

УДК 614.844.2

ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТУШЕНИИ ПЛАМЕНИ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМ ВОДЯНЫМ ТУМАНОМ

**Пахомов Георгий Борисович, Елфимова Марина Владимировна,
Тужиков Евгений Николаевич**

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Высокодисперсный водяной туман (ВВТ) – это устойчивый аэрозоль, состоящий из воздушной дисперсионной среды и распределенных в ней мельчайших капель воды, заулеровский диаметр которых составляет несколько микрон. В последние годы ведутся исследования по применению ВВТ для целей пожаротушения, это обусловлено тем, что ВВТ – экологически чистый высокоэффективный пожаротушающий агент с газообразными свойствами, позволяющий реализовать объемный способ тушения и минимизировать ущерб от пожара. Эксперименты по тушению ВВТ пламени проводились в замкнутой испытательной камере, где ВВТ образуется с помощью ультразвукового генератора. В ходе исследования было обнаружено новое явление, заключающееся в возникновении долговременных долгопериодических автоколебательных процессов при тушении ВВТ диффузионного пламени. По результатам исследования определены значения тушащей концентрации ВВТ, которая в рамках эксперимента практически не зависит как от интенсивности подачи ВВТ, так и от типа и мощности источников пламени. Проведен анализ возможных механизмов обратной связи в обнаруженных автоколебательных процессах, на основании чего сделан вывод о влиянии типа и механизма обратной связи на периодичность этих процессов.

Ключевые слова: высокодисперсный водяной туман, объемное пожаротушение, ультразвуковое распыление, автоколебательный процесс

LONG-PERIODIC AUTO-OSCILLATORY PROCESSES IN FLAME EXTINGUISHING BY HIGHLY DISPERSED WATER MIST

Georgy B. Pakhomov, Marina V. Elfimova, Evgenij N. Tuzhikov

Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Highly dispersed water mist (HWM) is a stable aerosol consisting of an air dispersion medium and the smallest water droplets distributed in it, with a Sauter mean diameter of a few microns. In recent years, research has been conducted on the application of HWM for fire extinguishing purposes, this is due to the fact that HWM is an environmentally friendly highly effective fire extinguishing agent, with gaseous properties, allowing to implement a volumetric method of extinguishing and minimize fire damage.

HWM flame extinguishing experiments were conducted in a closed test chamber where the HWM is generated using an ultrasonic generator. In the course of the study, a new phenomenon was discovered, which consists in the occurrence of long-term long-periodic auto-oscillatory processes during the extinguishing of HWM diffusion flames. According to the results of the study, the values of the extinguishing concentration of HWM were determined, which within the framework of the experiment practically does not depend both on the intensity of HWM supply and on the type and power of flame sources. The possible feedback mechanisms in the detected auto-oscillatory processes were analyzed, on the basis of which a conclusion was made about the influence of the type and mechanism of feedback on the periodicity of these processes.

Keywords: highly dispersed water mist, volumetric fire extinguishing, ultrasonic atomization, auto-oscillation process

Введение

Для эффективного объемного пожаротушения требуются водные аэрозоли высокой устойчивости, дисперсности и концентрации, создаваемые за короткое время. В пожаротушении, в частности применительно к гибридным установкам объемного пожаротушения, под водяным туманом подразумевается относительно устойчивый аэрозоль, состоящий из газовой дисперсионной среды и распределенных в ней капель воды, заутеровский диаметр которых не превышает 65 мкм [1]. Необходимо указать, что для капель воды диаметром более 30 мкм основной вклад в уменьшении их концентрации в объеме (разрушение тумана) вносит гравитационное осаждение [2]. По этой причине время существования (разрушения) туманов, созданных на основе даже таких новейших технологий, как гибридные установки пожаротушения, не превышает нескольких минут.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями доказано, что эффективность объемного пожаротушения увеличивается с ростом дисперсности распыляемой и подаваемой на тушение воды [3].

Для получения высококонцентрированного устойчивого водяного тумана, для целей объемного пожаротушения,

в последние годы ведутся исследования высокодисперсного водяного тумана (ВВТ), получаемого с помощью ультразвукового генератора [4]. Принцип работы такого

генератора основан на образовании ВВТ при воздействии на тонкий слой воды ультразвуковых колебаний пьезокерамического излучателя. Время существования ВВТ в замкнутом объеме может составлять несколько часов [5], а генерируемые капли имеют очень узкое распределение по размерам и заутеровский диаметр в несколько микрон [6]. В настоящее время уже имеются серийные ультразвуковые генераторы ВВТ производительностью около 1 л/мин, что позволяет после незначительной доработки использовать их в системах объемного пожаротушения.

