в условиях использования антифризов с предельной температурой не ниже минус 65 °С. При наружной температуре минус 40 °С с учетом дросселирования $\Delta T = 50$ °С в бак с жидким агентом будет подан газ с температурой $T \approx -90$ °С, что вызовет замерзание раствора. По этой причине использование двухфазных аппаратов пожаротушения в арктических условиях должно быть ограничено.

При определении необходимых оптимальных параметров огнетушителя опираются на исходные данные, обусловленные необходимостью тушить очаги возгорания определенного ранга, местом нахождения объекта, а также объемом бака V , максимальным давлением P_0 и массой ОТВ m . Как было уже показано выше, процесс выдавливания рабочей жидкости запасенным газом зависит от отношения объема газовой полости “подушки” к объему бака $K = V_0/V_\Sigma$.

Оптимальными значениями P_0 , V_Σ и m будем считать такие, при которых средняя скорость W будет максимальной. Эта скорость при известных массе m и параметрах выходного насадка F и μ определяется временем выпуска τ . Для определения W рассмотрим комплекс $A = P_0 V_\Sigma / m$, который с физической точки зрения представляет собой удельную энергию, т. е. запасенную максимальную энергию газа на единицу массы жидкости. Отметим, что при $A = \text{const}$ можно получить совершенно разные значения входящих в комплекс величин. Так, при имеющемся объеме бака огнетушителя постоянство комплекса A обеспечивается малыми значениями как давления P_0 , так и массы m . При этом из-за малого начального давления будет невысокой и начальная скорость выпуска жидкости (по уравнению Бернулли), которая необходима для обеспечения надежного пожаротушения с безопасного расстояния. Можно поднять начальное давление P_0 и, соответственно, увеличить массу m , но это приведет к необходимости увеличения толщины стенок бака.

В соответствии с первым началом термодинамики получено выражение для квадрата скорости жидкости (3), т. е. удельной кинетической энергии. С учетом выражения для комплекса A после алгебраических преобразований его можно переписать так:

$$W^2 = 2A(K - K^\gamma)/(\gamma - 1). \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что при $A = \text{const}$ на кинетическую энергию влияет в первую очередь относительный объем бака $K = V_0/V_\Sigma$ и вид газа через показатель адиабаты (политропы) γ .

Максимальное значение средней кинетической энергии W^2 определяется нахождением экстремума функции $W^2 = f(K)$, т. е.

$$dW^2/dK = 0. \quad (9)$$

После проведения соответствующих математических операций получим уравнение для определения оптимального значения K :

$$1 = \gamma K^{\gamma-1}. \quad (10)$$

Так, для воздуха с $\gamma = 1,4$ получим $K = 0,42$, для газа с $\gamma = 1,2$ — $K = 0,4$. Таким образом, найдено оптимальное значение коэффициента заполнения (или относительного объема) газовой полости в огнетушителе. При испытаниях макета огнетушителя полученное оптимальное значение K будет подтверждено экспериментально.

Закачной огнетушитель в процессе его работы, т. е. опорожнения, характеризуется изменением внутреннего давления и, следовательно, расходом струи и скоростью ее истечения. Изменение расхода и скорости истекающей струи, как сплошной, так и раздробленной, приводит к изменению дальности ее полета. Аналитически показано, что изменение давления, расхода и скорости истечения струи в основном определяется начальным давлением P_0 и объемом, занятым газом V_0 .

Для подтверждения этих теоретически полученных взаимосвязей были проведены экспериментальные исследования. Так как скорость и расход жидкой струи в соответствии с уравнением Бернулли определяются только текущим давлением при заданных геометрических размерах проходных каналов, в процессе опорожнения огнетушителя экспериментально устанавливали изменение давления перед распылителем. Измерения давления осуществлялись с помощью индуктивных датчиков давления с индикацией через высокочастотную мостовую схему на запоминающем осциллографе Tektronix TDS 2002. Точность определения изменения давления была не хуже $\pm 3\%$. Наиболее характерные результаты экспериментов представлены на рис. 2.

В этих экспериментах оставались постоянными начальное давление (2 МПа) и количество воды

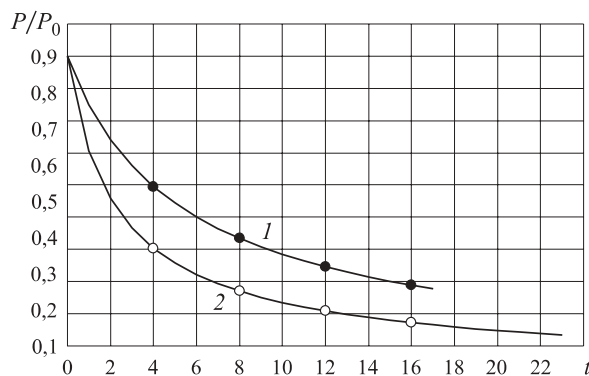


Рис. 2. Результаты экспериментов по изменению давления в процессе опорожнения огнетушителей с объемом воды $V_{ж} = 6 \text{ дм}^3$, $\gamma = 1,4$: 1 — $K = 0,4$, $V_0 = 4 \text{ дм}^3$; 2 — $K = 0,19$, $V_0 = 1,4 \text{ дм}^3$

