

Оценка механизмов тушения горючих жидкостей тонкораспыленной водой

© Д.А. Корольченко¹ ✉, С.В. Пузач²

- ¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)
- ² Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

АННОТАЦИЯ

Введение. При разработке новых способов тушения пожаров в помещениях зданий и сооружений и использовании для тушения современных огнетушащих средств возникает ряд проблем. Для решения их требуются специальные исследования, например выявление общих принципов обеспечения эффективности тушения пожаров и определение на их основе оптимального режима применения огнетушащих веществ. Цель работы — теоретическая оценка механизмов тушения горючих жидкостей тонкораспыленной водой.

Поставленные задачи: предложить уравнения законов сохранения массы и энергии для пламенной зоны с учетом поступления в нее струи тонкораспыленной воды; выполнить оценку расходов воды, необходимых для реализации различных механизмов тушения; провести сопоставление результатов оценок с экспериментальными данными, полученными при тушении модельных очагов горения горючих жидкостей.

Методика расчета. Расчеты сделаны на основе уравнений законов сохранения массы и энергии в пламенной зоне, образующейся над поверхностью горючего материала.

Результаты исследования. Рассмотрены два механизма тушения, способствующих прекращению горения в пламенной зоне: 1) достижение такой массовой концентрации водяного пара, при которой достигается нижний концентрационный предел горения горючей газовой смеси (флегматизация); 2) охлаждение горючей газовой смеси в пламенной зоне путем испарения воды до температуры вспышки горючих паров.

Выводы. Предложены уравнения законов сохранения массы и энергии для пламенной зоны, образующейся при горении горючих жидкостей с учетом поступления в нее струи тонкораспыленной воды. Выполнена оценка расходов воды, необходимых для реализации различных механизмов тушения, с использованием предложенных уравнений. Проведено сопоставление результатов теоретических оценок с экспериментальными данными по тушению модельных очагов горения горючих жидкостей тонкораспыленной водой.

Ключевые слова: пожар; флегматизация; вспышка; дисперсность воды; интенсивность подачи; пламенная зона; закон сохранения массы; закон сохранения энергии

Для цитирования: Корольченко Д.А., Пузач С.В. Оценка механизмов тушения горючих жидкостей тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 1. С. 54–63. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.54-63

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

The assessment of extinction mechanisms involving water mist applied to combustible liquids

© Dmitriy A. Korolchenko¹ ✉, Sergey V. Puzach²

- ¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)
- ² The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. A number of problems accompany the development of new extinction methods applicable on the premises of buildings and structures and the use of advanced fire extinguishing agents. Subject-specific studies are needed to solve these problems. They include the identification of general principles of fire extinguishing efficiency and further development of the optimal mode of application of firefighting agents. The purpose of this work is the theoretical assessment of fire extinction mechanisms involving the water mist applied to combustible liquids. The objectives to be accomplished include the equations based on the mass/energy conservation laws and derived for flame zones with account taken of the water mist applied; the assessment of the water flow rate for different combustion mechanisms; comparison of assessment results with experimental data obtained in the process of extinguishing model fire seats that have burning combustible fluids.

Methods of analysis. The calculations involve the equations based on the mass/energy conservation laws and derived for flame zones above the surface of combustibles.

Research results. The author analyzes two fire extinguishing mechanisms that contribute to the suppression of burning in the flame zone: 1) the attainment of the value of mass concentration of water vapour that reaches the lower concentration limit of combustion of the combustible mixed gas (oxygen reduction); 2) cooling combustible mixed gas in the flame zone by evaporating water until the flash point temperature of combustible vapour is reached.

Conclusions: Equations based on mass/energy conservation laws were derived for flame zones, formed in the course of combustion of flammable liquids, with account taken of a jet of water mist. Water flow rates needed for the implementation of various extinguishing mechanisms were analyzed using the proposed equations. Theoretical results were compared with the experimental data obtained in the process of using water mist to extinguish model fire seats that contain combustible fluids.

Keywords: fire; oxygen reduction; flashover; water dispersibility; water application rate; flame zone; mass conservation law; energy conservation law

For citation: Korolchenko D.A., Puzach S.V. The assessment of extinction mechanisms involving water mist applied to combustible liquids. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2021; 30(1):54-63. (rus). DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.54-63

✉ Dmitriy Aleksandrovich Korlchenko, e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Введение

Несмотря на разработку новых способов тушения пожаров в помещениях зданий и сооружений различного назначения, а также использование для тушения современных огнетушащих средств, существует ряд проблем, для решения которых требуются специальные исследования. В частности, актуальным остается вопрос выявления общих принципов обеспечения эффективности тушения пожаров и определения на их основе оптимального режима применения огнетушащих веществ (ОВ).

Основным огнетушащим веществом на сегодняшний день является вода. Ее уникальные свойства, такие как негорючесть, высокая теплота испарения, текучесть и доступность, делают данное средство незаменимым при тушении пожаров [1–6].

В зависимости от формы применения вода способна тушить пожары любых типов, но эффективность тушения существенно зависит от ее дисперсности, интенсивности подачи и ряда других факторов [7–9].