Следует отметить, что только ультразвуковая технология распыления воды на настоящий момент может обеспечить одновременную реализацию таких характеристик распыления, как высокая производительность, однородность и дисперсность, требуемых для создания устойчивого ВВТ для целей объемного пожаротушения.

Нами не найдено отечественных научных публикаций, посвященных этой тематике, отсюда следует вывод об актуальности проведения научно-исследования

тельских работ, направленных на исследование объемного пожаротушения ВВТ, образуемого ультразвуковым генератором.

Экспериментальная методика

Обозначения и исходные данные:

C – тушащая концентрация ВВТ, г/м³;
 Q – низшая теплота сгорания горючего, МДж/кг;
 W – тепловая мощность источника пламени, Вт;
 G – массовый расход ВВТ, г/мин;
 t_1 – время тушения или время начала колебаний пламени, мин;
 t_0 – время достижения 100 % влажности в объеме камеры, мин;

P – усредненное атмосферное давление при измерениях (0,098 МПа);
 T – усредненная температура окружающего воздуха при измерениях (298 К);
 V – свободный объем испытательной камеры (0,084 м³);
 M_0 – влагосодержание воздуха при 30 % влажности (6,9 г/м³);
 M_1 – влагосодержание воздуха при 100 % влажности (23,1 г/м³);
 Усредненная относительная влажность окружающего воздуха \approx 30 %.

Схема основного экспериментального оборудования, созданного для проведения настоящего исследования, приведена на рис. 1.

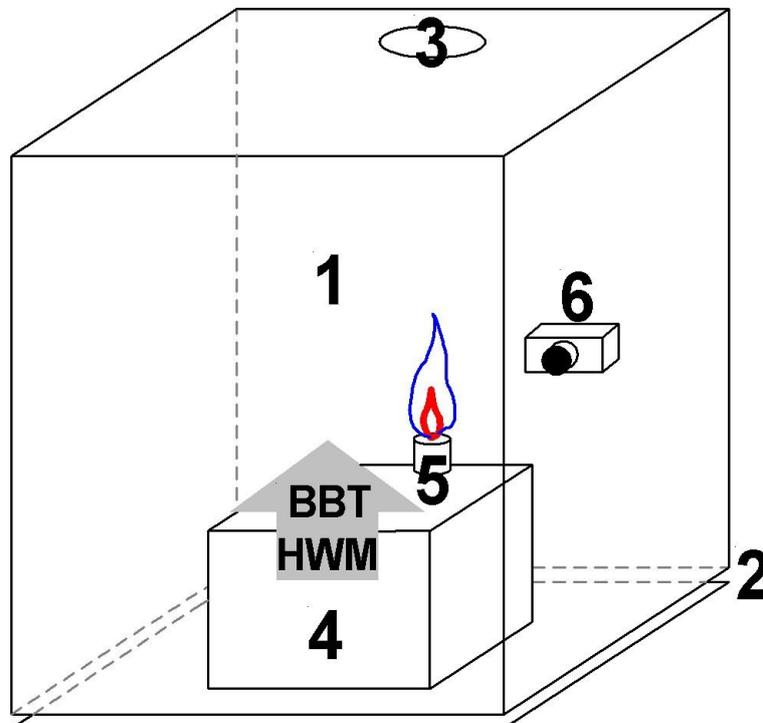


Рис. 1. Схема испытательного стенда для тушения пламени с помощью ВВТ: 1 – испытательная камера; 2 – входной проем; 3 – выходной проем; 4 – ультразвуковой генератор ВВТ; 5 – источник пламени; 6 – видеокамера

Fig. 1. Schematic diagram of the test bench for flame extinguishing with HWM where: 1 – test chamber; 2 – entrance aperture; 3 – exit aperture; 4 – ultrasonic generator of HWM; 5 – flame source; 6 – video camera

Для исследования тушения пламени ВВТ был создан испытательный стенд (рис. 1), состоящий из замкнутой испытательной камеры (1) с прозрачными стен-

ками и регулируемые по площади входным (2) и выходным (3) проемами. Свободный объем камеры составлял 84 л. Внутри камеры размещался ультразвуковой генератор ВВТ (4) и источник пламени (5). За

пределами испытательной камеры, на расстоянии $\approx 0,2$ м от источника пламени, размещалась видеокамера (6) для видеофиксации поведения пламени при экспериментах.

