

УДК 614.844.2+614.842.612

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АМФИФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ВОДЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЖАРОТУШАЩЕГО ВОДЯНОГО ТУМАНА

Пахомов Георгий Борисович, Елфимова Марина Владимировна, Тужиков Евгений Николаевич
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В последние десятилетия технологии объемного тушения с использованием водяного тумана активно развиваются. Это обусловлено как прогрессом в разработке методов создания высококонцентрированных высокодисперсных водяных туманов (ВВТ), так и очевидными преимуществами применения ВВТ в качестве средства объемного пожаротушения. Повышение устойчивости ВВТ путем образования монослоя на поверхности капель при добавлении в распыляемую воду небольших количеств амфифильных соединений, таких как высшие жирные насыщенные спирты и их производные (ВЖС), является актуальной задачей. Настоящая работа посвящена нахождению аналитического выражения для определения оптимальной концентрации ВЖС в распыляемой водной эмульсии, которая обеспечивает образование монослоя на каплях и повышает стабильность получаемого ВВТ.

Ключевые слова: высокодисперсный водяной туман, устойчивость тумана, объемное пожаротушение, амфифильные соединения, концентрация водной эмульсии, монослой

Для цитирования: Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Определение оптимальной концентрации амфифильных соединений в воде для повышения устойчивости пожаротушающего водяного тумана // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 46–56.

DETERMINATION OF THE OPTIMAL CONCENTRATION OF AMPHIPHILIC COMPOUNDS IN WATER TO INCREASE THE STABILITY OF FIRE-EXTINGUISHING WATER MIST

Georgy B. Pakhomov, Marina V. Elfimova, Evgeniy N. Tuzhikov
Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. In recent decades, volumetric extinguishing technologies using water mist have been actively developing. This is due to both progress in the development of methods for creating highly concentrated, highly dispersed water mists (HWM) and the obvious advantages of using HWM as a means of volumetric fire extinguishing. Increasing the stability of HWM by forming a monolayer on the droplet surface when adding small amounts of amphiphilic compounds, such as higher fatty saturated alcohols and their derivatives (HFA), to the atomized water is an urgent

task. This work is devoted to finding an analytical expression for determining the optimal concentration of HFA in sprayable water emulsion, which ensures the formation of a monolayer on the droplets and the maximum stability of the obtained HWM.

Keywords: highly dispersed water mist, mist stability, volumetric fire extinguishing, amphiphilic compounds, water emulsion concentration, monolayer

For Citation: Pakhomov G. B., Elfimova M. V., Tuzhikov E. N. Determination of the optimal concentration of amphiphilic compounds in water to increase the stability of fire-extinguishing water mist // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 45–57.

Введение

За последние годы объемное тушение водяным туманом получило широкое распространение. Это связано как с развитием технологий создания высококонцентрированного высокодисперсного водяного тумана (далее — ВВТ), так и с несомненными преимуществами его применения в качестве пожаротушащего агента при объемном пожаротушении [1–5].

Вода продолжает оставаться самым доступным и экологичным огнетушащим веществом. При использовании ВВТ задействуются все основные механизмы прекращения горения. ВВТ демонстрирует газообразное поведение и позволяет эффективно тушить «скрытые», в т. ч. и тлеющие, очаги горения; при этом минимизируется возможный ущерб от воздействия воды. Применение ВВТ исключает необходимость эвакуации до начала работы системы пожаротушения.

Минимальная концентрация ВВТ в объеме помещения, при которой достигается тушение, может составлять от 100 г/м³ [1], это наименьшая величина среди известных огнетушащих веществ. Так, например, минимальная пожаротушащая концентрация фреонов — 430 г/м³.

Среди существующих и разрабатываемых технологий объемного тушения с помощью

водяного тумана можно выделить три основных направления, различающихся как способами технической реализации, так и дисперсностью получаемого ВВТ.

Системы тушения высокого давления используют однофазное распыление воды через специальные форсунки при давлении от 7 МПа. Давление, чаще всего, создается жидкостными насосами высокого давления. Дисперсность ВВТ находится в пределах от ~10 до ~60 мкм [5].

Гибридные системы пожаротушения используют двухфазное распыление, при котором высокоскоростным потоком инертного газа (преимущественно азота) диспергируется вода с образованием ВВТ. Дисперсность ВВТ находится в пределах от ~5 до ~40 мкм [3, 4].