В большом количестве работ [10–14] приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов тушения пожаров тонкораспыленной водой. Однако чрезвычайная сложность происходящих при тушении теплофизических процессов не позволяет получить экспериментальные данные, необходимые для разработки надежных методов расчета. Поэтому изучение механизмов тушения тонкораспыленной водой является актуальной задачей.

Цель настоящей работы — теоретическая оценка механизмов тушения горючих жидкостей (ГЖ) тонкораспыленной водой. Для ее достижения необходимо:

- предложить уравнения законов сохранения массы и энергии для пламенной зоны с учетом поступления в нее струи тонкораспыленной воды;

- выполнить оценку расходов воды, необходимых для реализации различных механизмов тушения;
- провести сопоставление результатов оценок с экспериментальными данными, полученными при тушении модельных очагов горения горючих жидкостей.

Уравнения законов сохранения массы и энергии в пламенной зоне

Схемы потоков массы в пламенной зоне, образующейся над поверхностью горючего материала, при отсутствии тушения и в случае подачи мелко-дисперсной струи воды представлены на рис. 1.

Согласно рис. 1, высота пламенной зоны при ее тушении z_{fw} превышает ее высоту в случае отсутствия тушения z_f , что подтверждается экспериментальными данными (рис. 2).

Уравнение закона сохранения массы для пламенной зоны в соответствии с рис. 1 имеет вид:

$$\frac{d(\rho_m V_f)}{d\tau} = G_a + G_{aw} + \Psi + G_{fw} + \beta G_{sw} - G_{kw}, \quad (1)$$

где ρ_m — среднеобъемная плотность газовой смеси внутри пламенной зоны, кг/м³;

V_f — объем пламенной зоны, м³;

τ — время, с;

G_a — массовый расход воздуха, поступающего в конвективную колонку при отсутствии тушения до высоты пламенной зоны, кг/с;

G_{aw} — массовый расход воздуха, поступающего в пламенную зону вследствие эжектирующего воздействия струи воды, кг/с;

Ψ — массовый расход продуктов газификации горючего вещества, кг/с;

G_{fw} — массовый расход воды, поступающей в пламенную зону, кг/с;

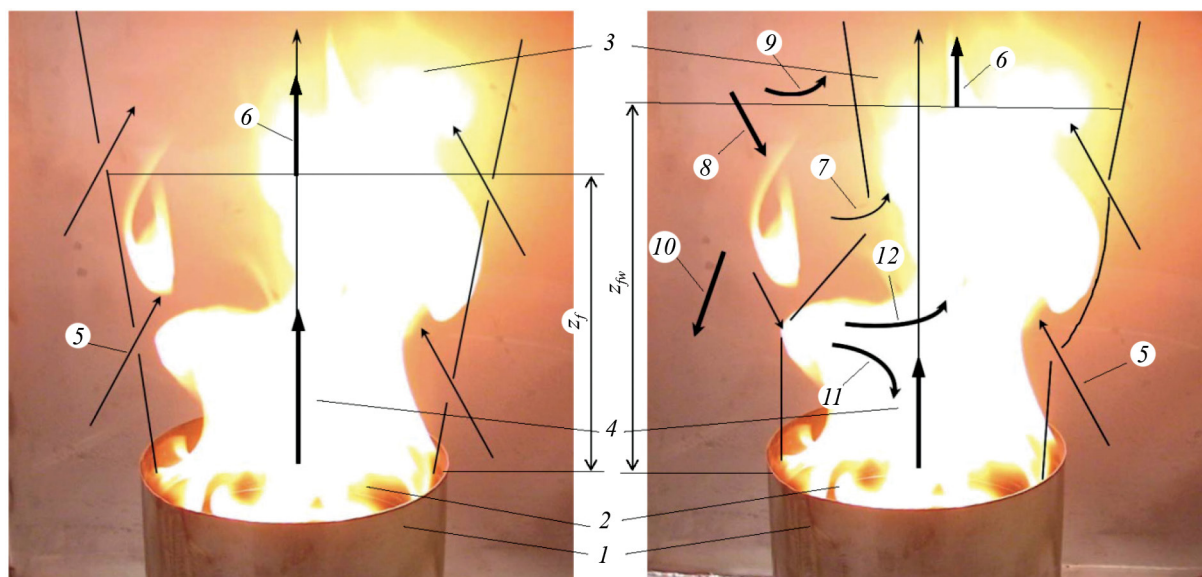


Рис. 1. Схемы потоков массы в пламенной зоне, образующейся над поверхностью горючего материала, при отсутствии тушения (а) и в случае тушения (б): 1 — металлическая горелка; 2 — горючее вещество; 3 — конвективная колонка; 4 — продукты газификации горючего вещества; 5 — воздух, поступающий в конвективную колонку; 6 — газовая смесь, выходящая из пламенной зоны; 7 — воздух, поступающий в пламенную зону из-за эжектирующего воздействия струи воды; 8 — мелкодисперсная вода, подаваемая на тушение; 9 — вода, поступающая в конвективную колонку выше пламенной зоны; 10 — вода, не поступающая в конвективную колонку; 11 — вода, попадающая на поверхность горючего вещества и образующая на ней пленку пара; 12 — вода, поступающая в конвективную колонку в пламенную зону; z — координата по высоте, отсчитываемая от поверхности горючего вещества, м; z_f , z_{fw} — высота пламенной зоны соответственно без тушения и в случае тушения, м

