

УДК 614.842.612

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ

О.Г. ГОРОВЫХ, И.А. ШМУЛЕВЦОВ

Государственное учреждение образования «Институт переподготовки и повышения квалификации» МЧС Республики Беларусь, пос. Светлая Роща, Борисовский район, Минская обл., Беларусь

В статье введено понятие эффективности пожаротушения, и рассмотрено использование воды как огнетушащего средства, возможность обеспечения максимальной эффективности её использования путем высокого диспергирования. Показано, что дисперсность частиц воды, достигаемая современными средствами подачи её в очаг горения, обеспечивает низкую степень полезного использования, не превышающую нескольких процентов. Предложено направление, которое может обеспечить повышение эффективности использования воды как огнетушащего средства.

Ключевые слова: эффективность пожаротушения, дисперсность капель воды, время осаждения капель.

Введение. Применение воды как огнетушащего средства, имеющего наряду с положительными факторами, такими как: наличие уникальных физико-химических свойств, возможность использования разработанных надежных средств и способов её доставки в зону горения, экологическая безопасность вещества, низкая стоимость по сравнению с иными огнетушащими средствами, достаточные запасы на Земле, имеет и большое количество существенных недостатков, таких как: малый процент использования воды из общего количества поданной на тушение, большой урон, наносимый ею строительным конструкциям и другим материальным ценностям.

Попадая на горящую (разогретую) поверхность происходит испарение воды, при этом над горячей поверхностью образуется слой газа, который является изолятором не только от поступления в зону горения кислорода, но и тормозит, препятствует отводу тепла непосредственно с поверхности горящего материала. Водяной пар, как любой газ, относится к материалам, наиболее плохо проводящих тепло. (Теплопроводность пара равна $\lambda_{\text{пара}} - 0,0238 (100^\circ\text{C}) - 0,0751 (500^\circ\text{C}), \text{Вт}\cdot(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$). Таким образом, контакт воды непосредственно с горячей поверхностью может снизить

эффект теплоотдачи за счет образования плохо проводящей тепло паровой прослойки.

Для того, чтобы определить, какое из средств пожаротушения является наиболее эффективным средством тушения пожара, необходимо четко сформулировать понятие эффективности пожаротушения.

Основная часть. Эффективность пожаротушения количественно характеризуют как временем, в течение которого был ликвидирован очаг пожара, так и тем количеством огнетушащих средств, которое минимально необходимо для безвозвратного (отсутствие повторного возгорания и отсутствие продолжающегося тления) тушения. Для тушения пожара необязательно непосредственно воздействовать водой на горящий материал, достаточно резко снизить температуру в зоне горения (в газовой фазе) и таким образом предотвратить тепловой поток, который обеспечивает пиролиз или испарение горящего материала.

Поэтому под эффективностью пожаротушения часто понимают количество воды (интенсивность подачи воды), поданной на тушение стандартного очага пожара, при заданной дисперсности.

Мы будем понимать под эффективностью показатель, равный отношению фактически используемой воды (при данной дисперсности) к минимально необходимой (теоретически рассчитанной) для тушения данного пожара. Минимально необходимое количество воды будем считать равным тому количеству, которое снизит температуру дымовых газов до 150°C или охладит очаг пожара до температуры меньшей чем температура воспламенения (самовоспламенения) имеющихся горючих материалов.

Например, если мы имеем очаг класса А (горение углеродсодержащих материалов) размером 0,50x0,80 м², который горел в течение 15 минут, то количество выделяющегося в единицу времени тепла равно:

$$Q_{15} = S \times Q_n \times \tau \times v_{уд},$$

где Q_n - низшая теплота сгорания вещества, кДж·кг⁻¹;

S – площадь горения, м²;

$v_{уд}$ – удельная скорость выгорания, кг·(м²·с)⁻¹;

τ – время горения, секунды.

Переходя к числовым значениям взятым из [1], например, низшая теплота сгорания древесины - 13,8 МДж·кг⁻¹, и т.д. имеем:

$$Q_1 = 13,8 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \times 0,0145 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \times \text{с}} \times 0,4 \text{ м}^2 = 0,08004 \frac{\text{МДж}}{\text{с}}$$

За 15 минут горения будет выделено тепла:

$$Q_{15} = Q_1 \times 15 \times 60 = 0,08004 \times 15 \times 60 = 72,036 \text{ МДж}$$