Ультразвуковое распыление воды для целей объемного пожаротушения осуществляется с помощью ультразвуковых колебаний, которые воздействуют на слой воды с частотой до 3 МГц [1, 2]. Генерируемый ВВТ характеризуется наиболее высокой дисперсностью и однородностью в распределении капель по размеру среди перечисленных технологий диспергирования воды. Дисперсность ВВТ находится в пределах от ~1 до ~20 мкм.

Создание и поддержание высоких концентраций ВВТ, необходимых для эффективного применения объемных методов пожа-

ротушения, сопряжено со значительными трудностями. Например, при увеличении концентрации тумана скорость его разрушения также быстро возрастает [1, 6]. Для того чтобы полностью ликвидировать горение, особенно тлеющее, необходимо поддерживать концентрацию тумана на уровне, превышающем огнетушащую концентрацию в течение довольно длительного времени [1].

Стабильность и противоположенное явление — разрушение ВВТ зависят от взаимодействия множества процессов, включая испарение, конденсацию, коагуляцию, коалесценцию и седиментацию в дисперсной фазе. Применительно к объемному пожаротушению увеличение устойчивости плотного (высококонцентрированного) тумана свидетельствует о замедлении этих процессов при относительной влажности окружающего воздуха — 100 %.

Объемное пожаротушение высокодисперсным водяным туманом демонстрирует значительные преимущества в условиях, требующих защиты от огня с минимизацией вторичного ущерба. Технологии, направленные на повышение дисперсности, концентрации и устойчивости тумана, играют ключевую роль в успешном развитии и применении данных систем.

Процессы испарения, конденсации и коалесценции влияют на устойчивость водяного тумана, и повышение этой устойчивости возможно через замедление указанных процессов, протекающих при 100%-й относительной влажности.

Конденсированные пленки, иначе называемые монослоями, которые образуются на поверхности воды, снижают скорость испарения во много раз или даже на несколько порядков. Монослои определяются как поверхностные пленки толщиной эквивалент-

ной одной молекуле, которые покрывают всю поверхность воды. Монослои образуются органическими амфифильными молекулами, такими как высшие жирные насыщенные спирты и их производные (далее — ВЖС) [7, 8].

Органические амфифильные соединения состоят из двух разнородных частей. Одна часть гидрофильна и полярна, часто называется «головкой». Остальная часть молекулы гидрофобна и состоит из длинной насыщенной алкановой цепи, обычно называемой «хвост». В случае если хвост проявляет выраженные гидрофобные свойства, соединение становится нерастворимым. При достаточной концентрации амфифильные молекулы на поверхности воды формируют сплошной мономолекулярный слой, в котором они ориентируются перпендикулярно поверхности воды. Этот слой действует как полупроницаемый барьер вокруг капли и снижает как скорость ее испарения, так и, согласно принципу микроскопической обратимости, скорость конденсации паров из окружающей атмосферы [9].

На рис. 1 приведено схематическое изображение монослоя ВЖС на поверхности капли воды. Гидрофильные головки молекул ВЖС находятся в поверхностном слое капли, углеводородные хвосты молекул развернуты наружу и перпендикулярны поверхности воды.

Одновременное протекание испарения и конденсации воды в ВВТ называется переконденсацией — процесс испарения мелких капель, приводящий к последующей конденсации паров на более крупных каплях при относительной влажности окружающего воздуха 100 %. Это явление объясняется тем, что мелкие капли обладают большей кривизной поверхности по сравнению с крупными каплями, следовательно, давление насыщенного пара над мелкими каплями больше, чем над крупными.