Fig. 1. Patterns of mass flows in the flame zone above the surface of the combustible material, in the absence of extinguishing (a) and in the case of extinguishing (b): 1 — metal burner; 2 — combustible agent; 3 — convective column; 4 — combustible agent gasification products; 5 — air supplied into the convective column; 6 — mixed gas leaving the flame zone; 7 — air supplied to the flame zone due to the ejection effect of the water jet; 8 — water mist supplied for extinguishing purposes; 9 — water entering the convective column above the flame zone; 10 — water not entering the convective column; 11 — water falling on the surface of the combustible agent and forming a vapour film on it; 12 — water entering the convective column in the flame zone; z — the height coordinate, measured as of the surface of the combustible agent, m; z_f , z_{fw} — the height of the flame zone, if extinguishing is not or is applied, m

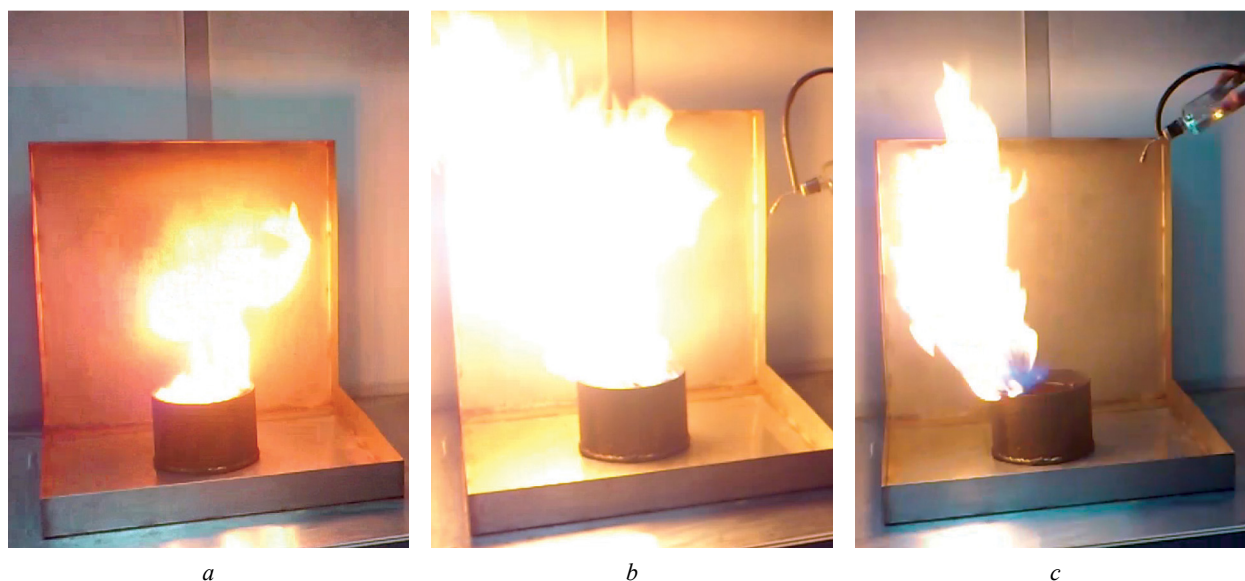


Рис. 2. Процесс тушения н-гептана водой с высокой степенью распыла (средний размер капель — около 20 мкм): а — свободное горение гептана; б — резкое увеличение факела пламени при подаче распыленной воды; с — постепенное вытеснение пламени слоем водяного пара

Fig. 2. The process of n-heptane extinction using highly atomized water (the average drop size is about 20 microns): a — freely burning heptane; b — a sharp increase of the torch-like flame boosted by atomized water; c — gradual substitution of the flame by the layer of vapour

β — доля массового расхода воды G_{sw} , поступающей в пламенную зону под воздействием продуктов газификации горючего материала на его поверхности;

G_{sw} — массовый расход воды, попадающей на поверхность горючего вещества и образующей на ней пленку пара, кг/с;

G_{kw} — суммарный расход газовой смеси, выходящей из пламенной зоны, кг/с.

Суммарный расход воды G_w (кг/с), подаваемой на тушение, определяется по выражению

$$G_w = G_{fw} + G_{sw} + G'_w + G''_w, \quad (2)$$

где G'_w , G''_w — потери расхода воды вне пламенной зоны, кг/с (см. рис. 1, позиции 9 и 10).