Используемый ультразвуковой генератор ВВТ с частотой колебаний пьезо-керамического излучателя 1,7 МГц генерирует капли со средним заутеровским диаметром в диапазоне 4–5 мкм. Расход ВВТ регулировался ультразвуковым генератором в пределах от 1,8 до 8 г/мин. В качестве источника пламени использовались: парафиновые свечи, спиртовая и газовая горелки. Во всех источниках пламени осуществлялся диффузионный режим горения. Для фитилей источников

пламени применялись шнуры из высоко-температурного стекловолокна. Тепловая мощность источников пламени составляла от 20 до 300 Вт.

Исследования проводились при различных расходах ВВТ, типах и тепловых мощностях источников пламени. Расход ВВТ и горючего определялись с помощью взвешивания. Тепловая мощность источника пламени W определялась, при свободном горении без подачи ВВТ, исходя из расхода горючего и справочных данных по низшим теплотам сгорания Q используемого горючего [7]. Характеристики источников пламени приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики источников пламени

Table 1.

Characteristics of flame sources

№	Источник пламени Flame source	Горючее Fuel	Молекулярная формула Molecular formula	Q , МДж/кг Q , MJ/kg	W , Вт W , W
1	Парафиновая свеча Paraffin candle	Парафин Paraffin	$C_{26}H_{54}$	45,8	38–111
2	Спиртовая горелка Alcohol burner	Изопропанол Isopropanol	C_3H_8O	34,1	56
3	Газовая горелка с фитилем Gas burner with a wick	Пропан-бутан Propane-butane	$C_3H_8-C_4H_{10}$	46,8	21–55
4	Газовая горелка без фитиля Gas burner without wick	Пропан-бутан Propane-butane	$C_3H_8-C_4H_{10}$	46,8	58–293

Давление, температура и относительная влажность окружающего воздуха во время экспериментов были вблизи 0,098 МПа, 298 К и 30 % соответственно.

На основании максимальной мощности источников пламени, расчетов реакций горения и предварительных экспериментов были выбраны площади и расположения входного и выходного проемов испытательной камеры. Площади проемов

$\approx 6,5$ см². Расположение источника пламени и проемов указано на рис. 1.

Площади проемов были достаточны для поддержания нормального горения наиболее мощного источника пламени, при этом унос ВВТ из испытательной камеры был незначителен. Расположение проемов обеспечивало максимально быстрое для данной конфигурации оборудова-

ния, удаление продуктов сгорания и насыщение поступающего в камеру воздуха ВВТ.

Для определения концентрации ВВТ при тушении пламени и времени ее достижения были проведены эксперименты при различных расходах ВВТ, типах и тепловых мощностях источников пламени. Схема экспериментов была следующей: в испытательной камере включался ультразвуковой генератор ВВТ и зажигался источник пламени. В процессе эксперимента проводилась видеосъемка пламени, фиксировались: время, расходы ВВТ и горючего. Для каждого опытного сценария проводилось не менее трех экспериментов с одинаковыми, в пределах ошибки измерений, условиями.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов было установлено, что при многих сценариях тушения пламени, перед полным прекращением горения, наблюдались долговременные долгопериодические колебания интенсивности горения. Интенсивность горения при этом менялась от максимальной для данного источника пламени до практического отсутствия пламенного горения. При минимальной интенсивности горения, наблюдаемой в процессе указанных колебаний, сохранялось преимущественно тлеющее горение или свечение, сосредоточенное на кончике фитиля источника пламени. Все остальные параметры оставались неизменными на протяжении каждого из экспериментов.

Для всех источников пламени, в которых использовались фитили (табл. 1, источники № 1, 2, 3), были зафиксированы долговременные долгопериодические колебания интенсивности горения в определенном диапазоне изменения расхода ВВТ. Для расходов ВВТ ниже 1.8 г/мин периодических изменений интенсивности горения не наблюдалось, полного прекращения горения не достигалось.

Для газовой горелки без введенного в пламя фитиля (табл. 1 источник № 4) тушение пламени происходило без колебаний интенсивности горения, что объясняется отсутствием после прекращения пламенного горения раскаленного фитиля как источника зажигания.

Максимальная длительность обнаруженных колебаний интенсивности горения наблюдалась для одного из сценариев по тушению парафиновой свечи (табл. 1 источник № 1) и составила 1245 с. Периодичность колебаний находилась в диапазоне от 40 до 55 с.

Для спиртовой горелки (табл. 1 источник № 2) наблюдались колебания интенсивности горения общей продолжительностью до 189 с. Периодичность колебаний находилась в диапазоне от 0,3 до 0,4 с эти сравнительно быстрые колебания перемежались с периодами относительно спокойного горения длительностью до 5 с.