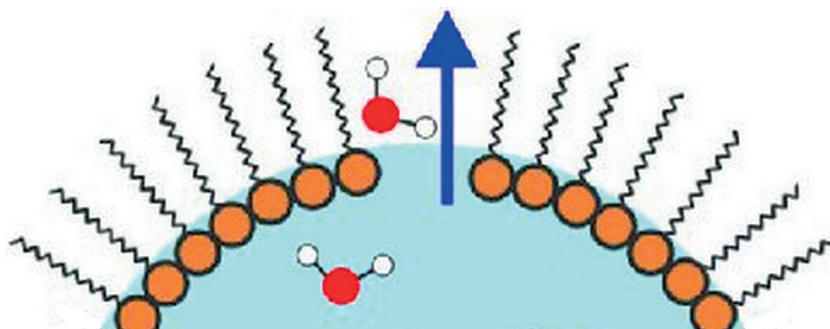


Рис. 1. Схематическое изображение монослоя ВЖС на поверхности капли воды

Fig. 1. Schematic illustration of a monolayer of HFA on the surface of a water droplet

Эти явления приводят к быстрому уменьшению мелких и увеличению крупных капель, особенно в плотном тумане. Увеличение размера крупных капель приводит к значительному повышению интенсивности других процессов, включая седиментацию, коагуляцию и коалесценцию, которые в конечном итоге способствуют разрушению ВВТ.

Следует указать, что монослой может выступать и как механическое препятствие, затрудняющее слияние капель и их захват ограждающими конструкциями. Это объясняется тем обстоятельством, что между однородными хвостами амфифильных молекул действуют взаимные силы отталкивания.

Процессы переконденсации и коалесценции тем интенсивней, чем ближе капли находятся друг к другу [10]. Таким образом, формирование монослоя на каплях ВВТ может радикально повысить устойчивость высококонцентрированного водного тумана, что особенно значимо для целей объемного пожаротушения.

Предыдущими исследованиями установлено, что увеличение длины углеродной цепи или хвоста ВЖС с $n = 12$ до $n = 18$ снижает коэффициент испарения воды, покрытой монослоем ВЖС в ~ 300 раз [9].

Все амфифильные соединения, образующие на поверхности воды монослой и обеспечивающие наиболее значительное уменьшение коэффициента испарения воды, при нормальных условиях являются твердыми и нерастворимыми в воде веществами. Для формирования монослоя на каплях ВВТ необходимо обеспечить равномерное распределение ВЖС по всему объему распыляемой воды. Это достигается путем эмульгирования ВЖС в водной среде, что является в настоящее время единственным доступным методом распределения ВЖС в воде применительно к целям объемного пожаротушения.

Стабильность получаемых, в т. ч. с применением эмульгаторов, водных эмульсий ВЖС подтверждена экспериментальными исследованиями [7, 11, 12].

В нашей предыдущей работе приведены результаты определения оптической плотности ВВТ в зависимости от времени [7]. При возрастании концентрации ВЖС в распыляемой эмульсии и продолжительности поддержания заданной концентрации ВВТ в испытательной камере, стабильность ВВТ повышается благодаря формированию мономолекулярного слоя на поверхности капель. Максимальное повышение устойчивости по сравнению с водой составило 2,3 раза. Дальнейшее повышение устойчи-

ности ВВТ возможно с повышением концентрации ВЖС в распыляемой эмульсии [7].

Нами не было найдено сведений о других работах, направленных на повышение стабильности высококонцентрированных водяных туманов в макрообъемах, применимых для объемного пожаротушения с помощью монослоев ВЖС. Также ранее не проводилось определение необходимой концентрации ВЖС в эмульсии для различных способов ее распыления.

Результаты и их обсуждение

Обозначения и исходные данные:

s — площадь, занимаемая каждой молекулой ВЖС на поверхности воды, м^2 ;

d_0 — начальные диаметры капель воды в ВВТ после распыления, м ;

d_k — диаметры капель воды в ВВТ после испарения и образования монослоя, м ;

C_m — молярная концентрация ВЖС в воде, $\text{ммоль (моль/м}^3\text{)}$;

N — количество молекул ВЖС в капле ВВТ;

A_B — число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$);

n — длина углеродной цепи ВЖС.

Обозначим граничные условия и основные параметры для определения необходимой и достаточной концентрации ВЖС в распыляемой эмульсии.

Как известно из предыдущих исследований, при диспергировании эмульсии с концентрацией, недостаточной для фор-

мирования монослоя, все молекулы ВЖС концентрируются на поверхности образующихся капель. При испарении и уменьшении размера капли, на ее поверхности образуется полностью насыщенный мономолекулярный слой ВЖС (см. рис. 1), при этом скорости испарения и конденсации воды резко уменьшаются [9].

При плотной упаковке молекул ВЖС на поверхности воды площадь, занимаемая каждой молекулой (s), должна быть примерно постоянной, т. к. гидрофильные функциональные группы молекул ВЖС одинаковы или имеют сходное строение.