Уравнение закона сохранения энергии для пламенной зоны, представленной на рис. 1, можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho_m V_f c_{pf} T_m)}{d\tau} = Q_f (1 - \phi) + \\ + c_{pa} T_0 (G_a + G_{aw}) + i_\psi \Psi - c_{pf} G_{kw} T_f + \\ + (c_{pwl} T_{w0} - \chi Q_w) (G_{fw} + G_{sw}), \end{aligned} \quad (3)$$

где c_{pa} , c_{pf} , c_{pwl} — удельная массовая теплоемкость, соответственно, воздуха, газовой смеси, выходящей из пламенной зоны, и воды в жидкой фазе, Дж/(кг·К);

T_m — среднеобъемная температура газовой смеси внутри пламенной зоны, К;

Q_f — мощность тепловыделения при горении,

Вт, $Q_f = \eta \psi S_0 Q_r$;

η — полнота сгорания;

ψ — удельная массовая скорость газификации горючего вещества, кг/(с·м²);

S_0 — начальная площадь поверхности горения горючего вещества, м²;

Q_r — низшая рабочая теплота сгорания горючего вещества, Дж/кг;

ϕ — коэффициент теплопотерь из пламенной зоны;

T_0 — температура окружающего воздуха, К;

i_ψ — удельная энтальпия продуктов испарения или газификации горючего вещества, Дж/кг;

T_f — средняя температура газовой смеси, выходящей из пламенной зоны, К;

T_{w0} — начальная температура воды, К;

χ — массовая доля расходов воды ($G_{fw} + G_{sw}$), которая поступает в пламенную зону, попадет на поверхность горючего вещества и, превращаясь в водяной пар, образует на поверхности паровую пленку;

Q_w — удельная теплота парообразования воды, Дж/кг.

Теплофизические механизмы тушения тонкораспыленной водой

Рассмотрим два механизма тушения, способствующих прекращению горения в пламенной зоне:

1) достижение такого значения массовой концентрации водяного пара, при котором достигается нижний концентрационный предел горения горючей газовой смеси (флегматизация);

2) охлаждение горючей газовой смеси в пламенной зоне путем испарения воды до температуры вспышки горючих паров.

Остальные механизмы охлаждения (охлаждение поверхности горючего вещества путем испарения воды на поверхности до температуры вспышки горючих паров; охлаждение поверхности горючего вещества за счет уменьшения плотности лучистого теплового потока от пламенной зоны, обусловленного охлаждением ее водой до температуры вспышки горючих паров; прекращение процессов испарения или пиролиза горючего вещества за счет образования пленки водяного пара на его поверхности) будут рассмотрены в последующих работах.

В первом приближении рассмотрим «квазистационарные» условия тепломассообмена, при которых параметры внутри пламенной зоны постоянны:

$$\frac{d(\rho_m V_f c_{pf} T_m)}{d\tau} = 0;$$

$$\frac{d(\rho_m V_f)}{d\tau} = 0.$$

$$\text{Действительно, в уравнении (3) } \frac{d(\rho_m V_f c_{pf} T_m)}{d\tau} = 0;$$

так как $c_{pf} \approx \text{const}$, объем пламенной зоны V_f по времени изменяется несущественно («квазистационарные» условия) и в соответствии с уравнением состояния для смеси идеальных газов $\rho_m T_m = p_m / R_m \approx \text{const}$, поскольку давление в пламенной зоне p_m и газовая постоянная смеси газов R_m практически не изменяются [15].

Для определения расхода газовой смеси в конвективной колонке, образующейся над поверхностью горючего вещества, в случае отсутствия тушения используем формулу [16]:

$$G_k = 0,032 \left(\frac{Q_f (1 - \phi)}{1000} \right)^{3/5} z_f, \quad (4)$$

где G_k — суммарный расход газовой смеси, выходящей из пламенной зоны при отсутствии тушения водой, кг/с;

z_f — высота пламенной зоны, м;

$$z_f = 0,166 \left(\frac{Q_f (1 - \phi)}{1000} \right)^{2/5}.$$

Оценка времени испарения капель воды в пламенной зоне

Для оценки массовой доли капель воды, превратившихся в пар, необходимо оценить время полного испарения одной капли.

В работах [17–21] при исследовании образования сферического ламинарного пограничного слоя на поверхности движущейся в воздухе капли воды получена формула расчета продолжительности ее полного испарения τ_Σ (с):

$$\tau_\Sigma = \frac{q_s \rho_w r_0^2}{2\lambda_a (T_f - T_s)}, \quad (5)$$

где q_s — удельная теплота парообразования воды, Дж/кг;

ρ_w — плотность воды, кг/м³;

r_0 — начальный радиус капли воды, м;

λ_a — удельный коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

T_f — температура пламени, К;

T_s — температура кипения воды, К.

Характерное время нахождения водяной капли в пламенной зоне τ_f (с) можно оценить по выражению:

$$\tau_f \approx \frac{z_f \rho_k S_k}{G_k}, \quad (6)$$

где ρ_k — средняя плотность газовой смеси, выходящей из пламенной зоны, кг/м³;

S_k — площадь поперечного сечения конвективной колонки на высоте пламенной зоны в случае отсутствия тушения, м².

Характерное время нахождения водяной капли в пламенной зоне оценивалось с помощью уравнения (6) с использованием соотношения (4) для условий проведения экспериментов [11] при тушении тонкораспыленной водой бензина, дизельного топлива и н-гептана в металлической горелке диаметром $D = 0,5$ м, оно составило $\tau_f = 0,67$ с.

