

## **Использование тонкораспыленной жидкости для пожаротушения в Арктике.**

Ковалев К.Л., Душкин А.Л., Афанасьев А.А.

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН),  
Москва, Россия  
tempero@inbox.ru*

Интенсивное в настоящее время освоение арктических районов России путём создания новых базовых военных и исследовательских центров и предприятий по добыче нефти и газа, в том числе с морского дна арктических морей, ставит в число первоочередных задач разработку противопожарной защиты этих уникальных объектов. Для этих объектов характерны: интенсификация процессов добычи нефти и газа; рост энерговооружённости; убыстряющаяся смена технологий; освоение труднодоступных районов Арктики и т.п. При обеспечении пожарной безопасности названных объектов необходимо учитывать специфические условия этих объектов, которые существенно отличаются от условий эксплуатации аналогичных объектов в средней полосе России. Характерные особенности эксплуатации и противопожарной защиты в основном определяются географическим расположением и климатическими условиями.

Это проявляется как:

- специфические особенности 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.);
- трудность 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.

Можно 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 понижением работоспособности технических средств тушения. Наибольшее количество отказов пожарной техники приходится на напорно-рукавные системы традиционных водяных систем при низких температурах.

В настоящее время наиболее перспективным направлением противопожарной защиты объектов является применение тонкораспыленной воды (ТРВ) как средства пожаротушения. Особенно актуально применение тонкораспыленной воды на объектах Арктики, где требуется высокая эффективность тушения, имеются ограничения по водоснабжению и транспортировке и необходима минимизация вторичного ущерба от проливов воды. 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 для тушения количеству воды [1]. 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. Наибольшие трудности, возникающие при

использовании ТРВ в Арктике, сопряжены с низкой окружающей температурой, более низкой чем температура замерзания воды даже морской, и отсутствием до сих пор оптимальных по необходимым параметрам типов распылителей генерирующих тонкораспыленную воду. Основные требования к распылителям ТРВ изложены в ГОСТ Р53288-2009, но положительные примеры конкретного их использования не систематизированы, отрывочны и часто носят рекламный характер.

Таким образом, основная задача, которую необходимо решить при использовании технологии пожаротушения ТРВ в Арктике, заключается в нахождении незамерзающих водных растворов при сохранении высокой их огнетушащей способности и в выборе типов распылителей, генерирующих тонкораспыленные водяные растворы антифризов.

Новизна и актуальность настоящей работы заключается в создании растворов антифризов которые не только понижают температуру замерзания огнетушащего вещества, но одновременно обладают высокими огнетушащими свойствами, что определено экспериментально. Анализ типов распылителей позволил рекомендовать к дальнейшему применению на противопожарных системах защиты объектов в Арктике оптимальных распылителей, характеристики которых отвечают требованиям эффективности пожаротушения.

Для использования воды в качестве агента пожаротушения при отрицательных температурах Арктики в нее добавляют вещества, понижающие температуру замерзания раствора - антифризы.

В настоящее время используются органические и неорганические вещества этиленгликоль, пропиленгликоль, глицерин, этиловый, пропиловый, метиловый спирты, а также соли щелочных и щелочноземельных металлов. Из-за горючести гликолей их невозможно применять при пожаротушении с концентрацией более 30%, чему соответствует температура - 19<sup>0</sup>С. К тому же гликоли - токсичные вещества, что осложняет их эксплуатацию.

В настоящее время, как дешевые и нетоксичные вещества, в качестве хладоагентов, антифризов, средств против обледенения летных полей аэродромов, используются растворы хлоридов магния или кальция. Применение растворов солей щелочных металлов NaCl, LiCl, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>COONa, CH<sub>3</sub>COOK до сего времени не получило широкого распространения из-за высокой коррозионной активности. Наинизшей температурой замерзания – 67,8<sup>0</sup>С обладает раствор LiCl. Но раствор хлорида лития образует с водой кристаллогидраты, т.е. твердые вещества, которые меняют количество связанной воды ступенчато при температурах - 63<sup>0</sup>С, -20,5<sup>0</sup>С, 19,5<sup>0</sup>С, 93,5<sup>0</sup>С, однако, этого можно избежать добавление небольших количеств различных веществ, препятствующих росту кристаллов.