Таким образом, количество тепла, которое надо отвести из помещения, максимально равно 72,0 МДж, однако, самопроизвольное прекращение горения возможно и в том случае, если температура упадет до величин ниже чем температура самовозгорания вещества. Таким образом, из помещения необходимо отвести только количество тепла равное:

$$Q_{\text{ост}} = Q_{15} - Q_{\text{изл}} - Q_{\text{самов}}$$

$$Q_{\text{изл}} = Q_{15} \times 0,3 = 72,036 \times 0,3 = 21,6108 \text{ МДж}$$

$$Q_{\text{самов}} = \sum_i m_i \times C_i \times \Delta t_i,$$

где m_i – масса нагретого i -го вещества, кг;

Q_{15} – количество тепла, выделившееся за 15 минут горения очага, кДж;

$Q_{\text{ост}}$ – количество тепла, которое необходимо отвести из зоны горения для обеспечения потухания, кДж;

$Q_{\text{изл}}$ – количество тепла, пошедшее на излучение, кДж;

C_i – теплоемкость i -го вещества, кДж/кг·К;

Δt_i – прирост температуры от исходной в помещении до температуры самовозгорания (самовоспламенения) i -го вещества, К.

Пренебрегая расчетами количества тепла, идущего на нагрев материалов до температуры их самовоспламенения, определяем, что из помещения необходимо отвести $Q_{\text{ост}} = 50,425 \text{ МДж}$.

Количество воды, которое необходимо для отведения данного количества тепла при нагревании воды от 15°C до температуры 100°C равно:

$$m = \frac{Q}{c \times \Delta t} = \frac{50,425 \times 10^3 \text{ кДж}}{4,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \times 85} = 141,93 \text{ кг} \approx 142 \text{ кг},$$

где m – масса воды, кг;

c – теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

Δt – разность температур, °С.

Рассчитаем примерную температуру в помещении, заполненном дымовыми газами, задавшись усредненной величиной теплоемкости дымовых газов, если объем помещения составляет 60 м^3 (средняя жилая комната $5 \times 4 \times 3$). Из справочника [2] находим теплоемкость дымовых газов $c_{\text{дым}} = 1,733 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$. Определяем температуру газов в помещении:

$$c = c_{\text{дым}} \times \Delta T \times V,$$

где V – объем помещения с очагом пожара, м^3 ;

ΔT – изменение температуры в помещении, К.

$$\Delta T = \frac{50425,2}{1,733 \times 60} = 484,95 \approx 485, \quad T = 273 + 485 = 758 \text{ К}$$

Однако, кроме того, что в помещение необходимо ввести расчетное количество воды, необходимо, чтобы капли воды были той дисперсности, которая обеспечит за короткий промежуток времени (предположим, несколько секунд) отвод расчетного количества тепла.

Какова же должна быть дисперсность капель воды, чтобы она обеспечила максимально быстрый отвод требуемого количества тепла? Для этого рассмотрим движение капли воды в комнате высотой 3 м, где исходная температура составляет 758 К (с учетом горения очага пожара в течение 15 минут).

При описании осаждения капель воды под действием силы тяжести необходимо учитывать параметры режима обтекания и сопротивления среды, которые зависят от режима движения жидкости, формы и состояния поверхности обтекаемых частиц. Если принять, что свободно падающая капля воды имеет шарообразную форму, то, применив закон Стокса [3], можно использовать следующее уравнение:

$$\xi = f(\text{Re}) \quad (1),$$

где ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления.

В реальных условиях осаждения форма капли воды отличается от шарообразной и тогда соотношение [1] примет вид:

$$\xi = \frac{A}{R} \quad (2),$$

где $A = f(\varphi)$, φ – фактор формы.

Осаждение капли воды, в зависимости от диаметра капли может быть или равноускоренным на всем протяжении падения, или в первый момент движение бу-

дет равноускоренным, а с момента установления равновесия сил сопротивления и силы тяжести – равномерным с постоянной скоростью.

Для предварительных расчетов пренебрежем испарением воды как фактором, повышающим эффективность использования воды, а также возможностью конденсации отдельных капель воды при их соприкосновении во время движения от потолка до пола, из-за небольшого времени движения.

Для того чтобы капля воды как можно дольше проходила путь от потолка помещения до пола, необходимо, чтобы равноускоренное движение максимально быстро перешло в равномерное движение, тогда к нему можно будет применить уравнение [4]:

$$v = \sqrt{\frac{\frac{4}{3} [d_{\text{капли}} \times (\rho_{\text{вода}} - \rho_{\text{воздух}}) \times g]}{\xi \times \rho_{\text{воздух}}}} \quad (3),$$

где d – диаметр капли, м;

$\rho_{\text{воздух}}$ и $\rho_{\text{вода}}$ – плотность воздуха и воды, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ξ – коэффициент сопротивления среды.