В работах [8, 9, 13] приводятся экспериментальные данные по начальным диаметрам исследуемых капель воды (d_0) и молярным концентрациям в них ВЖС (C_m). Конечные диаметры после испарения части воды из капель (d_k) соответствуют моменту, когда происходит образование монослоя, о чем свидетельствует резкое уменьшение коэффициента испарения воды.

Из вышеприведенного следует, что количество молекул ВЖС (N), находящихся в исходной (до начала ее испарения) капле с диаметром (d_0) (1), должно быть равно количеству молекул, образующих монослой, (N) при диаметре капли (d_k) (2). Нижеприведенные формулы выражают это равенство, где A_B — число Авогадро.

После приравнивания и преобразования формул (1) и (2) получаем формулу (3).

$$N = \frac{\pi d_0^3 A_B C_m}{6} \quad (1)$$

$$N = \frac{\pi d_k^2}{s} \quad (2)$$

$$\frac{d_k^2}{d_0^3} = \frac{A_B s C_m}{6} \quad (3)$$

Из (3) следует, что отношение d_k^2/d_0^3 прямо пропорционально молярной концентрации (C_m) и площади, занимаемой каждой молекулой ВЖС в монослое, (s).

На основании экспериментальных данных, приведенных в [8, 9, 13], постро-

им зависимость отношения d_k^2/d_0^3 от молярной концентрации ВЖС (C_m).

На рис. 2 приведена эта зависимость для предельных высших жирных спиртов с длиной углеродной цепи от $n = 13$ до $n = 18$.

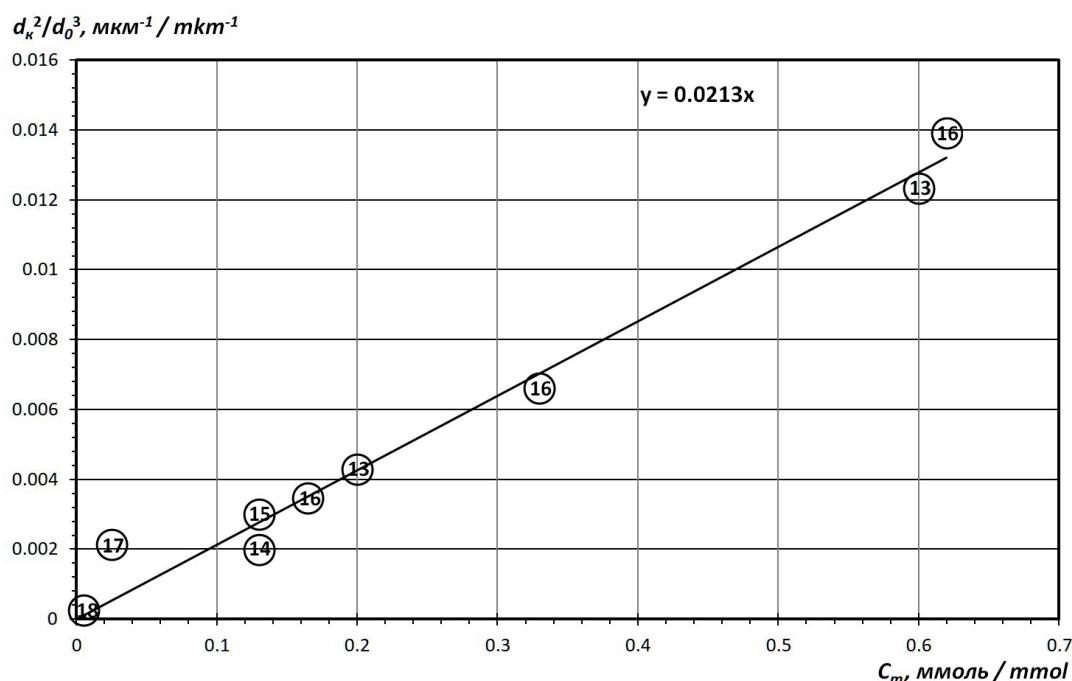


Рис. 2. Зависимость отношения d_k^2/d_0^3 от молярной концентрации ВЖС (C_m). Внутри маркеров, обозначающих экспериментальные значения, указана длина углеродной цепи конкретного ВЖС (n)