Современные плёнкообразующие пенообразователи типа AFFF в чистом виде имеют достаточно низкую температуру замерзания (до – 35<sup>0</sup>С), поэтому почти не влияют на температуру замерзания растворов хлоридов металлов, которые в свою очередь уменьшают пенообразующую способность пенообразователей всех видов. Для пенообразователей типа AFFF необходимо увеличение их концентрации в растворах хлоридов по сравнению с чистой водой для получения необходимой для тушения кратности пены 6...10. Для традиционных высоkokратных пенообразователей присутствие солей сводит на нет их пенообразующие свойства.

Работоспособными в характерном для Арктики температурном диапазоне являются водные растворы хлоридов кальция и лития. Причём, как оказалось, добавление небольшого количества мочевины снижает вероятность образования нерастворимых

кристаллогидратов хлоридов кальция и лития, за счёт блокирования кристаллообразования при температурах выше эвтектической.

Проверка огнетушащей эффективности растворов осуществлялась методом тушения модельных очагов горения классов А и В согласно ГОСТ Р 51057-2001. Для чего приготавливался раствор ОТВ в количестве 6 литров и направлялся на модельные очаги возгорания классов А и Б. Оценка эффективности тушения производилась на основе рейтингов очагов горения классов А и В потушенных данным количеством ОТВ (огнетушащего вещества). Для тушения использовался стандартный огнетушитель.

Хлориды кальция и лития обладают примерно равной эффективностью тушения при добавлении в их растворы пенообразователя типа AFFF и мочевины в качестве добавки снижающей вероятность образования кристаллогидратов. Эффективность тушения модельных очагов классов А и В была такая же как для чистой воды с пенообразователем:

для класса А (твёрдые горючие материалы) - 6А (27,7 м<sup>2</sup>);

для класса В (легковоспламеняющиеся жидкости) – 183В (5,75 м<sup>2</sup>).

При этом температура раствора (LiCl – 29%, мочевины – 12%, пенообразователь AFFF – 20%) поддерживалась в диапазоне -52<sup>0</sup>С.....-60<sup>0</sup>С. Раствор CaCl<sub>2</sub> имеет высокую вязкость, поэтому его использование в установках ТРВ ограничено.

При растворении неорганических солей в воде электропроводность раствора резко увеличивается по сравнению с дистиллированной водой. Для оценки влияния электропроводности растворов огнетушащих веществ на изменение тока утечки по струе факела тонкораспыленной жидкости, генерируемой распылителями, было проведено его экспериментальное определение для некоторых ОТВ.

В соответствии с требованиями действующих стандартов допустимая величина тока, действующая на человека не должна превышать 0,5 мА. Откуда следует, что, например, при испытательном напряжении 36 кВ в переменном поле частотой 50 Гц эквивалентное сопротивление межэлектродного промежутка должно составлять не менее:

$$R_{\Sigma} = 36000 / 0,0005 = 72 \text{ МОм.}$$

Метод испытания 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±25) x (1000±25) мм, которую устанавливают на опорах-изоляторах и соединяют со вторичной обмоткой трансформатора, обеспечивающего создание между пластиной и землей переменного напряжения (36±4) кВ.

За величину тока утечки по струе ОТВ принимали его максимальное значение за время работы оптимального распылителя ОТВ в течение 60 сек.

В качестве ОТВ использовалась водопроводная вода, водопроводная вода с добавками солей CaCl<sub>2</sub>, LiCl и MgCl<sub>2</sub> в концентрации от 8%-40% и пенообразователя типа AFFF. в концентрации от 12%-36%.