При свободном падении капли $Re < 0,1$, тогда $\xi = \frac{24}{Re}$ и (3) преобразуется в

$$v = \frac{d_{\text{капля}}^2 \times (\rho_{\text{вода}} - \rho_{\text{воздух}}) \times g}{18 \times \mu}, \text{ где}$$

μ – вязкость воздуха, при температуре 200°C примем равной 25,1 мкПа·с [2].

Так как $v = \frac{h}{\tau}$, то

$$\tau = \frac{h \times 18 \times \mu}{d_{\text{капля}}^2 \times (\rho_{\text{вода}} - \rho_{\text{воздух}}) \times g}$$

Подставляя в полученное выражение величину капель от 3 мкм до 1000 мкм, получим время, за которое капля воды будет проходить путь от потолка помещения до пола.

Из представленной ниже таблицы 1 зависимости времени падения капли от её диаметра видно, что при диаметре капли равном 200 мкм средняя величина капли, гарантированная установкой УИП, время падения (3 метра – высота комнаты) составляет примерно 1 секунду, а при диаметре – 1000 мкм (ствол комбинированный), только 0,13 секунды.

Таблица 1 – Зависимость времени осаждения капли от её диаметра

Диаметр капли, мкм	Время осаждения капли, τ, с	Диаметр капли, мкм	Время осаждения капли, τ, с	Диаметр капли, мкм	Время осаждения капли, τ, с
0,7	284701,3	19	386,4366	300	1,55004
1	139503,6	20	348,7591	350	1,138805
3,8	9660,916	30	155,004	400	0,871898
3,9	9171,836	40	87,18977	450	0,688907
4	8718,977	50	55,80145	500	0,558015
4,9	5810,23	60	38,75101	550	0,461169
5	5580,145	70	28,47013	600	0,38751
6	3875,101	80	21,79744	700	0,284701
7	2847,013	90	17,22267	750	0,248006
8	2179,744	100	13,95036	800	0,217974
9	1722,267	150	6,200161	900	0,172227
10	1395,036	200	3,487591	950	0,154575
18	430,5668	250	2,232058	1000	0,139504

Используя уравнение нагревания шара в среде с постоянной температурой [5] имеем:

$$\theta = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2(\sin \mu_i - \mu_i \times \cos \mu_i) \times \sin(\mu_i \times R_x)}{(\mu_i - \sin \mu_i \times \cos \mu_i) \mu_i \times R_x} \times e^{-\mu_i^2 \times Fo},$$

где μ – корни характеристического уравнения $tg \mu = -\frac{\mu}{Bi - 1}$;

Fo – число Фурье, $Fo = \frac{\alpha \times \tau}{R^2}$;

R_x – безразмерная координата;

θ – относительная избыточная температура, безразмерная величина;

Bi – число Био, $Bi = \frac{\alpha \times R}{\lambda}$.

Приняв Био стремящееся к нулю при малых радиусах, приходим к уравнению:

$$\frac{t_1 - t}{t_1 - t_0} = e^{-3 \frac{\alpha \times \tau}{\rho \times c \times R}},$$

где t_0 – исходная температура воды, 288K;

t_1 – температура газов в помещении, по расчетам составляет 758K;

t – конечная температура нагрева воды, 373K;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·K);

τ – время, в течение которого капля воды достигает пола, секунды;

λ – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·K);

ρ – плотность воды, кг/м³;

c – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

R – радиус капли, м.

Подставляя в левую часть приведенного выражения $e^{-\frac{3\alpha\tau}{\rho \times c \times R}}$ величины плотности воды, теплоемкости воды и коэффициента теплоотдачи воды, получим зависимость относительной избыточной температуры от радиуса капли.

Так как при принятых нами условиях $\frac{t_1 - t}{t_1 - t_0} = \frac{758 - 373}{758 - 288} = \frac{385}{470} = 0,819$, то на

графике зависимости $Y = f(R) = e^{-\frac{3\alpha\tau}{\rho \times c \times R}}$, где прямая линия $F(R) = 0,819$ в точке пересечения с функцией $Y = f(R)$ укажет на тот диаметр капли, при котором гарантированно прогревание капли до температуры 373К.

Этот диаметр равен 0,89 мкм. Распыление меньше 1 мкм, то есть такая высокая дисперсность капель, которую не гарантирует ни одно из имеющихся в распоряжении пожарных-спасателей технических устройств.