(6 дм³). На расчетные зависимости (кривые на рис. 2) нанесены экспериментально полученные в процессе опорожнения огнетушителя значения давления (кружочки). Как видно из рис. 2, получено очень хорошее совпадение для огнетушителя с объемом воздуха 4 дм³ при общем объеме 10 дм³ ($K = 0,4$); при этом значение показателя адиабаты γ соответствовало чистому воздуху ($\gamma = 1,4$).

Из графиков видно также, что чем больше начальный объем газа, тем меньше изменение давления и скорости (расхода). Время опорожнения огнетушителя увеличивается с 17 до 23 с при уменьшении коэффициента заполнения с 0,40 до 0,19 для одного и того же количества жидкости и распыляющего устройства на выходе.

Изменение скорости истечения приводит не только к изменению дальности полета распыленной струи, но и к изменению угла ее расширения. С уменьшением давления и скорости истечения угол расширения увеличивается. Так, для испытанных огнетушителей начальный угол расширения составил 10...15°, а в процессе опорожнения баллона с жидкостью он увеличился до 20...30° при использовании струйно-центробежного распылителя [15].

Форсунка с соударяющимися струями [16] более консервативна в этом отношении, так как угол распыления в процессе работы огнетушителя меняется слабо — с 20 до 35°.

Размер капель, генерируемых огнетушителем при использовании распылителя струйно-центробежного типа, $d_{10} = 82...94 \text{ мкм}$, $d_{32} = 185...220 \text{ мкм}$, а для распылителя с соударением струй — $d_{10} = 78...90 \text{ мкм}$, $d_{32} = 165...205 \text{ мкм}$. Измерения проводились с помощью оптического измерителя Malvern Spraytec за 10 с его работы.

Проверка огнетушащей эффективности огнетушителей с раствором антифриза осуществлялась методом тушения модельных очагов горения классов А и В согласно ГОСТ Р 51057–2001. Для этого при-

Результаты тушения модельных очагов

Номер состава	Состав ОТВ, % масс.	Объем ОТВ, л	Температура раствора ОТВ, °С	Ранг очага	
				класса А	класса В
1	Вода — 94, AFFF — 6	6	+18	6А	183В
2	LiCl — 26, мочевины — 8, AFFF — 15, вода — остальное	6	–20	6А	183В
3	LiCl — 29, мочевины — 12, AFFF — 20, вода — остальное	6	+18	6А	183В
			–20	6А	183В
			–53	6А	183В

готовился раствор ОТВ в количестве 6 дм³, который подавался из огнетушителей на модельные очаги возгорания различных рангов классов А и В. Оценка эффективности тушения проводилась на основе рейтингов очагов горения классов А и В (ГОСТ Р 51057–2001), потушенных данным количеством ОТВ.

Хлориды кальция и лития обладают примерно равной эффективностью тушения при добавлении в их растворы фторПАВ (типа AFFF) и мочевины в качестве добавки, снижающей вероятность образования кристаллогидратов. Эффективность тушения модельных очагов классов А и В была такая же, как и при использовании чистой воды с тем же ПАВ (3 % фторПАВ типа AFFF) при объеме ОТВ 6 л.

Результаты тушения модельных очагов огнетушителем [15] с общим объемом 9 л представлены в таблице.

Как видно из таблицы, пожаротушающая эффективность раствора № 3 [13] одинакова при его различных температурах, в том числе характерных для условий Арктики. Раствор CaCl₂ имеет более высокую вязкость, поэтому его использование ограничено.

При растворении неорганических солей в воде электропроводность раствора резко повышается по

сравнению с дистиллированной водой. Для оценки влияния электропроводности растворов огнетушащих веществ на изменение тока утечки по струе факела тонкораспыленной жидкости, генерируемой распылителями, были проведены эксперименты для некоторых ОТВ.

Согласно ГОСТ Р 51057–2001 допустимая величина тока, действующего на человека, не должна превышать 0,5 мА. Отсюда следует, что, например, при испытательном напряжении 36 кВ в переменном поле частотой 50 Гц эквивалентное сопротивление межэлектродного промежутка R_z должно составлять не менее $R_z = 36000/0,005 = 72$ МОм.