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

При проектировании распылителей (форсунок) различных конструктивных схем необходимо представить технологию дробления жидкости. В настоящее время находит широкое распространение 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 Релея-Тейлора, связанную с воздействием массовых сил на весь объем жидкости, и неустойчивость Кельвина-Гельмгольца за счет касательных напряжений, действующих при наличии разности скоростей в жидкости и газа в пространстве распыления [2]. Первый тип механизма дробления характерен для диспергаторов ударного типа и для механических форсунок с большой начальной скоростью истечения (100 м/с) в неподвижный газ, второй тип превалирует в газожидкостных оросителях и в механических форсунках при меньших (~40 м/с) начальных тангенциальных и осевых скоростях истечения жидкости. В реальных диспергаторах оба механизма действуют одновременно. Развитие процесса неустойчивости течения приводит к деформации и разрушению струй, пленок и капель жидкости. Из-за 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. 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. С увеличением скорости жидкости и ее плотности радиус образованной капли уменьшается, а при увеличении коэффициента поверхностного натяжения увеличивается. Вода как вещество с наибольшим коэффициентом поверхностного натяжения " $\sigma$ " требует большей скорости движения для создания туманообразного капельного облака. Представленный баланс в действительности не может быть реализован, так как в процессе образования сферической формы жидкости (капли) будет происходить деформация ее поверхности под влиянием как сил инерции и поверхностного натяжения, так и сил вязкости. Известно, что вязкостные напряжения являются первопричиной диссипации механической энергии во внутреннюю энергию. Так при истечении жидкости из насадка часть ее механической энергии расходуется при деформации на вязкостные диссипативные потери в вихрях, сопутствующих течению. Отклонение поверхности жидкости со свободными границами от равновесной сферической формы сопровождается колебаниями под действием капиллярных и возмущающих сил. Можно предположить, что отделение жидкости от первоначального объема осуществляется при воздействии импульса, под действием которого элемент жидкости деформируется и при определенных условиях отделяется от основного объема. Но деформация сопровождается внутренним движением жидкости в изменяемых границах и существенным сдвиговым напряжением за счет вязкости и, следовательно, диссипацией кинетической энергии. Большое значение при этом имеет время существования деформированного состояния жидкого элемента, которое по порядку величины, очевидно, сопоставимо с периодом собственных колебаний " $T$ ", отрывающихся от объема жидкости капель. Развитие неустойчивости границы жидкости, приводящей к разрыву сплошности, осуществляется за конечный промежуток времени, например, для неустойчивости первого типа  $t = d/W(\rho/\rho_r)^{1/2}$ , где  $d$  - характерный размер дробящегося жидкого объема, например, диаметр выходного насадка [2]. Если время развития неустойчивости меньше периода собственных колебаний деформированного объема жидкости, то дробление возможно, в противном случае деформация под действием сил поверхностного натяжения и вязкости уменьшается. Оторвавшиеся фрагменты жидкости также испытывают деформацию и могут вновь раздробиться. Если период собственных колебаний образовавшейся капли будет меньше времени развития

неустойчивости, то капля не будет вторично дробиться при ее деформациях и колебаниях. Именно эти капли определяют спектр размеров диспергированной жидкости.

Для того чтобы выявить влияние физических свойств жидкости на энергетические затраты при её дроблении, рассмотрим один из возможных механизмов дробления жидкости, которые описаны в работе [2]. Энергетический Баланс предполагает, что кинетическая энергия капли жидкости расходуется на создание новой поверхности и диссипативные потери за счёт вязкости:

$$\rho W^2/2 = 3\sigma/R + \epsilon_n$$

где  $W$  – скорость жидкой капли;  $\rho$  – её плотность;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $R$  – радиус капли;  $\epsilon_n$  – диссипативные потери.

Будем считать, что время развития неустойчивости меньше периода собственных колебаний сферического первоначального объёма  $T$ . Максимальное значение периода полного колебания начальной капли радиусом  $R_0$  определено в работе [3]:

$$T = 2\pi/W_{\min} = 2\pi(\rho R_0^2/8\sigma)^{0,5}$$

С течением времени  $t$  количество диссипируемой за счёт вязкости энергии растёт по экспоненциальному закону [3]:

$$\epsilon_n = (1 - e^{-\gamma t}) \rho W^2/2$$

Значение коэффициента  $\gamma$  определяется величинами коэффициентов кинематической вязкости жидкости  $\nu$ , поверхностного натяжения  $\sigma$ , а также частотой колебаний  $\omega$  и плотностью жидкости:

$$2 \nu \rho^{2/3} \omega^{4/3} / \sigma^{2/3}$$

Окончательно выражение для энергетического баланса имеет вид, например, при дроблении начальной капли на две одинаковые ( $R = 0.79 R_0$ ):

$$\rho W^2/2 = (6\sigma/0,79R_0) \exp 2.94\nu(\rho/\sigma R_0)^{-0,5}$$

Представленная зависимость не учитывает многих существующих эффектов, связанных с первичными деформациями и неустойчивостями в жидкости при истечении из отверстий и с воздействием воздуха в пространстве распылителя. По этой причине расчёты даже по более сложным выражениям в большинстве случаев не определяют размеры капель распыленной жидкости. Однако, полученное выражение позволяет вычислить влияние физических свойств жидкости на характерные размеры капли полученных при её дроблении под воздействием кинетической энергии жидкости.