Обеспечение такой дисперсности имеющимися насосными агрегатами пожарных аварийно-спасательных автомобилей, ранцевыми установками пожаротушения «Игла», установками импульсного пожаротушения «УИП-1», АУПТ в настоящее время не представляется возможным [6]. Указанные устройства представляют системы с механическим распылением. В таких системах дисперсность воды достигается путем механического соударения струй, идущих под большим давлением (10-15 МПа) через прецизионные насадки. К таким системам относятся системы типа High-Fog (Финляндия, Marioff), AquaFog (Испания, LPG) и др. [7]. В качестве источника давления используются либо баллоны с газом высокого давления (азот, воздух, углекислота), либо мощные компрессоры или насосы, развивающие за короткое время давление в сотни атмосфер, либо пиротехнические газообразователи. По разным сведениям, средние размеры капель, получаемых таким способом, составляют около 100 мкм. В качестве дополнительного преимущества производители систем отмечают высокую скорость выходящей струи, что позволяет направленно доставить к месту возгорания основную массу огнетушащего вещества. Системы достаточно дороги (сопоставимы по цене с газовыми системами).

Создание высокоскоростного капельного потока организуется в представленных системах следующими путями:

однофазный поток организуется за счет механической энергии жидкости, подаваемой под давлением, с использованием гидродинамических эффектов, в том числе кавитации, для получения потока тонкораспыленной жидкости;

двухфазный поток создается за счет кинетической энергии воздуха, подаваемого под давлением, путем смешения с жидкостью в специально разработанных смесительных и сопловых устройствах. Возможно также создание высокоскоростного тонкораспыленного потока за счет принципов скрещивающихся струй и центробежных эффектов в специально разработанных сопловых устройствах.

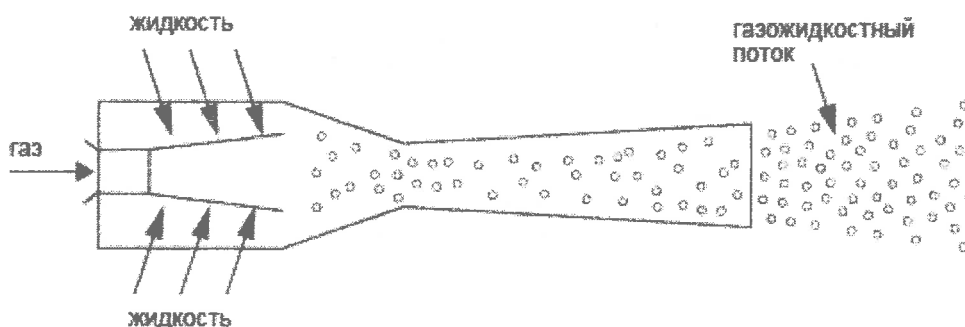


Рисунок 1 – Системы получения тонкораспыленной воды в ранцевой установке пожаротушения «Игла»

Двухфазный способ.

В таких системах сначала происходит образование газо-жидкостной смеси (по принципу карбюратора), затем эта смесь подается по трубопроводам к насадкам, существенно более простым и недорогим. Системы работают под давлением от 4 до 2 МПа, на выходе из насадок давление составляет около 0,5 МПа. Источником давления и газовой фазой в газо-жидкостной смеси служат либо азот, либо CO_2 , либо другие газы. При таком давлении кинетическая энергия частиц воды невелика, поэтому такие системы относят к системам ненаправленного или малонаправленного действия. Правда, конструкторы подобных систем утверждают, что средний размер капель на выходе из насадок составляет около 50 мкм (что обеспечивает эффективное использование от общего количества поданной на тушение пожара воды не более 14%). Многочисленные огневые испытания подобных систем доказали их высокую эффективность по сравнению с другими способами, и в настоящий момент эти системы являются рекордсменами по удельным расходам воды при пожаротушении. Системы создают водяной туман в объеме помещения, и их основная особенность

заключается в длительной стабильности созданного водяного тумана. Для этого используются специальные поверхностно-активные добавки. Добавки не позволяют каплям агрегировать и обеспечивают стабильность газо-жидкостной смеси во всем объеме защищаемого помещения. Представленный принцип используется в РУПТ «Игла».

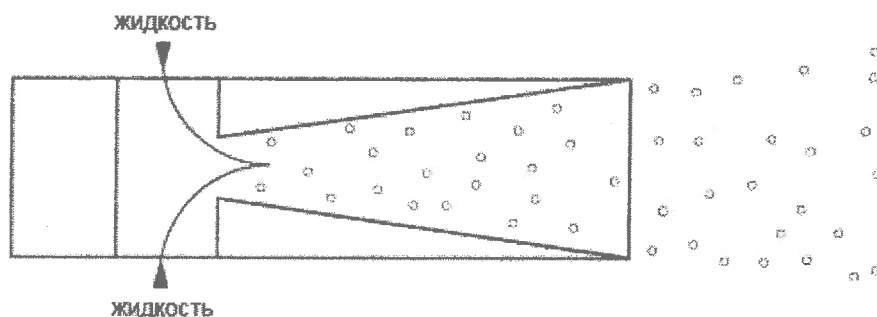


Рисунок 2 – Системы получения тонкораспыленной воды при использовании насосов высокого давления