Fig. 2. Dependence of the ratio d_k^2/d_0^3 on the molar concentration of HFA (C_m). The length of the carbon chain of a specific alcohol is indicated inside the markers denoting experimental values (n)

Из данных рис. 2 следует, что все экспериментальные точки графика лежат вблизи одной прямой. Это обстоятельство подтверждает приведенные ранее выводы о нахождении всех молекул ВЖС на поверхности капель и о постоянстве площади молекул ВЖС в монослое. Некоторое несовпадение с прямой линией может быть обусловлено как погрешностью эксперимента, так и незначительной зависи-

мостью площади, занимаемой молекулой ВЖС в монослое, от температуры и длины цепи [14].

Из угла наклона прямой аппроксимирующей экспериментальные данные на рис. 2 и с учетом значения числа Авогадро (A_v) площадь, занимаемая каждой молекулой ВЖС в монослое (s), может быть вычислена по формуле (4), которая получена после преобразования формулы (3).

$$s = \frac{6 \cdot 0,0213 \cdot 10^6}{A_v} = 21,2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2. \quad (4)$$

Полученное значение для площади молекулы ВЖС в монослое $s = 21,2 \text{ Å}^2$ согласуется с другими литературными данными [9, 13, 14].

С увеличением концентрации ВЖС диаметр капли d_k , до которого при испарении и до момента образования монослоя уменьшается исходная капля диаметром d_0 ,

закономерно увеличивается. С учетом формулы (3) зависимость d_k от C_m для различных значений d_0 выражается формулой (5).

Имеется много репрезентативных диаметров капель, которые можно использовать для

характеристики различных способов распыления. Диаметр капли в спектре распыления, при котором 10 % объема жидкости, содержащейся в ВВТ, приходится на капли меньшего диаметра, обычно обозначается — $D_{v0.1}$.

$$d_k = \sqrt{\frac{A_B s C_m d_0^3}{6}}. \quad (5)$$

Способы распыления воды для объемного пожаротушения характеризуются как различной степенью дисперсности, так и распределением капель по размерам. Выберем три значения диаметров капель d_0 , которые примерно соответствуют $D_{v0.1}$ для указанных ранее способов распыления — 10, 5 и 3 мкм. Условием необходимой и достаточной кон-

центрации ВЖС в распыляемой эмульсии является равенство $d_k = d_0$, оно обозначает, что в начальной капле диаметром d_0 уже достаточно ВЖС для образования монослоя.

С помощью формулы (5) и определенной ранее площади молекулы в монослое (s) построим графики зависимостей d_k от C_m для выбранных значений d_0 (рис. 3).

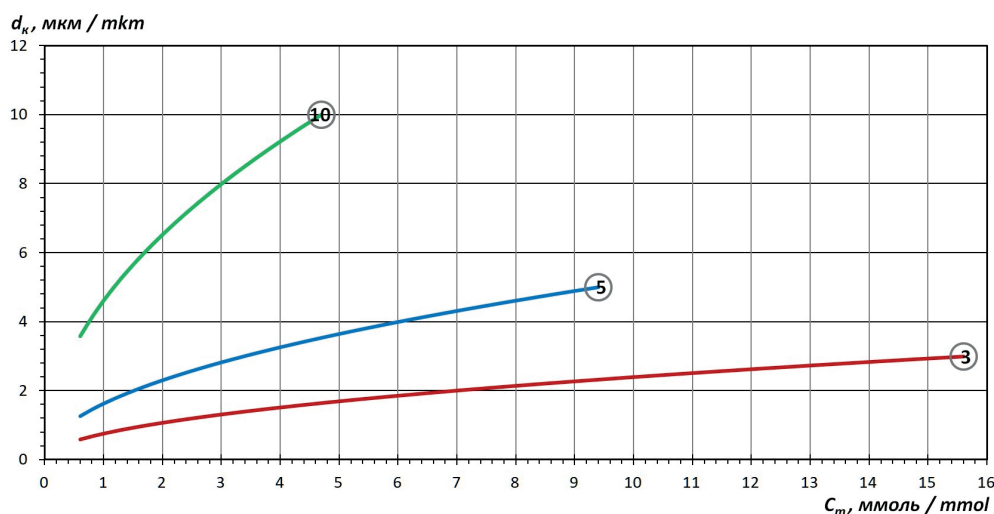


Рис. 3. Графики зависимостей d_k от C_m для выбранных значений d_0 . Маркеры обозначают значения d_k и C_m , при которых $d_k = d_0$

Fig. 3. Graphs of dependences of d_k on C_m for selected values of d_0 . Markers denote the values of d_k and C_m , at which $d_k = d_0$

С учетом равенства $d_k = d_0$ и формулы (3) выражение, определяющее необходимую и достаточную молярную концентрацию ВЖС (C_m), можно записать в виде (6).