Второй сомножитель в представленном выражении определяет долю диссипируемой энергии. Так для эвтектического раствора  $\text{LiCl}$  коэффициент вязкости  $\nu = 3,05 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  (при температуре раствора минус  $67,80^\circ\text{C}$ ), а для эвтектического раствора  $\text{CaCl}_2$   $\nu = 5,05 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  (минус  $550^\circ\text{C}$ ). Тогда при дроблении капли с начальным радиусом  $R_0 = 10^{-4} \text{ м}$  ( $100 \text{ мкм}$ ) на две радиусом  $R = 0,79 \times 10^{-4} \text{ м}$  ( $79 \text{ мкм}$ ) на создание новой капли расходуется 90% от начальной кинетической энергии начальной капли раствора  $\text{LiCl}$ , а для капли из  $\text{CaCl}_2$  84%.

В случае деления капли радиусом  $R_0 = 10^{-5} \text{ м}$  ( $10 \text{ мкм}$ ) на две  $R = 0,79 \times 10^{-6} \text{ м}$  эта доля составит для раствора  $\text{LiCl}$  – 73%, а для раствора  $\text{CaCl}_2$  – 59%. При этом считалось что коэффициент поверхностного натяжения почти не изменялся. Таким образом образованные капли из более вязкого раствора будут всегда больше при одинаковой начальной энергии подведенной на дробление.

Общие тенденции влияния физических свойств жидкости и газа [2] следующие:

- при увеличении вязкости жидкости распыл становится грубее, но более однородным;

- с возрастанием сил поверхностного натяжения жидкости увеличивается размер капель;
- в большинстве случаев влияние плотности жидкости слабое;
- увеличение вязкости газовой среды вызывает уменьшение размера капель;
- в случае увеличения плотности газовой среды в 2..3 раза размер капель уменьшается, при дальнейшем увеличении плотности в 6...20 раз диаметр капель перестаёт зависеть от плотности газа;
- с увеличением скорости истечения размер капель уменьшается – вначале быстро, затем более плавно.

Для классификации воды как в ТРВ, в странах таможенного союза требуется, чтобы средний арифметический размер капель  $d_{10}$  был не более 150 мкм. Такая распыленная вода является мелкодисперсной, а остальная вода 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  $\alpha$ , а также вероятность достижения каплями очага пожара, значения защищаемых площадей и объемов, образуя карту орошения. На всё это влияет способ получения капель и конструкция оросителей. Тонкодисперсный распыл воды достигается, прежде всего, за счет конструкции оросителя и давления воды, подаваемой в ороситель. Давление от 10 до 60 бар оптимально для образования мельчайших капель с достаточной кинетической энергией для охвата больших высот. Мельчайшие капли улучшают процесс пожаротушения, в то же время из-за наличия конвективного тока газов от очага мелкие капли отдуваются от зоны реакции и нагретых поверхностей.

Вода способна поглотить 0,335 МДж при нагреве 1 литра с 20<sup>0</sup>С до 100<sup>0</sup>С. Дополнительно будет поглощено еще 2,257 МДж при переходе этого объема воды в пар. При испарении 1 литра воды образуется 1,675 м<sup>3</sup> пара. Теоретически, для того чтобы вытеснить весь кислород и потушить объятую огнем комнату средних габаритов, 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.

Необходимо различать пожаротушение ТРВ в замкнутом пространстве со степенью негерметичности ~10% и на открытом воздухе. Скорость испарения в общем случае обратно пропорциональна радиусу капли  $R$ , поэтому мелкие капли  $d=5...50$  мкм выделяют значительно больше водяного пара в единицу времени, который оттесняет кислород от зоны горения, чем большие капли  $d=60...150$  мкм. На открытом пространстве этим явлением можно пренебречь, а пожаротушение осуществляется исключительно за счёт отвода тепла от поверхности зоны горения, количество которого в единицу времени также меньше для крупных капель. С другой стороны из-за уменьшения дальности мелких капель и резкого снижения их скорости подлёта к очагу по сравнению с крупными каплями вероятность достижения мелкими каплями поверхности горения мала. Согласно расчётам по известным зависимостям [2] при радиусе капли  $R=125$  мкм, характерном для распыления при давлении подачи ~ 1 МПа при расстоянии  $L=2,5$  м их скорость снижается с начальной  $W=40$  м/с до  $W=18,9$  м/с, а для  $R=50$  мкм до  $W=6,13$  м/с, а для капли радиусом  $R=12$  мкм, характерном для давления подачи ~10 МПа, их скорость падает с  $W_0=130$  м/с до  $W=0,048$  м/с. Естественно такие мелкие капли не могут достичь поверхности горения, а пожаротушение осуществляется объёмным способом, т.е. уменьшением температуры отходящих газов и концентрации кислорода.