Способ, основанный на взаимодействии жидкостных потоков. В импульсных технологиях пожаротушения эффективность достигается за счет метода импульсного воздействия огнетушащих составов на очаги горения [8]. Аппарат осуществляет выстрел небольшого количества огнетушащего вещества за несколько миллисекунд. Принцип действия импульсного оборудования объясняется очень просто: оно состоит из двух камер, разделенных высокоскоростным клапаном. В задней камере находится сжатый воздух под давлением от 2 до 3 МПа, а в передней – тушащий агент (как правило, вода). При выстреле создается облако водяного тумана с размером капель воды от 2 до 200 мкм, причем не указывается доля высокодисперсных (2мкм) капель в общем объеме.

Рассматривая дисперсность воды, создаваемую современными агрегатами, и рассчитывая при этом температуру, до которой может прогреться капля такого размера, находясь рассчитанное время в помещении, определяем, что прогрев капли не превышает 2 градусов. Это говорит о том, что для снижения температуры в помещении до критической необходимо ввести как минимум в 50 раз больше воды, чем теоретически рассчитанное количество. Таким образом, эффективность использования воды как огнетушащего вещества в современных технических устройствах не превышает 2%. В ближайшей перспективе увеличить дисперсность воды до величин менее 1 мкм описанными средствами и способами с применением насосов высо-

кого давления не представляется возможным, так как давление в них придется поднять до величин больших, чем 15 МПа, что технически достаточно сложно и экономически не целесообразно.

Вывод. Таким образом, все описанные выше и использующиеся в настоящее время способы распыления воды не дают нам возможности распыления всей массы воды с дисперсностью менее 1 мкм. Исходя из этого, следует предположить необходимость получения распыления другим способом для обеспечения повышения эффективности использования воды. Одним из возможных вариантов достижения требуемой дисперсности может быть ультразвуковое распыление воды. Установки, которые уже сегодня имеются в промышленности, гарантируют дисперсность, доведенную до 1 мкм пока при малой производительности – 300 г/час. Осталось решить вопрос с обеспечением требуемой производительности – как минимум 10 дм³/с.

Обозначения

$\lambda_{\text{пара}}$ – коэффициент теплопроводности, теплопроводность, Вт·(м·К)⁻¹;

Q_n – низшая теплота сгорания вещества, кДж·кг⁻¹;

S – площадь горения, м²;

$v_{\text{уд}}$ – удельная скорость выгорания, кг·(м²·с)⁻¹;

τ – время, секунды;

Q – количество тепла, кДж;

m – масса воды, кг;

c – теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

Δt – разность температур, К;

ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления;

φ – фактор формы;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

ρ – плотность, кг/м³;

R – радиус капли, м.

R_x – безразмерная координата;

θ – относительная избыточная температура, безразмерная величина

Литература

1. Кошмаров Ю.А., Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. – М.: Академия Государственной противопожарной службы МВД России, - 2000, - 118с.
2. Енохович А.С., Справочник по физике. – М.: Просвещение, - 1978, - 415с.
3. Лукин В.Д., Курочкина М.И., очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности. Л.: Химия, - 1980,- 232с.
4. Балабеков С., Балтабаев Л.Ш., Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппарата. М.: Химия, - 1991, - 251с.
5. Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М.: Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, - 1987, - 444с.
6. Петуховский С.Г., Карпенчук И.В., Заневская Ю.В. /Повышение эффективности распыления при пожаротушении мелкодисперсной водой.// «ЧС: предупреждение и ликвидация.», №6 (16),– С.154-162.
7. Дауэнгауэр С.А Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы. // Пожаровзрывобезопасность, – №6, – 2004, – С.79.
8. WWW.tempero.ru/ Описание технологий пожаротушения.

Поступила в редакцию 21.02.2008.

O.G. Gorovyh, I.A Shmulevtsov

PROSPECTS OF INCREASING OF EFFICIENCY OF FINE-AIR-MIST USING.

This article introduces the term “Efficiency of firefighting” and examines using of water as fire extinguishing substance, possibility of maintenance of maximum effectiveness of its usage by means of high dispersibility. It shows that dispersibility of water drops provided by modern water supplying equipment has poor efficiency, about several percent. The new direction of work that may maintain efficiency of using of water as fire extinguishing substance.