Для газовой горелки с введенным в пламя фитилем (табл. 1 источник № 3) наблюдались колебания интенсивности горения общей продолжительностью до 162 с. Периодичность колебаний находилась в диапазоне от 0.5 до 1.6 с.

Долгопериодические колебания интенсивности горения, обнаруженные в настоящем исследовании, возникают самопроизвольно и имеют установившийся характер, следовательно, они относятся к автоколебательным явлениям [8].

Затухание колебаний пламени с последующим полным прекращением горения, наблюдаемые при проведении настоящего исследования, вызваны как накоплением продуктов горения в объеме испытательной камеры, так и повышением в ней температуры; последнее, в свою очередь, ведет к увеличению интенсивности образования ВВТ в ультразвуковом генераторе.

Упоминаний о долговременных долгопериодических автоколебательных

процессах при тушении пламени, подобных тем, что были обнаружены при проведении настоящего исследования, в научных источниках не найдено. Все ранее исследованные автоколебательные процессы в пламени относятся к акустическим колебаниям с частотой более 20 Гц [8].

На рис. 2 приведена зависимость времени тушения (для газовой горелки без фитиля; табл. 1 источник № 4) или начала периодических изменений интенсивности горения t_1 от массового расхода ВВТ G для различных источников пламени.

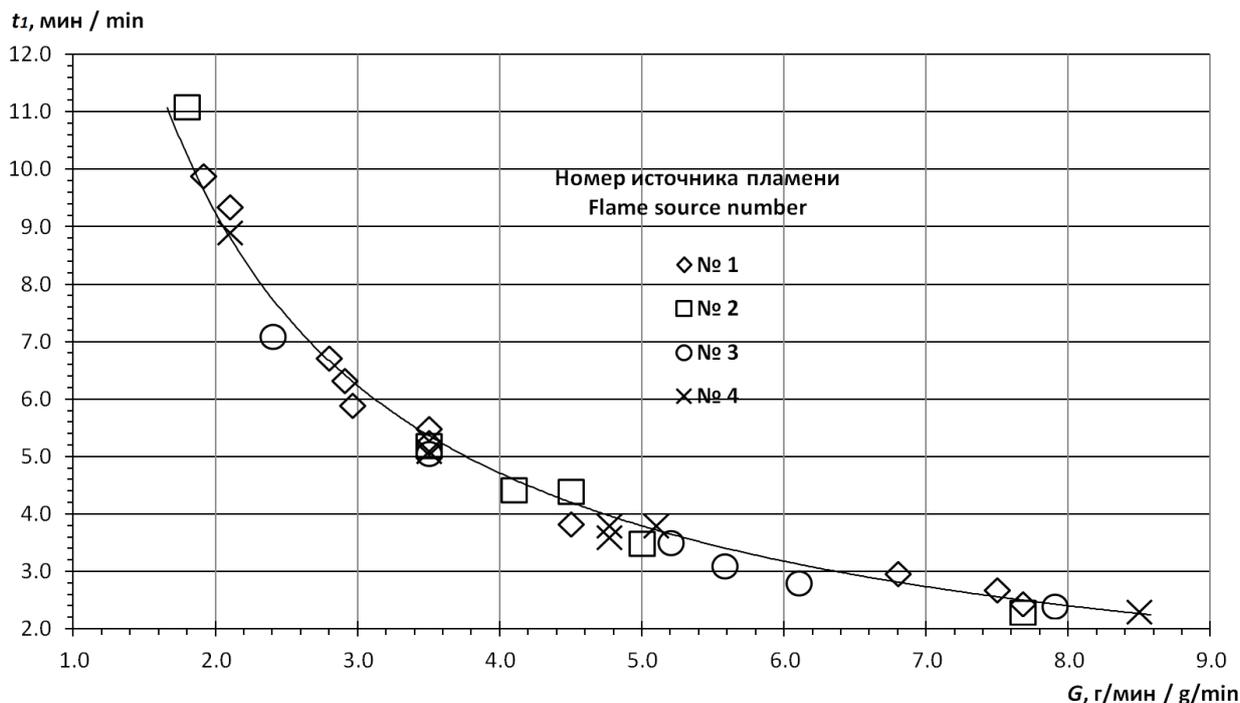


Рис. 2. Зависимость времени тушения (для газовой горелки без фитиля; табл. 1 источник № 4) или начала периодических изменений интенсивности горения от массового расхода ВВТ для различных источников пламени

Fig. 2. Dependences of extinguishing time (for a gas burner without a wick; table 1; source No. 4) or the start of periodic changes in combustion intensity on the mass flow rate of HWM for different flame sources

Из данных, приведенных на рис. 2 следует, что при увеличении массового расхода ВВТ время тушения или время начала периодических изменений интенсивности горения уменьшается, что закономерно и не требует дополнительных пояснений.