На рис. 3 представлена зависимость времени полного испарения капли воды от ее начального радиуса (формула (5)) при $T_f = 700$ °С и $T_s = 100$ °С. Из рис. 3 видно, что в пламенной зоне при условии $\tau_\Sigma \leq \tau_f$ полностью испаряются капли воды радиусом менее 90 мкм.

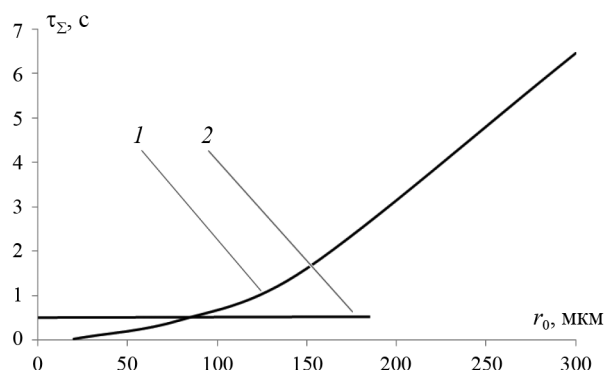


Рис. 3. Зависимость времени полного испарения капли воды от ее начального радиуса: 1 — в соответствии с уравнением (5); 2 — время нахождения капли в пламенной зоне

Fig. 3. Dependence of the time of complete evaporation of water on its initial radius: 1 — pursuant to equation (1); 2 — the time period when the drop is in the flame zone

Механизм 1.

Достижение значения массовой концентрации водяного пара, при котором достигается нижний концентрационный предел горения горючей газовой смеси (флегматизация)

Выражение для расчета среднеобъемной массовой концентрации паров воды в пламенной зоне может быть получено из формулы (3), если в нее подставить соотношение для удельной массовой теплоемкости газовой смеси в виде:

$$c_{pf} = X_w c_{pwg} + (1 - X_w) c_{pa}, \quad (7)$$

где X_w — среднеобъемная массовая концентрация паров воды в пламенной зоне;

c_{pwg} — удельная массовая теплоемкость воды в газовой фазе, Дж/(кг·К).

В выражении (7) принято, что теплоемкость газовой смеси в конвективной колонке в случае отсутствия тушения водой близка к значению для чистого воздуха [15].

Тогда среднеобъемная массовая концентрация паров воды в пламенной зоне находится из следующей формулы:

$$X_w = \frac{Q_f (1 - \phi) + c_{pa} T_0 (G_a + G_{aw}) + i_\psi \Psi - d(\rho_m V_f T_m) / d\tau + (c_{pwl} T_{w0} - \chi Q_w) (G_{fw} + G_{sw})}{G_{kw} T_f} - c_{pa} \quad (8)$$

Выполним расчет среднеобъемной массовой концентрации паров воды в пламенной зоне с использованием формулы (8) для условий экспериментов, описанных в [22].

Принимаем наиболее благоприятный для тушения случай, когда вся масса тонкораспыленной

воды, подаваемой на тушение, поступает в пламенную зону и превращается в пар. Тушение произойдет, когда среднеобъемная массовая концентрация паров воды достигнет значения $X_w = 0,21$. Диаметр металлической горелки с налитой горючей жидкостью $D = 0,5$ м.

Тогда расход воды на тушение, необходимый для флегматизации смеси, в соответствии с выражением (8) для различных ГЖ составит [12]:

- бензин ($Q_r = 43,2$ МДж/кг; $\psi = 0,0585$ кг/(с·м²)): $G_w = 1,55$ кг/с; $J_w = 7,9$ кг/(с·м²);
- дизельное топливо ($Q_r = 45,4$ МДж/кг; $\psi = 0,0425$ кг/(с·м²)): $G_w = 1,18$ кг/с; $J_w = 6$ кг/(с·м²);
- н-гептан ($Q_r = 45,1$ МДж/кг; $\psi = 0,012$ кг/(с·м²)): $G_w = 0,33$ кг/с; $J_w = 1,7$ кг/(с·м²);

где J_w — интенсивность подачи ОТВ, кг/(с·м²); $J_w = G_w/(\pi D^2/4)$.

Таким образом, минимальная расчетная интенсивность подачи воды на тушение этих ГЖ изменяется в диапазоне $J_w = 1,7...7,9$ кг/(с·м²).

Результаты экспериментов [22] показали, что критическая интенсивность подачи воды на тушение вышеуказанных ГЖ лежит в диапазоне $J_{cr} \approx 0,04...0,12$ кг/(с·м²) при расходе воды $G_w^{exp} \approx 0,0079...0,0236$ кг/с.

Таким образом, расчетный расход воды на тушение по механизму 1 более чем в 14 раз превышает экспериментальный расход, поэтому на практике этот механизм оказывается неэффективным при тушении в пламенной зоне. Однако при подаче воды вне зоны горения в замкнутом помещении данный механизм тушения является основным.

Механизм 2.