Взаимодействие потока капель с очагом горения является тепломассообменным процессом, для которых важна поверхность контакта  $F$  капель с горячими газами и поверхностями, которая в общем случае выражается так [4]:

$$F = f Q_{\text{ж}} \tau$$

где  $\tau$  - время нахождения потока капель в зоне очага возгорания;  $Q_{\text{ж}}$  – объёмный расход.

Очевидно, чем эта площадь больше тем эффективнее протекает процесс тушения. В соответствии с определением удельной площади как  $f = 6R_i^2 n_i / \Sigma R_i^3 n_i$  и среднего объёмно-поверхностного диаметра по Заутеру [4]  $d_{32} = \Sigma d_i^3 n_i / \Sigma d_i^2 n_i$  вытекает соотношение:

$$f = 6/d_{32}$$

Теперь становится понятна высокая эффективность ТРВ по сравнению с традиционными водяными системами, так как  $d_{32}$  значительно меньше у ТРВ. Заметим, что средний диаметр по Заутеру  $d_{32}$  всегда больше среднего арифметического диаметра  $d_{10}$ . Для равномерного распределения капель по размерам  $d_{10} = 0,66 d_{32}$ , а для обычно используемого в настоящее время нормально-логарифмического распределения капель по размерам (Колмогорова А.Н. )  $\ln d_{10} = 3 \ln d_{32} - 2 \ln d_{43}$ , где  $d_{43}$  – средний массовый диаметр капель.

Жидкостные форсунки используют для получения распыленного потока потенциальную энергию давления, создаваемого насосными или вытеснительными системами подачи ОТВ. Проходя через распыливающее устройство, жидкостной поток, приобретает довольно высокую скорость и преобразуется в форму, способствующую быстрому и эффективному распаду (струи, пленка, крупные частицы – в зависимости от принадлежности распылителя к тому или иному классу). Гидравлическое распыливание – самое экономичное по потреблению энергии - 2...4 кВт на диспергирование 1 т жидкости. В свою очередь жидкостные распылители делятся на: струйные; центробежные; струйно-центробежные; форсунки, использующие эффект соударения струй; форсунки со сдвоенными соплами; кавитационные и другие.

Способы дробления в реальных распылителях (форсунках) используют многие гидродинамические эффекты, но многие исследователи связывают спектр размеров полученных капель с выходным сечением распылителя: чем диаметр выходного сечения  $D$  меньше тем меньше полученные капли. Однако, из-за повышенной вязкости растворов при низких температурах, характерных для арктических районов РФ, использование распылителей с малым выходным сечением  $D \sim 0,8...2$  мм значительно понижает надёжность их работы.

Двухфазные распылители для диспергирования жидкости используют энергию сжатого газа-пропеллента. Энергия, в этом случае, подводится к жидкости главным образом в результате динамического взаимодействия с высокоскоростным потоком газа. Расход энергии на распыливание жидкости при этом составляет 50...60 кВт на 1 т жидкости. Смешение газового и жидкостного потока в таких распылителях производится в специальных камерах или на срезе форсунки. Анализ возможных типов распылителей для противопожарной защиты показал, что в качестве образцов распылителей для определения характеристик необходимых для процесса тушения горючих материалов и жидкостей возможно использование нескольких оригинальных вариантов форсунок тонкораспыленной жидкости, характеристики которых определялись экспериментально.

Были изготовлены 8 распылителей следующих типов [4]:

1. Струйно-центробежная форсунка с соударяющимися струями;
2. Распылитель со сдвоенными соплами;
3. Струйно-центробежный распылитель с пересечением струй;

4. Шнеково-вихревой распылитель;
5. Распылитель с соударяющимися струями;
6. Распылитель со сдвоенными соплами (вариант 2);
7. Распылитель ударно-волнового типа;
8. Распылитель ударного типа.

В результате проведенных испытаний каждого образца были определены:

- расход жидкости через распылитель  $m$  при ступенчатом изменении давления  $p$  подачи воды;
- средние диаметры капель  $d_{10}$  и  $d_{32}$  жидкости, генерируемой распылителем, при ступенчатом изменении давления подачи  $p$  воды, полученные оптическим измерительным комплексом Malvern Insittec Sistem RTS 5424 (STP5649);
- ток утечки  $I_{yt}$  по струе распыленной жидкости при ступенчатом изменении давления  $p$  подачи воды;
- карта орошения поверхности при установке распылителей на высоте  $H = 2,5$  м от уровня пола и давлении подачи  $\Delta p = 0,8$  МПа.