Наличие долгопериодических автоколебательных процессов при тушении пламени ВВТ свидетельствует, что во время этих процессов интегральная концентрация ВВТ в объеме камеры остается примерно постоянной. Этот вывод согласуется с литературными данными,

свидетельствующими о том, что с увеличением концентрации ВВТ скорость его разрушения также увеличивается [9].

Из вышеизложенного следует, что для каждого значения расхода ВВТ, при прочих неизменных параметрах эксперимента, существует предельно достижимая концентрация ВВТ, при которой расход ВВТ оказывается равным скорости его разрушения.

На основании этого вывода оценим значение концентрации ВВТ, при которой происходит тушение или начинаются пери-

одические изменения интенсивности горения, что свидетельствует о достижении концентрацией ВВТ диапазона тушащих концентраций. Для упрощения расчетов сделаем допущение, что до достижения предельной концентрации ВВТ (для данного расхода ВВТ) концентрация ВВТ линейно зависит от времени подачи ВВТ. При этом из времени тушения или времени начала колебаний пламени t_1 необходимо вычесть время увлажнения воздуха в объеме камеры до состояния полного насыщения водяными парами t_0 , т. к. ВВТ начинает накапливаться только после достижения 100 % влажности в объеме камеры. Последнее заключение следует из литературных данных о том, что процесс искусственного туманообразования можно разделить на две части: увлажнение воздуха до состояния полного насыщения водяными парами, а затем создание атмосферы витающих, свободно перемещающихся в различных направлениях мельчайших капелек воды [5].

Из эксперимента нам известно время тушения или начала периодических изменений интенсивности горения t_1 при

тушении пламени ВВТ. Время достижения 100 % влажности в объеме камеры t_0 формула (1) определяется на основании экспериментальных значений объема испытательной камеры V , расхода ВВТ – G ; и справочных данных [10] по влагосодержанию воздуха – M_0, M_1 при давлении – 0.098 МПа, температуре 298 К, относительной влажности – 30 % и 100 % соответственно.

$$t_0 = \frac{(M_1 - M_0)V}{G} \quad (1)$$

Исходя из вышеуказанных допущений, значение тушащей концентрации ВВТ – C может быть определено по формуле (2).

$$C = \frac{(t_1 - t_0)G}{2V} \quad (2)$$

В таблицах 2, 3, 4 приведены усредненные значения: массового расхода ВВТ – G , тушащей концентрации ВВТ – C , времени достижения 100 % влажности в объеме испытательной камеры – t_0 , времени начала периодических изменений интенсивности горения – t_1 и мощности источников пламени – W при тушении источников пламени № 1, 2, 3.

Таблица 2.

Расходные и временные характеристики тушения ВВТ источника пламени № 1

Table 2.

Flow and time characteristics of HWM extinguishing of flame source No. 1

G , г/мин / g/min	W , Вт / W	t_0 , мин / min	t_1 , мин / min	C , г/м ³ / g/m ³
1,9	38	0,71	9,9	105
2,1	38	0,65	9,4	109
2,8	111	0,48	6,7	104
2,9	38	0,47	6,3	102
3,0	38	0,46	5,9	96
3,5	111	0,39	5,3	101
3,5	111	0,39	5,5	107
4,5	111	0,30	3,8	95
6,8	111	0,20	3,0	112
7,5	38	0,18	2,7	112
7,7	111	0,18	2,5	104

Таблица 3.

Расходные и временные характеристики тушения
ВВТ источника пламени № 2

Table 3.

Flow and time characteristics of HWM
extinguishing of flame source No. 2

G , г/мин / g/min	W , Вт / W	t_0 , мин / min	t_1 , мин / min	C , г/м ³ / g/m ³
1,8	56	0,75	11,1	111
3,5	56	0,39	5,2	100
4,1	56	0,33	4,4	100
4,5	56	0,30	4,4	110
5,0	56	0,27	3,5	96
7,7	56	0,18	2,3	97

Таблица 4.

Расходные и временные характеристики
тушения ВВТ источника пламени № 3

Table 4.