В данном случае d_0 обозначает характеристичный диаметр, выбранный из начального участка известного спектра распределения капель по размерам в ВВТ.

$$C_m = \frac{6}{A_B s d_0}. \quad (6)$$

Полученная формула (6) обеспечивает простой расчет необходимой и достаточной для достижения высокой устойчивости ВВТ молярной концентрации ВЖС в распыляемой эмульсии при выбранном значении d_0 и определенной ранее площади молекулы в монослое (s). Другие способы выражения концентрации могут быть получены из указанной формулы при учете молекулярной массы ВЖС.

В работе [7] установлено, что ультразвуковое распыление эмульсии с молярной концентрацией ВЖС свыше ~ 1 ммоль трудноосуществимо для ультразвуковых колебаний с частотой более 1 МГц. Это обстоятельство объясняется повышением вязкости эмульсии с увеличением ее концентрации. Обойти это ограничение возможно путем нагрева распыляемой эмульсии [7] и/или применением методов ультразвукового распыления на более низких частотах [15]. Для других приведенных выше способов получения ВВТ увеличение вязкости эмульсии незначительно сказывается на процессе распыления.

Выводы

Из проведенного анализа технологий диспергирования воды для целей объемного пожаротушения сделан вывод об ак-

туальности проведения исследований, направленных на определение оптимальных концентраций амфифильных соединений в распыляемой эмульсии для достижения максимальной устойчивости ВВТ.

На основе анализа и обобщения литературных данных по влиянию концентрации ВЖС на размеры капель воды, при которых уже образуется монослой на поверхности капли, была определена площадь, занимаемая каждой молекулой ВЖС в монослое. С увеличением концентрации ВЖС диаметр капли, до которого при испарении и до момента образования монослоя должна уменьшиться исходная капля, закономерно увеличивается.

Построенная зависимость отношения диаметров капель воды в присутствии монослоя от концентрации ВЖС подтвердила опубликованные ранее выводы о нахождении всех молекул ВЖС на поверхности капель и о постоянстве площади молекул ВЖС в монослое. Эта площадь примерно одинакова для всех рассматриваемых амфифильных соединений.

В результате исследования получено аналитическое выражение, которое обеспечивает простой расчет необходимой и достаточной для достижения высокой устойчивости ВВТ концентрации ВЖС в распыляемой эмульсии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Долгопериодические автоколебательные процессы при тушении пламени высокодисперсным водяным туманом // Техносферная безопасность. 2023. № 4 (41). С. 37–48.
2. Experimental and Numerical Study of Fire Suppression Performance of Ultra-Fine Water Mist in a Confined Space / T. Liang et al. // Procedia Engineering. 2013. Vol. 52. pp. 208–213.

3. Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Сверхзвуковое распыление воды для объемного пожаротушения // Техносферная безопасность. 2023. № 2 (39). С. 58–71.
4. Механизм тушения пламени газовойдыными составами ультрадисперсного распыла / С. Н. Копылов [и др.] // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 67–71.
5. Husted B. Experimental measurements of water mist systems and implications for modelling in CFD : Doctoral Thesis. Lund, 2007. 125 p.
6. Мальгин Ю. В. Энергетика и дисперсность тумана, образованного ультразвуковым увлажнителем // С.О.К. 2020. № 3. С. 56–59.
7. Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Экспериментальное исследование повышения устойчивости высокодисперсного водяного тумана // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 78–89.
8. Miles R., Davies J., Reid J. The influence of the surface composition of mixed monolayer films on the evaporation coefficient of water // Phys. Chem. Chem. Phys. 2016. Vol. 18 (29). pp. 19847–19858.
9. Influence of organic films on the evaporation and condensation of water in aerosol / J. Davies et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. 2013. Vol. 110 (22). pp. 8807–8812.
10. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование особенностей движения капель распыленной тушащей жидкости на входе в зону пламени // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22, № 12. С. 16–22.
11. Eisner H., Brookes F., Quince B. Stabilization of Water Mists // Nature. 1958. Vol. 182. p. 1724.
12. Effects of Emulsifier on Monolayer Structure and Evaporation Resistance / L. Lei et al. // Journal of the Chemical Society of Pakistan. 2014. Vol. 36. pp. 68–72.
13. Tuckermann R., Bauerecker S., Cammenga H. The generation of octadecanol monolayers on acoustically levitated water drops // Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2007. Vol. 309. pp. 198–201.
14. Structure and phase transitions in Langmuir monolayers / V. M. Kaganer et al. // Reviews of Modern Physics. 1999. Vol. 71. pp. 779–819.
15. Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Шалунова А. В. Ультразвуковое распыление жидкостей. Барнаул, 2010. 272 с.