Охлаждение горючей газовой смеси в пламенной зоне за счет испарения воды до температуры вспышки горючих паров

Принимаем наиболее благоприятный для тушения случай, при котором вся масса тонкораспыленной воды поступает в пламенную зону и превращается в пар. Тушение произойдет, когда температура в пламенной зоне станет ниже температуры вспышки газовой смеси.

Расход воды, требуемый на тушение с использованием механизма 2, можно получить из решения уравнения (3) при $\frac{d(\rho_m V_f c_{pf} T_m)}{d\tau} = 0$:

$$Q_f(1-\varphi) + c_{pa} G_{kw}(T_0 - T_f) - Q_w G_w = 0. \quad (9)$$

Принимаем, что $T_f = T_b$, где T_b — температура вспышки, °С.

Тогда из уравнения (9) находим расход воды, требуемый на тушение при использовании механизма 2:

$$G_w = \frac{Q_f(1-\varphi) + c_{pa} G_{kw}(T_0 - T_b)}{Q_w}. \quad (10)$$

Принимаем температуру вспышки для бензина и дизельного топлива $T_b = -40$ °С, для н-гептана — $T_b = -4$ °С.

Расход тонкораспыленной воды и интенсивность ее подачи, необходимые для снижения температуры в пламенной зоне до температуры вспышки газовой смеси, составят:

- бензин и дизельное топливо: $G_w = 0,042$ кг/с; $J_w = 0,053$ кг/(с·м²);
- н-гептан: $G_w = 0,017$ кг/с; $J_w = 0,021$ кг/(с·м²).

Из результатов экспериментов [22] следует, что критическая интенсивность подачи воды на тушение вышеуказанных ГЖ лежит в диапазоне $J_{cr} \approx 0,04...0,12$ кг/(с·м²) при расходе воды $G_w^{exp} \approx 0,0079...0,0236$ кг/с.

Отсюда можно сделать вывод, что механизм 2 в отдельных случаях может привести к тушению пламени. Однако при выполнении условия

$$\frac{d(\rho_m V_f c_{pf} T_m)}{d\tau} = 0 \text{ он не объясняет наличия двой-}$$

ственного характера процесса тушения [20], при котором повышение интенсивности подачи воды до значения, превышающего критическое, приводит к увеличению времени тушения.

Фотосъемка процесса тушения бензина, дизельного топлива и н-гептана (см. рис. 2) показывает, что в начальный момент подачи тонкораспыленной воды объем пламенной зоны резко увеличивается [22] — более чем в 2 раза.

Выполним оценку влияния увеличения объема пламенной зоны на среднюю температуру в ней.

Решая уравнение (3), с учетом того, что для идеальных газов

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho_m V_f c_{pf} T_m)}{d\tau} &= V_f c_{pf} \frac{d(\rho_m T_m)}{d\tau} + \\ &+ \rho_m c_{pf} T_m \frac{d(V_f)}{d\tau} \approx \rho_0 c_{pa} T_0 \frac{dV_f}{d\tau}, \end{aligned}$$

где ρ_0 — плотность окружающего воздуха, кг/м³, вместо уравнения (9) получаем следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \rho_0 c_{pa} T_0 \frac{dV_f}{d\tau} &= \\ &= Q_f(1-\varphi) + c_{pa} G_{kw}(T_0 - T_f) - Q_w G_w. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда из уравнения (11) выведем выражение для средней температуры пламенной зоны T_f без подачи воды на тушение:

$$T_f = T_0 + \frac{Q_f(1-\varphi) - \rho_0 c_{pa} T_0 \frac{dV_f}{d\tau}}{c_{pa} G_{kw}}. \quad (12)$$

Снижение средней температуры пламенной зоны за счет увеличения объема выражается формулой

$$\bar{T}_f = \frac{T_0 + Q_f(1-\varphi)/(c_{pa}G_{kw})}{T_0 + \frac{Q_f(1-\varphi) - \rho_0 c_{pa} T_0 (dV_f/d\tau)}{c_{pa}G_{kw}}}, \quad (13)$$

где \bar{T}_f — безразмерная температура, $\bar{T}_f = \frac{T_f}{T_{fV}}$;
 T_f — температура при $V = \text{const}$;
 T_{fV} — температура при $V \approx \text{const}$.

На основании экспериментальных данных [23] (см. рис. 2) принимаем, что объем пламенной зоны увеличивается в 2 раза за 0,885 и 1 с. Из уравнения (13) получим соответственно: $\bar{T}_f = 3,6$ и $\bar{T}_f = 2,8$.

Таким образом, если средняя температура пламенной зоны н-гептана $T_f = 973$ К, то увеличение объема этой зоны приведет к снижению средней температуры в ней, соответственно, до $T_{fV} = 269,0$ К (или -4 °С) (температура вспышки) и $T_{fV} = 347,5$ К (или $74,5$ °С).

Существенное снижение средней температуры пламенной зоны влечет за собой значительное уменьшение плотности теплового потока, падающего на поверхность горючего материала и, как

следствие, уменьшение скорости испарения жидкости. Поэтому объем пламенной зоны начнет сокращаться (двойственный характер тушения [23]), в том числе за счет постепенного вытеснения пламени слоем водяного пара.