Flow and time characteristics of HWM
extinguishing of flame source No. 3

G , г/мин / g/min	W , Вт / W	t_0 , мин / min	t_1 , мин / min	C , г/м ³ / g/m ³
2,4	21	0,57	7,1	101
3,5	49	0,39	5,1	97
5,2	55	0,26	3,5	100
5,6	27	0,24	3,1	103
6,1	25	0,22	2,8	102
7,9	51	0,17	2,4	105

В таблице 5 приведены усреднен-
ные значения: массового расхода ВВТ – G ,
тушащей концентрации ВВТ – C , времени
достижения 100 % влажности в объеме

испытательной камеры – t_0 , времени туше-
ния – t_1 и мощности источников пламени –
 W при тушении источника пламени № 4.

Таблица 5.

Расходные и временные характеристики тушения ВВТ источника пламени № 4

Table 5.

Flow and time characteristics of HWM extinguishing of flame source No. 4

G , г/мин / g/min	W , Вт / W	t_0 , мин / min	t_1 , мин / min	C , г/м ³ / g/m ³
2,1	206	0,65	8,9	103
3,5	58	0,39	5,1	98
4,8	63	0,28	3,6	94
4,8	282	0,28	3,8	100
5,1	293	0,27	3,8	107
8,5	197	0,16	2,3	108

Из данных приведенных в таблицах 2–5 следует, что диапазон тушащих концентраций ВВТ находится вблизи значения 100 г/м^3 , эта величина соответствует данным по тушению ВВТ приведенным в литературных источниках [11]. Тушащая концентрация ВВТ в пределах погрешности и условий эксперимента практически не зависит как от времени тушения или начала периодических изменений интенсивности горения при тушении пламени, следовательно, и от интенсивности подачи ВВТ, так и от типа и мощности источников пламени. Эти результаты подтверждают применимость сделанного ранее допущения, что до достижения предельной концентрации ВВТ (для данного расхода ВВТ) концентрация ВВТ может быть описана линейной зависимостью от времени подачи ВВТ.

Полученный вывод не противоречит тому обстоятельству, что более мощные источники горения тушатся ВВТ за более короткое время [12], т. к. в настоящем исследовании тепловая мощность источника пламени определялась при свободном горении без подачи ВВТ.

Для газовой горелки без фитиля (табл. 1, источник № 4), при достижении ВВТ тушащей концентрации, температура пламени снижается до температуры потухания и процесс тушения на этом заканчивается.

В автоколебательной системе должен присутствовать источник энергии и механизм обратной связи, который управляет источником энергии. Источник энергии получает колебательные свойства под воздействием механизма обратной связи, т. е. совокупности физико-химических процессов, происходящих в зоне горения, приводящих к периодическому изменению в выделении энергии.

В нашем случае колебательная система — это испытательная камера с источниками пламени и ВВТ, источник энергии —

источник пламени. Рассмотрим возможные механизмы обратной связи.

Достижение интегральной концентрации ВВТ диапазона тушащих концентраций в объеме испытательной камеры приводит к снижению интенсивности горения, в основном за счет разбавления кислорода воздуха и охлаждения зоны горения, которое, в свою очередь, ведет к уменьшению количества ВВТ, поступающего в зону горения за счет конвективной колонки нагретых продуктов горения. Кроме того, снижение интенсивности горения приводит к уменьшению поступления горючего для парафиновой свечи и спиртовой горелки (табл. 1, источники № 1, 2), так как в указанных случаях жидкое/расплавленное горючее поступает по фитилю в зону горения за счет капиллярных сил.

Для источников пламени с фитилем раскаленный/тлеющий кончик фитиля выступает как вторичный источник зажигания, после того как температура пламени снижается до температуры потухания. Интенсивность горения при этом уменьшается до практического отсутствия пламенного горения, что минимизирует поступление ВВТ в зону горения, а это, в свою очередь приводит к последующему увеличению интенсивности горения.

Общепризнано, что диффузионное пламя — поверхность, на которой горючее в виде газа и кислород воздуха находятся в стехиометрическом отношении. Снижение поступления горючего приведет к тому, что пламя будет уменьшаться, а его фронт начнет перемещаться в сторону источника горючего газа, в нашем случае в сторону раскаленного/тлеющего кончика фитиля, пока не выполнится условие стехиометрии. В результате разбавления кислорода воздуха парами воды при воздействии ВВТ будет наблюдаться обратная картина, и поверхность пламени должна увеличиваться. Отклонение пламени от стехиометрической поверхности приводит

к тому, что скорость горения уменьшается и будет опять максимальной, когда пламя достигнет нового стехиометрического положения, для этого необходимо определенное время – время запаздывания.