Метод испытаний основан на измерении величины электрического тока, протекающего между срезом распылителя и заземленным проводником, который возникает в результате взаимодействия струи ОТВ с имитатором электроустановки. В качестве имитатора используют мишень, представляющую собой металлическую пластину размером $(1000 \pm 25) \times (1000 \pm 25)$ мм, которую устанавливают на опорах-изоляторах и соединяют со вторичной обмоткой трансформатора, обеспечивающего создание между пластиной и землей разности потенциалов (36 ± 4) кВ.

За величину тока утечки по струе ОТВ принимали его максимальное значение за время работы огнетушителя.

В качестве ОТВ использовалась водопроводная вода, водопроводная вода с добавками солей CaCl₂, LiCl, MgCl₂ в концентрации 8...40 % и фторПАВ (типа AFFF) в концентрации 12...16 %.

Результаты проведенных экспериментов показывают возможность использования тонкораспыленных потоков растворов для тушения электроустановок под напряжением, так как ток утечки не превышает 0,25 мА. Малая проводимость распыленных потоков ОТВ объясняется малой объемной долей ($<0,05$) раствора в воздухе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корольченко Д. А., Громовой В. Ю. Огнетушители. Устройство. Выбор. Применение. — М. : Пожнаука, 2010. — 94 с.
2. 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.
3. Abbud-Madrid A., Watson J. D., McKinnon J. T. On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression of spacecraft fires // Suppression and Detection Research and Applications Conference. — USA, Orlando : National Fire Protection Association, 2007.
4. Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A. Fire suppression test using a handheld water mist extinguisher design for the International space station // 42nd International Conference on Environmental Systems. — USA, San Diego : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. DOI: 10.2514/6.2012-3513.
5. Rodriguez B., Young G. Development of International space station fine water mist portable fire extinguisher // 43rd International Conference on Environmental Systems. — USA, Vail : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013. DOI: 10.2514/6.2013-3413.

6. Душкин А. Л., Ловчинский С. Е. Взаимодействие пламени горючей жидкости с тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 11. — С. 53–55.
7. Ольшанский В. П., Ольшанский С. В. К расчету предельной дальности подачи испаряющихся тонкораспыленных огнетушащих веществ установками импульсного пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. — 2005. — Т. 14, № 4. — С. 67–71.
8. Чохонелидзе А. Н., Галустов В. С., Холпанов Л. П., Приходько В. П. Справочник по распыливающим, оросительным и каплеулавливающим устройствам. — М. : Энергоатомиздат, 2002. — 608 с.
9. Цариченко С. Г., Былинкин В. А., Гусев А. Е. Проектирование агрегатных установок пожаротушения с применением тонкораспыленной воды // Пожаровзрывобезопасность. — 2003. — Т. 12, № 3. — С. 70–73.
10. Блинов В. И., Худяков Г. Н. Диффузионное горение жидкостей. — М. : Изд-во АН СССР, 1961. — 208 с.
11. Гориков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. — М. : Пожнаука, 2007. — 267 с.
12. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства. Химико-физические процессы при горении и тушении. — М. : Стройиздат, 1975. — 240 с.
13. Пат. 2549862 С1 Российская Федерация. МПК А62D 1/02. Огнетушащий состав / Душкин А. Л., Рязанцев Н. Н., Ловчинский С. Е. — № 2014106922/05; заявл. 25.02.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12.
14. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. — М. : Наука, 1988. — 736 с.
15. Пат. 2264833 С1 Российская Федерация. МПК А62С 13/62, 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. 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.

Материал поступил в редакцию 11 декабря 2015 г.

Для цитирования: Душкин А. Л., Ловчинский С. Е., Рязанцев Н. Н. Первичные средства пожаротушения для Арктики // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 5. — С. 66–74. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.66-74.

English

FIST-AID FIRE EQUIPMENT FOR ARCTIC REGION

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

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

RYAZANTSEV N. N., Senior Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoye Shosse, 4, GSP-3, Moscow, 125993, Russian Federation; e-mail address: n-r-60@mail.ru)

ABSTRACT

For Arctic Region of Russian Federation a stored pressure extinguisher generating a water mist flow with antifreeze and gallogen-including foam agent and fluorine SAA (surface active agent) added should be applied as the first-aid fire equipment. It is a special priority-task to use water mist at Arctic Region facilities, where high extinguishing capacity is required, there is limited water supply and transportation, FEA-spill-caused collateral damage minimization is necessary. It is advantageous to use LiCl or CaCl₂ salt solutions as antifreeze while employing the above extinguisher in Arctic Region. A certain amount of fluorine SAA (AFFF-type) practically does not increase the SAA freezing temperature without lowering extinguishing capacity. A developed analytical description of the process in a stored pressure extinguisher allows to define optimal correlation with respect to gas filled volume V_0 and total (summarized) extinguisher volume V_Σ . At present in world practice an opinion has formed of limiting service bottle pressurization level up to 2 MPa (20 bar). Arctic Region designed 6 l capacity extinguisher tests performed on A Class (solid combustibles) and B Class (flammable

fluid) model fire sites have demonstrated high efficiency under lower temperatures (-52°C) equal to present-day extinguisher efficiency at positive temperatures: A Class — 6A, B Class — 183B. The results of experiments made determine a possibility of atomized solution flow application for extinguishing energized electric sets, as current leak would not exceed 0.25 mA. Negligible conductivity of atomized FEA flows is explained by a small solution volume proportion ($< 0,05$) in the air.