REFERENCES

1. Pakhomov G. B., Elfimova M. V., Tuzhikov E. N. Long-periodic auto-oscillatory processes during flame extinguishing by a highly dispersed water mist // Technospheric safety. 2023. № 4 (41). pp. 37–48.
2. Experimental and Numerical Study of Fire Suppression Performance of Ultra-Fine Water Mist in a Confined Space / T. Liang et al. // Procedia Engineering. 2013. Vol. 52. pp. 208–213.
3. Pakhomov G. B., Elfimova M. V., Tuzhikov E. N. Supersonic water atomisation for volumetric fire extinguishing // Technospheric safety. 2023. № 2 (39). pp. 58–71.
4. The mechanism of extinguishing the flame with gas-water compositions of ultrafine spray / S. N. Kopylov et al. // Fire safety. 2014. № 2. pp. 67–71.
5. Husted B. Experimental measurements of water mist systems and implications for modelling in CFD : Doctoral Thesis. Lund, 2007. 125 p.

6. Malgin Yu. V. Energy and dispersibility of the fog formed by an ultrasonic humidifier // S.O.K. 2020. № 3. pp. 56–59.
7. Pakhomov G. B., Elfimova M. V., Tuzhikov E. N. Experimental study of increasing the stability of highly dispersed water mist // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 78–89.
8. Miles R., Davies J., Reid J. The influence of the surface composition of mixed monolayer films on the evaporation coefficient of water // Phys. Chem. Chem. Phys. 2016. Vol. 18 (29). pp. 19847–19858.
9. Influence of organic films on the evaporation and condensation of water in aerosol / J. Davies et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. 2013. Vol. 110 (22). pp. 8807–8812.
10. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental study of the specific features of the movement of droplets of atomised extinguishing liquid at the entrance to the flame zone // Pozharovzryvozryvobezopasnost. 2013. Vol. 22, № 12. pp. 16–22.
11. Eisner H., Brookes F., Quince B. Stabilization of Water Mists // Nature. 1958. Vol. 182. p. 1724.
12. Effects of Emulsifier on Monolayer Structure and Evaporation Resistance / L. Lei et al. // Journal of the Chemical Society of Pakistan. 2014. Vol. 36. pp. 68–72.
13. Tuckermann R., Bauerecker S., Cammenga H. The generation of octadecanol monolayers on acoustically levitated water drops // Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2007. Vol. 309. pp. 198–201.
14. Structure and phase transitions in Langmuir monolayers / V. M. Kaganer et al. // Reviews of Modern Physics. 1999. Vol. 71. pp. 779–819.
15. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Shalunova A. V. Ultrasonic atomization of liquids. Barnaul, 2010. 272 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пахомов Георгий Борисович, канд. хим. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 51866; e-mail: georgy400@yandex.ru

Елфимова Марина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника Уральского института ГПС МЧС России по научной работе (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 818459

Тужиков Евгений Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 759898

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Georgy B. Pakhomov, Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher of the Research Department, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 51866; e-mail: georgy400@yandex.ru

Marina V. Elfimova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Institute for Scientific Work, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 818459

Evgeniy N. Tuzhikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fire, Emergency and Rescue Equipment, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 759898

Поступила в редакцию 14.04.2025

Одобрена после рецензирования 16.06.2025

Принята к публикации 15.09.2025