В рассматриваемом случае обратная связь может быть описана следующим образом. Снижение интенсивности горения с ростом концентрации ВВТ → уменьшение скорости поступления горючего и/или ВВТ в зону горения → прекращение пламенного горения и снижение до минимума скорости поступления горючего и/или ВВТ в зону горения → воспламенение горючих газов, находящихся в зоне горения от тлеющего/раскаленного кончика фитиля → увеличение интенсивности горения → увеличение поступления горючего и/или ВВТ в зону горения. Так как эти процессы не являются полностью согласованными друг с другом, появляется некоторое запаздывание между ними. Следовательно, процесс тепловыделения при горении становится периодическим и возникает возможность самовозбуждения колебаний пламени.

Таким образом, изменение скорости горения под воздействием ВВТ обуславливает периодические изменения, как скорости тепловыделения, так и скорости поступления горючего и/или ВВТ в зону горения.

Исходя из вышеизложенного, в первые обнаруженные в настоящем исследовании длительные долгопериодические автоколебательные процессы при тушении пламени могут реализовываться по расходному (по горючему для источников № 1, 2) и/или диффузионному (по кислороду воздуха и ВВТ для источников № 1, 2, 3) механизмам обратной связи. Наличие или преобладание того или иного механизма обратной связи вероятно и обуславливает существенные различия в периодичности колебаний, наблюдаемые при тушении различных источников пламени.

Полученные результаты имеют и несомненное практическое значение, так из них следует, что при объемном пожаротушении требуется максимальная интенсивность подачи ВВТ это минимизирует эффект старения ВВТ, уменьшает время тушения и общий расход воды, предотвращает возникновение и развитие колебаний пламени. Для достижения гарантированного тушения низкокалорийных и тлеющих очагов горения необходимо превысить тушащую концентрацию ВВТ и еще некоторое время поддерживать ее в объеме объекта тушения.

Настоящее исследование может послужить основой для постановки в дальнейшем более обширных и детальных экспериментов при вариации свойств ВВТ и источников горения.

Выводы

Из проведенного анализа технологий распыления воды для объемного пожаротушения сделан вывод об актуальности проведения научно-исследовательских работ, направленных на исследование объемного пожаротушения ВВТ, образуемого ультразвуковым генератором.

Для исследования тушения пламени ВВТ был создан испытательный стенд, с помощью которого проведены эксперименты по определению характеристик тушения.

В ходе экспериментов было установлено, что для всех источников пламени, в которых использовались фитили, перед полным прекращением горения наблюдались долговременные долгопериодические колебания интенсивности горения. Обнаруженные колебания интенсивности горения относятся к автоколебательным процессам и ранее не были описаны в научных источниках.

Проведено экспериментальное определение времени тушения или времени начала периодических изменений интенсивности горения при различных

расходах ВВТ, типах и тепловых мощностях источников пламени. При увеличении расхода ВВТ время тушения или время начала периодических изменений интенсивности горения закономерно уменьшается.

По результатам исследования определены значения тушащей концентрации ВВТ, которая в рамках эксперимента практически не зависит как от интенсивности подачи ВВТ, так и от типа и мощности источников пламени. Проведен анализ возможных механизмов обратной связи в обнаруженных автоколебательных процессах, на основании чего сделан вывод о влиянии типа и механизма обратной связи на периодичность этих процессов.