Наилучшими характеристиками по дисперсности, равномерности орошения поверхности и электрическому сопротивлению распыленной жидкости обладают распылители, которые используют взаимодействие струй и пелён жидкости при их выходе из отверстий (типы 1, 3, 5). Причём это взаимодействие происходит под углами в диапазоне  $40^0 \dots 180^0$ . Причём кромки выходных отверстий образованы пересечением в большинстве случаев внутренней цилиндрической поверхности подводящего канала с наружным ограничивающим конусом. Реальные схемы таких распылителей представлены, например, в патентах РФ № 2137039, № 2273527, № 2150336, № 2339817. Все испытанные распылители генерируют поток капель раствора со средним арифметическим размером  $d_{10} < 150$  мкм при давлении подачи  $p \geq 0,6$  МПа. Так распылитель с соударяющимися струями при давлении подачи  $p = 0,6$  МПа создаёт капли с диаметром  $d_{10} = 119$  мкм,  $d_{32} = 252,2$  мкм  $\alpha = 0,0092$  при расходе  $m = 1,07$  л/с, а при давлении  $p = 1$  МПа -  $d_{10} = 88,12$  мкм,  $d_{32} = 258,22$  мкм  $\alpha = 0,02$  при расходе  $m = 1,38$  л/с; ток утечки был в пределах  $I = 0,11 \dots 0,17$  мкА.

По результатам полученных данных измерений рабочих характеристик восьми распылителей необходимо отметить следующее. С увеличением давления подачи и, следовательно, расхода жидкости среднеарифметический размер  $d_{10}$  уменьшается из-за увеличения в потоке количества мелких капель, а среднеобъёмный Заутеровский размер  $d_{32}$  изменяется слабо либо растёт при увеличении давления до 1 МПа. Последнее обстоятельство объясняется тем, что Заутеровский диаметр  $d_{32}$  мало чувствителен к появлению мелких капель, объём которых пренебрежимо мал, а увеличение расхода жидкости ведёт к увеличению суммарного объёма всех капель. Удельная поверхность капель при этом уменьшается или остаётся той же, что указывает на отсутствие однозначного влияния повышения давления на массо-теплообмен распыленной жидкости с продуктами горения.

В тоже время весь спектр размеров сдвигается в сторону мелких капель. В некоторых распылителях обнаруживается существенная неравномерность интенсивности орошения по защищаемой площади. Особенно это явно проявляется для распылителей ударно-волнового типа 7 и спринклерного распылителя ударного типа 8. В этом отношении лучшие показатели у струйно-центробежных распылителей с соударяющимися струями и пересечением струй, а также распылителя с соударяющимися струями. Это обстоятельство особенно важно для автоматических систем пожаротушения, для которых



присутствие участков поверхности со слабой защитой распыленной водой может привести к вторичному возгоранию.

Диапазон зафиксированных интенсивностей орошения  $q_{cp} = 0,03 \dots 0,145 \text{ кг/м}^2\text{с}$  полностью перекрывает необходимых на практике значений для тушения и локализации очагов возгорания твёрдых горючих материалов и горючих жидкостей [1].

В заключении можно отметить, что для Арктических районов России можно с успехом использовать технологию пожаротушения тонкораспыленной жидкостью, в качестве которой следует использовать раствор хлорида лития  $\text{LiCl}$ , мочевины и плёнкообразующего пенообразователя. При этом пожаротушащая эффективность соответствует водному раствору пенообразователя при нормальных условиях.

Кроме того, найденным раствором можно тушить электроустановки под напряжением.

Для организации потока тонкораспыленной жидкости целесообразно использовать распылители с соударяющимися струями или пелёнами.

1. А.Л.Душкин, С.Е.Ловчинский. Пожаровзрывобезопасность, 2011, 20, 53-56
2. Р.И.Нигматулин. Динамика многофазных сред. Ч.1 – М.: Наука 1987, 464 с
3. Л.Д.Ландау, В.Н.Лифшиц. Гидродинамика – М.: Наука 1988, 736
4. А.Н.Приходько, В.С.Галустово, Л.П.Холпанов, В.П.Приходько. Справочник по распыливающим, оросительным и каплеулавливающим устройствам. М.: Энергоиздат, 2002, 608