Следовательно, механизм 2 может объяснить наблюдаемый в экспериментах двойственный характер тушения.

Заключение

В результате теоретического исследования предложены уравнения законов сохранения массы и энергии для пламенной зоны с учетом поступления в нее струи тонкораспыленной воды. Проведены расчеты расходов воды, необходимых для реализации различных механизмов тушения. Полученные расчетные значения сопоставлены с результатами экспериментов по тушению модельных очагов горения горючих жидкостей. Расчетная оценка механизмов тушения горючих жидкостей тонкораспыленной водой позволила теоретически обосновать двойственный характер данного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешков М.В., Гусев И.А. Обеспечение технологии пожаротушения в замкнутых объемах помещений объектов энергетики // Системы безопасности : мат. 26-й Междунар. науч.-практ. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2017. С. 176–179. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32292947>
2. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Кузнецов А.Е., Федоткин Д.В., Москвитин Е.А., Стрижак П.А., Карпов В.Н. Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // Пожарная безопасность. 2015. № 2. С. 49–55.
3. Гергель В.И., Мешалкин Е.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой высокого давления // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 3. С. 45–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.45-49
4. Кожин С. Тушение тонкораспыленной водой электрооборудования, находящегося под напряжением // Безопасность. Достоверность. Информация. 2008. № 79. С. 46–47.
5. Гергель В.И., Мешалкин Е.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой // Материалы XXIX Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Часть 2. Горение и проблемы тушения пожаров. М. : ВНИИПО, 2017. С. 369–372. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29942838>
6. Мешман Л.М. Частные вопросы при проектировании водяных АУП // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 1. С. 80–88. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/741>
7. Войтков И.С., Волков Р.С., Высокоморная О.В., Чернова Г.А., Фадеев А.В. Экспериментальное исследование температурных следов капель воды, водных массивов и аэрозольных потоков, движущихся через высокотемпературные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 8. С. 17–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.17-26
8. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Legros J.C., Strizhak P.A. Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 95. Pp. 184–197. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.001
9. Zhang Qinglin, Wang Lu, Bi Yixing, Xu Dajun, Zhi Huiqiang, Qiu Peifang. Experimental investigation of foam spread and extinguishment of the large-scale methanol pool fire // Journal of Hazardous Materials. 2015. Vol. 287. Pp. 87–92. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.01.017

10. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. М. : АН СССР, 1961. 208 с.
11. Шароварников А.Ф., Корольченко Д.А. Тушение горючих жидкостей распыленной водой // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. Т. 22. № 11. С. 70–74. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20655296>
12. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф., Дегаев Е.Н. Горение гептана в модельном резервуаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 2. С. 67–70. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/363>
13. Снегирев А.Ю., Сажин С.С., Талалов В.А. Модель и алгоритм расчета теплообмена и испарения капель диспергированной жидкости // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2011. № 1. С. 44–55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-i-algoritm-rascheta-teploobmena-i-ispareniya-kapel-dispergirovannoy-zhidkosti>
14. Корольченко Д.А., Громовой В.Ю., Ворогушин О.О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Вестник МГСУ. 2011. № 1–2. С. 331–335.
15. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
16. NFPA 92B. 1990 NFPA Technical Committee Reports — Technical Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas. Quincy, MA : National Fire Protection Association, 1990.
17. Емельянов А.Л., Платунов Е.С. Кинетика испарения капель в системах охлаждения теплонагруженных элементов приборов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 1. С. 84–88. URL: http://pribor.ifmo.ru/ru/article/5552/kinetika_ispareniya_kapelv_sistemah_ohlazhdeniyateplonagruzhennyh_elementov_priborov.htm
18. Yoshida A., Kashiwa K., Hashizume S., Naito H. Inhibition of counterflow methane/air diffusion flame by water mist with varying mist diameter // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 71. Pp. 217–225. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.030
19. Laufer J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow // NACA Report 1174. 1954. Pp. 417–434. URL: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/1954/naca-report-1174.pdf>
20. Gueldenbecher D.R., Sojka P.E. Experimental investigation of aerodynamic fragmentation of liquid drops modified by electrostatic surface charge // Atomization and Sprays. 2011. Vol. 21. No. 2. Pp. 139–147. DOI: 10.1615/AtomizSpr.2011003299
21. Kennedy M.J., Conroy M.W., Dougherty J.A., Otto N., Williams B.A., Ananth R., Fleming J.W. Bubble coarsening dynamics in fluorinated and non-fluorinated firefighting foams // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2015. Vol. 470. Pp. 268–279. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.01.062
22. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Универсальность механизмов тушения пламени различными огнетушащими веществами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 11. С. 84–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/universalnost-mehanizmov-tusheniya-plameni-razlichnymi-ognetushashimi-veschestvami>
23. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Анализ двойственного механизма тушения пламени // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23, № 12. С. 59–68. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-dvoystvennogo-mehanizma-tusheniya-plameni>

REFERENCES

1. Aleshkov M.V., Gusev I.A. Ensuring technology of fire extinguishing in the closed power engineering facilities. *Security Systems : Materials of the 26th International Scientific and Practical Conference*. Moscow, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia, 2017; 176–179. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32292947> (rus).
2. Kopylov N.P., Khasanov I.R., Kuznetsov A.E., Fedotkin D.V., Moskvilin E.A., Strizhak P.A., Karpov V.N. Parameters of water dumping by airplanes during forest fire suppression. *Fire Safety*. 2015; 2:49–55. (rus).
3. Gergel V.I., Meshalkin E.A. Fire extinguishing by finely-dispersed water of high pressure. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(3):45–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03. 45–49 (rus).
4. Kozhinov S. Extinguishing electrical equipment under voltage with water mist. *Safety. Credibility. Information*. 2008; 79:46–47. (rus).