Из полученных результатов следует, что при объемном пожаротушении требуется максимальная интенсивность подачи ВВТ это минимизирует эффект старения ВВТ, уменьшает время тушения и общий расход воды, предотвращает возникновение и развитие колебаний пламени. Для достижения гарантированного тушения низкокалорийных и тлеющих очагов горения необходимо превысить тушащую концентрацию ВВТ и еще некоторое время поддерживать ее в объеме объекта тушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пахомов Г. Б., Елфимова М. В., Тужиков Е. Н. Сверхзвуковое распыление воды для объемного пожаротушения // Техносферная безопасность. 2023. № 2 (39). С. 58–71.
2. Коровина Н. В. Создание аэрозольных сред с помощью автономных распылительных устройств, их эволюция и распространение в замкнутых объемах : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Бийск, 2014. 120 с.
3. Особенности пожаротушения в замкнутом объеме тонкораспыленной водой / А. Л. Душкин и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26, № 3. С. 60–69.
4. Murugan, S. S., Vijayakumar, P. Identification of ultrasonic frequency for water mist generation using piezoelectric transducer // Archives of Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 83(2). pp. 74–78. URL: <https://www.researchgate.net/publication/317234436> (date of application: 09.10.2023).
5. Мальгин Ю. В. Увлажнение воздуха туманом (теория и практика на примере ультразвукового увлажнителя) // С.О.К. 2007. № 10. С. 91–98.
6. Lozano, A., García, J., Alconchel, J. Influence of liquid properties on ultrasonic atomization // ILASS2017. Sep. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/319509206> (date of application: 09.10.2023).
7. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А. А. Равдель, А. М. Пономарева. Л., 1983. 232 с.
8. Ларионов В. М., Зарипов Р. Г. Автоколебания газа в установках с горением. Казань, 2003. 278 с.
9. Мальгин Ю. В. Энергетика и дисперсность тумана, образованного ультразвуковым увлажнителем // С.О.К. 2020. № 3. С. 56–59.
10. Физическая энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров. М., 1988. Т. 1. 704 с.
11. Awtry, A. et al. Measurement of Absolute Oxygen Concentration by Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) in Very Fine Water Mist Environments // Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico May 4 – 6, 2004. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228726107> (date of application: 09.10.2023).
12. Zhu, D., Liang, D., Liu, J. Numerical Simulation of Ultra-fine Water Mist Extinguishing Mechanism // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. pp. 28–33. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814004238> (date of application: 09.10.2023).

REFERENCES

1. Pakhomov G.B., Elfimova M.V., Tuzhikov E.N. Supersonic water atomization for volumetric fire extinguishing. Technospheric safety. 2023; 2(39):58–71. URL: [https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%202%20\(39\)/6.pdf](https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%202%20(39)/6.pdf). (rus).
2. Korovina N.V. Creation of aerosol environments by means of autonomous atomizing devices, their evolution and distribution in closed volumes. Diss. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Biysk, 2014; 120.

URL: <https://www.dissercat.com/content/sozдание-aerazolnykh-sred-s-pomoshchyu-avtonomnykh-raspylitelnykh-ustroystv-ikh-evolyutsiya>. (rus).

3. Dushkin A.L., Lovchinsky S.E., Ryazantsev N.N., Segal M.D. Features of fire extinguishing in a closed volume with thinly sprayed water. *Fire and explosion safety*. 2017; 3:60–69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28949554>. (rus).

4. Murugan S.S., Vijayakumar P. Identification of ultrasonic frequency for water mist generation using piezoelectric transducer. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2017; 83(2): 74–78. URL: <https://www.researchgate.net/publication/317234436>.

5. Malgin Yu.V. Air humidification by fog (theory and practice on the example of an ultrasonic humidifier). *S.O.K.* 2007; 10:91–98. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/uvlazhnenie-vozdusha-tumanom-teoriya-i-praktika-na-primere-ul-trazvukovogo-uvlazhnitelya>. (rus).

6. Lozano A., García J., Alconchel J. Influence of liquid properties on ultrasonic atomization. *ILASS2017*. Sep. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/319509206>.

7. Brief reference book of physic-chemical quantities / Edited by A. A. Ravdel, A. M. Ponomarev. *Chemistry*, 1983; 232. (rus).

8. Larionov V.M., Zaripov R.G. Gas auto oscillations in combustion plants. *Kazan*, 2003; 278 (rus).

9. Malgin Yu.V. Energy and dispersibility of the fog formed by an ultrasonic humidifier. *S.O.K.* 2020; 3:56–59. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/energetika-i-dispersnost-tumana-obrazovannogo-ultrazvukovym-uvlazhnitelem>. (rus).

10. *Physical Encyclopedia* / Ed. by A. M. Prokhorov. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1988; 1: 704. (rus).

11. Awtry A. et al. Measurement of Absolute Oxygen Concentration by Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) in Very Fine Water Mist Environments. *Halon Options Technical Working Conference*, Albuquerque, New Mexico, May 4 – 6, 2004. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228726107>.

12. Zhu D., Liang D., Liu J. Numerical Simulation of Ultra-fine Water Mist Extinguishing Mechanism. *Procedia Engineering*. 2014; 71: 28–33. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814004238>.

Информация об авторах

Пахомов Георгий Борисович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; Author ID: 51866; e-mail: georgy400@yandex.ru

Елфимова Марина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника института по научной работе, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; Author ID: 818459

Тужиков Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; Author ID: 759898

Information about the authors

Georgy B. Pakhomov, Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher of the Research Department, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 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, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; Author ID: 818459

Evgenij 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, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; Author ID: 759898