Keywords: water mist; low temperatures; antifreeze; extinguisher; fire extinguishment.

REFERENCES

1. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu. *Ognetushiteli. Ustroystvo. Vyb. Primeneniye* [Fire Extinguishers. Design. Choice. Application]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2010. 94 p.
2. Karpyshev A. V., Dushkin A. L., Ryazantsev N. N., Afanasyev A. A., Matushkin V. V., Segal M. D. Razrabotka vysokoeffektivnogo universalnogo ognetushitelya na osnove generatsii struy tonkoraspylennykh ognetushashchikh veshchestv [Development of the highly effective universal fire extinguisher on basis of generation of sprayed streams of the extinguishing substances]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 2, pp. 69–73.
3. Abbud-Madrid A., Watson J. D., McKinnon J. T. On the effectiveness of carbon dioxide, nitrogen and water mist for the suppression of spacecraft fires. *Suppression and Detection Research and Applications Conference*. USA, Orlando, National Fire Protection Association, 2007.
4. Carriere T., Butz J. R., Naha S., Brewer A., Abbud-Madrid A. Fire suppression test using a handheld water mist extinguisher design for the International space station. *42nd International Conference on Environmental Systems*. USA, San Diego, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. DOI: 10.2514/6.2012-3513.
5. Rodriquez B., Young G. Development of International space station fine water mist portable fire extinguisher. *43rd International Conference on Environmental Systems*. USA, Vail, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013. DOI: 10.2514/6.2013-3413.
6. Dushkin A. L., Lovchinskiy S. Ye. Vzaimodeystviye plameni goryuchey zhidkosti s tonkoraspylennoy vodoy [Combustible liquid flame and water mist interaction]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 11, pp. 53–55.
7. Olshanskii V. P., Olshanskii S. V. K raschetu predelnoy dalnosti podachi ispariyayushchikhsya tonkoraspylennykh veshchestv v ustanovkakh impulsnogo pozharotusheniya [To a calculation of an extreme distance of the delivery of vaporably-finely-sprayed fire extinguishing substances with the impulse fire extinguishing devices]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2005, vol. 14, no. 4, pp. 67–71.
8. Chokhonelidze A. N., Galustov V. S., Kholpanov L. P., Prihodko V. P. *Spravochnik po raspylivayushchim, orositelnym i kapleulavlivayushchim ustroystvam* [Reference book on dispersing, spraying and droplet catching devices]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2002. 608 p.
9. Tsarichenko S. G., Bylinkin V. A., Gusev A. E. Proyektirovaniye agregatnykh ustanovok pozharotusheniya s primeneniym tonkoraspylennoy vody [Design of firefighting equipment for water mist fire suppression]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2003, vol. 12, no. 3, pp. 70–73.
10. Blinov V. I., Khudyakov G. N. *Diffuzionnoye goreniye zhidkostey* [Diffusive combustion of fluids]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1961. 208 p.
11. Gorshkov V. I. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Extinguishing the flame of flammable liquids]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 267 p.
12. Shrayber G., Porst P. *Ognetushashchiye sredstva. Khimiko-fizicheskiye protsessy pri goreanii i tushenii* [Fire extinguishing means. Chemical and physical processes under burning and suppression]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 240 p.
13. Dushkin A. L., Ryazantsev N. N., Lovchinskij S. E. *Ognetushashchiy sostav* [Fire-extinguishing composition]. Patent RU, no. 2549862, 27.04.2015.
14. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika. V 10 tomakh. Tom VI. Gidrodinamika* [Theoretical Physics. Vol. VI. Hydrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 736 p.
15. Dolotkazin V. I., Dushkin A. L., Karpyshev A. V. *Raspylitel zhidkosti i ognetushitel* [Liquid sprayer and fire-extinguisher]. Patent RU, no. 2264833, 27.11.2005.
16. Dushkin A. L., Karpyshev A. V. *Raspylitel zhidkosti i ognetushitel, snabzhennyy raspylitelem* [Liquid sprayer and fire-extinguisher fitted with sprayer]. Patent RU, no. 2158151, 27.10.2000.

For citation: Dushkin A. L., Lovchinskiy S. Ye., Ryazantsev N. N. Pervichnyye sredstva pozharotusheniya dlya Arktiki [First-aid fire equipment for Arctic Region]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 5, pp. 66–74. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.66-74.