5. Gergel V.I., Meshalkin E.A. Fire extinguishing with water mist. *Materials of the XXIX International Scientific and Practical Conference dedicated to the 80th anniversary of the Federal State-Financed Establishment All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters. Part 2. Combustion and problems of extinguishing fires*. Moscow, VNIPO Publ., 2017; 369-372. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29942838> (rus).
6. Meshman L.M. Special issues on design water AFEI. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(1):80-88. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/741> (rus.)
7. Voytkov I.S., Volkov R.S., Vysokomornaya O.V., Chernova G.A., Fadeev A.V. Experimental study of temperature traces of water droplets, water flow masses and aerosol flows moving through high-temperature combustion products. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(8):17-26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.17-26 (rus).
8. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Legros J.C., Strizhak P.A. Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 95:184-197. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.001
9. Zhang Qinglin, Wang Lu, Bi Yixing, Xu Dajun, Zhi Huiqiang, Qiu Peifang. Experimental investigation of foam spread and extinguishment of the large-scale methanol pool fire. *Journal of Hazardous Materials*. 2015; 287:87-92. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.01.017
10. Blinov V.I., Khudyakov G.N. *Diffusion burning of liquids*. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 1961; 208. (rus).
11. Sharovarnikov S.A., Korolchenko D.A. Extinguishing of combustible liquid by atomized water. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(11):70-74. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20655296> (rus).
12. Korolchenko D.A., Degaev E.N., Sharovarnikov A.F. Combustion of heptane in a model tank. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(2):67-70. URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/363> (rus).
13. Snegirev A.Yu., Sazhin S.S., Talalov V.A., Snegirev A.Yu., Sazhin S.S., Talalov V.A. Model and algorithm of estimate of heat transfer and evaporation of dispersed liquid's drops. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2011; 1:44-55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-i-algoritm-rascheta-teploobmena-i-ispareniya-kapel-dispergirovannoy-zhidkosti> (rus).
14. Korolchenko D.A., Gromovoy V.U., Vorogushin O.O. Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems. *Vestnik MGSU*. 2011; 1-2:331-335. (rus).
15. Puzach S.V. *Methods for calculating heat and mass transfer during a fire at the premises and their application in solving practical fire and explosion safety problems*. Moscow, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia Publ., 2005; 336. (rus).
16. *NFPA 92B. 1990 NFPA Technical Committee Reports — Technical Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 1990.
17. Emeljanov A.L., Platunov E.S. Vaporization kinetics of drops in cooling system of instrument component under high density of heat flow. *Journal of Instrument Engineering*. 2011; 54(1):84-88. URL: http://pribor.ifmo.ru/ru/article/5552/kinetika_ispareniya_kapelv_sistemah_ohlazhdeniyateplo-nagruzhennyh_elementov_priborov.htm (rus).
18. Yoshida A., Kashiwa K., Hashizume S., Naito H. Inhibition of counterflow methane/air diffusion flame by water mist with varying mist diameter. *Fire Safety Journal*. 2015; 71:217-225. DOI: 10.1016/j.fire-saf.2014.11.030
19. Laufer J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. *NACA Report 1174*. 1954; 417-434. URL: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/1954/naca-report-1174.pdf>
20. Guildenbecher D.R., Sojka P.E. Experimental investigation of aerodynamic fragmentation of liquid drops modified by electrostatic surface charge. *Atomization and Sprays*. 2011; 21(2):139-147. DOI: 10.1615/AtomizSpr.2011003299
21. Kennedy M.J., Conroy M.W., Dougherty J.A., Otto N., Williams B.A., Ananth R., Fleming J.W. Bubble coarsening dynamics in fluorinated and non-fluorinated firefighting foams. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015; 470: 268-279. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.01.062
22. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F. Universality of mechanisms of fire suppression by various extinguishing agents. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(11):84-88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/universalnost-mehanizmov-tusheniya-plameni-razlichnymi-ognetushaschimi-veschestvami> (rus).

23. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F. Analysis of the dual fire suppression mechanism. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(12):59-68. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-dvoystvennogo-mehanizma-tusheniya-plameni> (rus).

*Поступила 13.01.2021, после доработки 12.02.2021;
принята к публикации 16.02.2021*

*Received January 13, 2021; Received in revised form February 12, 2021;
Accepted February 16, 2021*

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: pzachsv@mail.ru

Information about the authors

Dmitriy A. KORLCHENKO, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru