

Научная статья

УДК 678.019; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-88-96

## **ПРИМЕНЯЕМОСТЬ ВОДОГАЗОВЫХ ФОРСУНОК ДЛЯ ПОЖАРОТУШЕНИЯ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ**

**Андрюшкин Александр Юрьевич.**

**Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,  
Санкт-Петербург, Россия.**

**Хмелевской Никита Юрьевич;**

**Кадочникова Елена Николаевна.**

**Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева,  
Санкт-Петербург, Россия**

*Аннотация.* Низкая эффективность традиционных систем пожаротушения водой обусловлена формированием крупных капель. Капли больших размеров имеют малую наружную площадь поверхности, что обуславливает плохой отвод тепла из очага возгорания. Большую наружную площадь поверхности капель обеспечивают системы пожаротушения тонкораспыленной водой. Они эффективны при тушении возгораний на начальной стадии пожара в замкнутых пространствах и обеспечивают формирование капель менее 150 мкм. Проведенный анализ показал, что для создания тонкораспыленной воды с размером капель менее 100 мкм пригодны водогазовые форсунки с сонаправленными потоками воды и газа. Для обеспечения значительного отвода тепла от очага возгорания средний диаметр капель тонкораспыленной воды должен быть менее 80 мкм. Представлена методика определения размера капель при распылении водогазовыми форсунками. По методике проведен расчет среднего диаметра капель в зависимости от соотношения объемных расходов газа и воды. Показано, что эффективно пожаротушение тонкораспыленной водой с помощью водогазовых форсунок при давлении газа перед кольцевой щелью от 0,4 МПа до 0,6 МПа и отношении объемного расхода воздуха к объемному расходу воды более 2 000.

*Ключевые слова:* тонкораспыленная вода, форсунка, пожаротушение, распыление, капля

**Для цитирования:** Андрюшкин А.Ю., Хмелевской Н.Ю., Кадочникова Е.Н. Применяемость водогазовых форсунок для пожаротушения тонкораспыленной водой // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 1 (69). С. 88–96. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-88-96.

Scientific article

## **APPLICABILITY OF WATER-GAS NOZZLES FOR FIRE EXTINGUISHING WITH THINLY SPRAYED WATER**

**Andryushkin Aleksander Yu.**

**Baltic state technical university «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russia.**

**Khmelevskoy Nikita Yu;**

**Kadochnikova Elena N.**

**Military educational institution of logistics named after general of the army  
A.V. Khrulyov, Saint-Petersburg, Russia**

*Abstract.* The low efficiency of traditional water extinguishing systems is due to the formation of large droplets. Large droplets have a small external surface area, which causes poor heat removal from the ignition source. A large external surface area of droplets is provided by fire extinguishing

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024

systems with thinly sprayed water. They are effective in extinguishing fires at the initial stage of a fire in confined spaces and ensure the formation of droplets less than 150 microns. The analysis showed that water-gas nozzles with co-directional flows of water and gas are suitable for creating finely dispersed water with a droplet size of less than 100 microns. To ensure significant heat removal from the ignition source, the average diameter of the droplets of finely dispersed water should be less than 80 microns. A technique for determining the size of droplets when sprayed with water-gas nozzles is presented. According to the method, the calculation of the average diameter of droplets was carried out depending on the ratio of volume flow rates of gas and water. It is shown that fire extinguishing with finely sprayed water with the help of water-gas nozzles is effective at a gas pressure in front of the annular gap from 0,4 MPa to 0,6 MPa and the ratio of volumetric air flow to volumetric water flow is more than 2 000.

*Keywords:* finely sprayed water, nozzle, fire extinguishing, spraying, drop

**For citation:** Andryushkin A.Yu., Khmelevskoy N.Yu., Kadochnikova E.N. Applicability of water-gas nozzles for fire extinguishing with thinly sprayed water // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 1 (69). P. 88–96. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-88-96.

## Введение

Традиционные системы пожаротушения оснащены спринклерными или дренчерными форсунками, которые диспергируют воду на капли с диаметральным размером  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  м. Эффективность пожаротушения такими крупными каплями весьма низка, только 30 % воды расходуется непосредственно на подавление очага горения, остальные 70 % не участвуют в борьбе с возгоранием. Причиной низкой эффективности спринклерных или дренчерных форсунок является маленькая удельная наружная поверхность образовавшихся крупных капель. Чем больше наружная площадь поверхности капель воды, тем интенсивнее идут теплообменные процессы с газообразными реагентами и продуктами процесса горения. Увеличение площади поверхности капель воды наблюдается при уменьшении их диаметра (таблица).

Таблица

**Количество и площадь поверхностей капель воды  $F_{\Sigma k}$  в зависимости от их диаметра  $d_k$**

Диаметр капль ТРВ $d_k$ , мм	Количество капль воды, шт.	Площадь поверхности капль воды $F_{\Sigma k}$ , м <sup>2</sup>
120	1	0,05
6	8 846	1
0,1	1 910 828 025	60
0,05	15 286 624 204	120
0,025	122 292 993 631	240
0,01 (10 мкм)	1 910 828 025 478	600

Этот недостаток традиционных систем пожаротушения приводит к перерасходу воды и повышению продолжительности времени работы, что обуславливает увеличение ущерба от пожара.

Для повышения эффективности пожаротушения необходимо уменьшить размеры капль воды, то есть создать в направлении возгорания поток тонкораспыленной воды (ТРВ), характеризуемой размером капль  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  м. У ТРВ достигается большая наружная площадь поверхности капль воды (табл. 1). Размеры капль ТРВ в 5...20 раз меньше, чем для традиционных систем пожаротушения. ТРВ можно получить с помощью водогазовых форсунок, в которых вода распыляется потоком газа. В качестве распыляющего газа может

быть применен воздух, углекислый газ, а также значительно ухудшающие условия горения инертные газы: азот, аргон, гелий.

Испаряющиеся капли ТРВ размером менее 80 мкм усиленно охлаждают очаг возгорания за счет интенсивного отвода тепла, что существенно снижает расход воды и уменьшает время пожаротушения. Применение ТРВ целесообразно в замкнутых пространствах на начальной стадии пожара, когда площадь возгорания менее 2–3 м<sup>2</sup>. При размере капель ТРВ менее 80 мкм время пожаротушения составляет менее 1 мин. Поэтому актуальна оценка применимости водогазовых форсунок для пожаротушения ТРВ [1–8].

Целью исследования является теоретическая оценка среднего диаметра капель ТРВ, образованных водогазовой форсункой.

Задачи исследования.

1. Анализ водогазовых форсунок для получения ТРВ.
2. Теоретическая оценка размера капель, полученных при распылении с помощью водогазовой форсунки.
3. Влияние соотношения расходов газа и воды форсунки на средний диаметр капель.

### Водогазовые форсунки для получения ТРВ

Известны различные технические решения водогазовых форсунок. Чаще всего применяют форсунки с сонаправленными потоками воды и газа. В большинстве форсунок истекающий из кольцевой щели поток распыляющего газа охватывает выходящую из круглого канала струю воды и дробит ее на капли, образуя факел распыления (рис. 1). Факел распыления направлен на очаг возгорания, и на горячей поверхности формируется зона орошения, характеризуемая интенсивным отводом тепла [9–11].

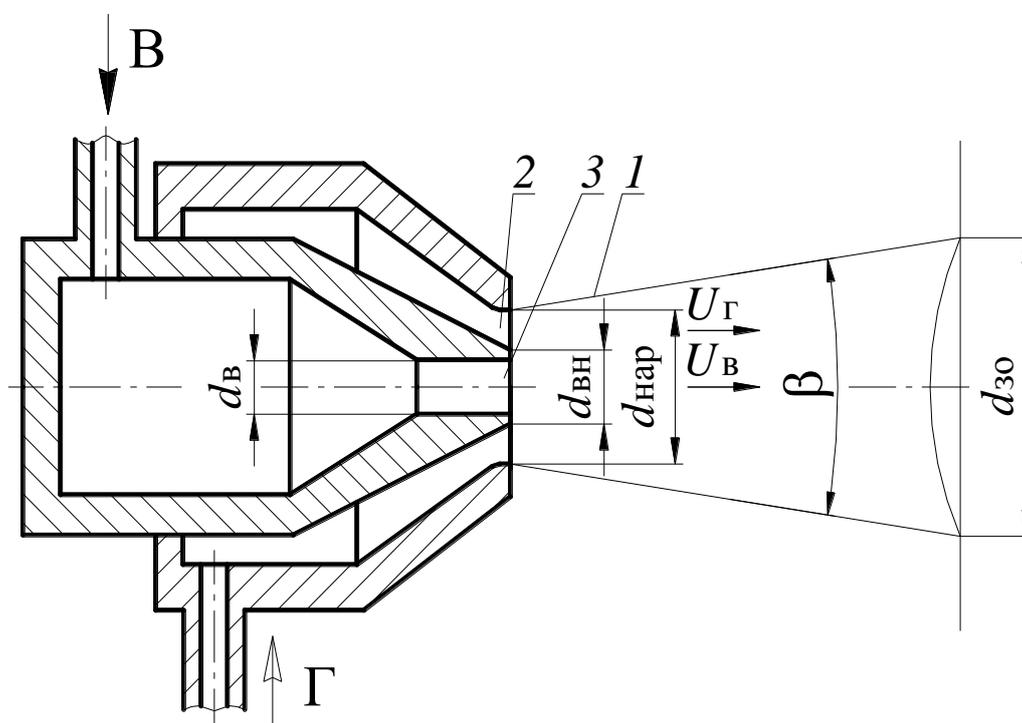


Рис. 1. Водогазовая форсунка: В – распыляемая вода; Г – распыляющий газ; 1 – факел распыления; 2 – кольцевая щель подачи газа; 3 – канал подачи воды;  $\beta$  – угол факела распыления;  $d_{зо}$  – диаметр зоны орошения;  $d_{в}$  – диаметр канала подачи воды;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр кольцевой щели подачи газа;  $d_{нар}$  – наружный диаметр кольцевой щели подачи газа;  $U_{г}$  – скорость истечения газа из кольцевой щели;  $U_{в}$  – скорость истечения воды из канала подачи

Водогазовые форсунки имеют следующие преимущества [12–14]:

- создание ТРВ с размером капель менее 150 мкм;
- широкий диапазон регулирования расходов воды и газа;
- интенсивное охлаждение очага возгорания;
- минимальный расход воды;
- небольшие габаритные размеры водогазовой форсунки.

Существенным недостатком, усложняющим конструкцию водогазовой форсунки, является необходимость в распыляющем газе, подготовка и подача которого требует дополнительного оборудования.

Размеры капель зависят от конструктивных размеров форсунки и расходов воды и газа. Необходимо оценить влияние на средний диаметр капель ТРВ расходов воды и газа, а также рассчитать их соотношение, при котором обеспечивается средний размер капель менее 80 мкм.

### Оценка размеров капель, полученных в процессе распыления с помощью водогазовой форсунки

Средний диаметр капель, полученных при распылении из водогазовой форсунки (рис. 1), может быть определен по эмпирическому выражению [14]:

$$d_{\text{ср}} = K_1 \cdot d_{\text{в}} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{г}} \cdot U_{\text{отн}}^2 \cdot d_{\text{в}}}{\sigma} \right)^{K_2}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{ср}}$  – средний диаметр капель м;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения воды, Н·м;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность распыляющего газа, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{\text{в}}$  – диаметр канала подачи воды, м;  $U_{\text{отн}}$  – относительная скорость водогазовой струи на выходе из форсунки, м/с;  $K_1, K_2$  – эмпирические коэффициенты.

По обобщенным экспериментальным данным в выражении (1) при сонаправленных потоках воды и газа значения коэффициентов составляют:  $K_1=0,9$ ;  $K_2=-0,45$ .

Плотность распыляющего газа зависит от температуры и давления в системе его подготовки и подачи:

$$\rho_{\text{г}} = \frac{P_{\text{г}} \cdot M_{\text{г}}}{R_{\text{г}} \cdot T_{\text{г}}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{г}}$  – давление газа перед кольцевой щелью, Па;  $M_{\text{г}}$  – молярная масса газа, кг/моль;  $R_{\text{г}}$  – универсальная газовая постоянная  $R_{\text{г}}=8,314$  Дж/(моль·К);  $T_{\text{г}}$  – температура газа перед кольцевой щелью, К.

Относительную скорость газовой струи рассчитывают по выражению:

$$U_{\text{отн}} = U_{\text{г}} - U_{\text{в}}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{г}}$  – скорость истечения газа из кольцевой щели, м/с;  $U_{\text{в}}$  – скорость истечения воды из канала подачи, м/с.

Скорость истечения газа из кольцевой щели определяют по выражению:

$$U_{\text{г}} = \frac{Q_{\text{г}}}{F_{\text{г}}}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{г}}$  – объемный расход распыляющего газа, м<sup>3</sup>/с;  $F_{\text{г}}$  – поперечная площадь кольцевой щели подачи газа, м<sup>2</sup>.

Объемный расход газа вычисляют по выражению:

$$Q_{\Gamma} = \eta_{\Gamma} \cdot F_{\Gamma} \cdot \left( 2 \cdot \frac{(P_{\Gamma} - P_{\text{H}})}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{H}}$  – давление окружающей среды, Па;  $\eta_{\Gamma}$  – коэффициент расхода газа через кольцевую щель.

Поперечная площадь кольцевой щели подачи газа:

$$F_{\Gamma} = \pi \cdot \left( (0,5 \cdot d_{\text{нар}})^2 - (0,5 \cdot d_{\text{вн}})^2 \right), \quad (6)$$

где  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр кольцевой щели подачи газа, м;  $d_{\text{нар}}$  – наружный диаметр кольцевой щели подачи газа, м;  $\pi = 3,14$ .

Скорость истечения воды из канала подачи определяют по выражению:

$$U_{\text{В}} = \frac{Q_{\text{В}}}{F_{\text{В}}}, \quad (7)$$

где  $Q_{\text{В}}$  – объемный расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $F_{\text{В}}$  – поперечная площадь канала подачи воды, м<sup>2</sup>.

Объемный расход воды вычисляют по выражению:

$$Q_{\text{В}} = \eta_{\text{В}} \cdot F_{\text{В}} \cdot \left( 2 \cdot \frac{(P_{\text{В}} - P_{\text{H}})}{\rho_{\text{В}}} \right)^{0,5}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{В}}$  – давление воды в канале подачи, Па;  $\eta_{\text{В}}$  – коэффициент расхода воды через канал подачи;  $\rho_{\text{В}}$  – плотность воды кг/м<sup>3</sup>.

Поперечная площадь канала подачи воды:

$$F_{\text{В}} = \pi \cdot (0,5 \cdot d_{\text{В}})^2. \quad (9)$$

Таким образом, дисперсность капель воды, определяемая по выражению (1), зависит от соотношения расходов распыляющего газа и распыляемой воды.

Оценим средний диаметр капель  $d_{\text{ср}}$ , получаемых при распылении форсункой, при различном соотношении объемных расходов воды и газа  $Q_{\Gamma}/Q_{\text{В}}$ . В качестве распыляющего газа взят воздух. Объемный расход воды  $Q_{\text{В}}$  будет изменяться за счет варьирования диаметра канала подачи воды  $d_{\text{В}}$ , а объемный расход воздуха  $Q_{\Gamma}$  – за счет варьирования давления газа перед кольцевой щелью  $P_{\Gamma}$ . Примем следующие исходные данные для расчета:

- давление газа перед кольцевой щелью  $P_{\Gamma}$  от 0,2 МПа до 0,6 МПа;
- диаметр канала подачи воды  $d_{\text{В}}$  от 1,0 мм до 2,0 мм;
- молярная масса газа  $M_{\Gamma}=0,029$  кг/моль;
- температура газа перед кольцевой щелью  $T_{\Gamma}=293$  К;
- давление окружающей среды  $P_{\text{H}}=0,1$  МПа;
- коэффициент расхода газа через кольцевую щель  $\eta_{\Gamma}=0,7$ ;
- внутренний диаметр кольцевой щели подачи газа  $d_{\text{вн}}=4$  мм;
- наружный диаметр кольцевой щели подачи газа  $d_{\text{нар}}=10$  мм;
- давление воды в канале подачи  $P_{\text{В}}=0,11$  МПа;

- коэффициент расхода воды через канал подачи  $\eta_{\text{в}}=0,7$ ;
- плотность воды  $\rho_{\text{в}}=1\,000\text{ кг/м}^3$ ;
- коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma=0,073\text{ Н}\cdot\text{м}$ .

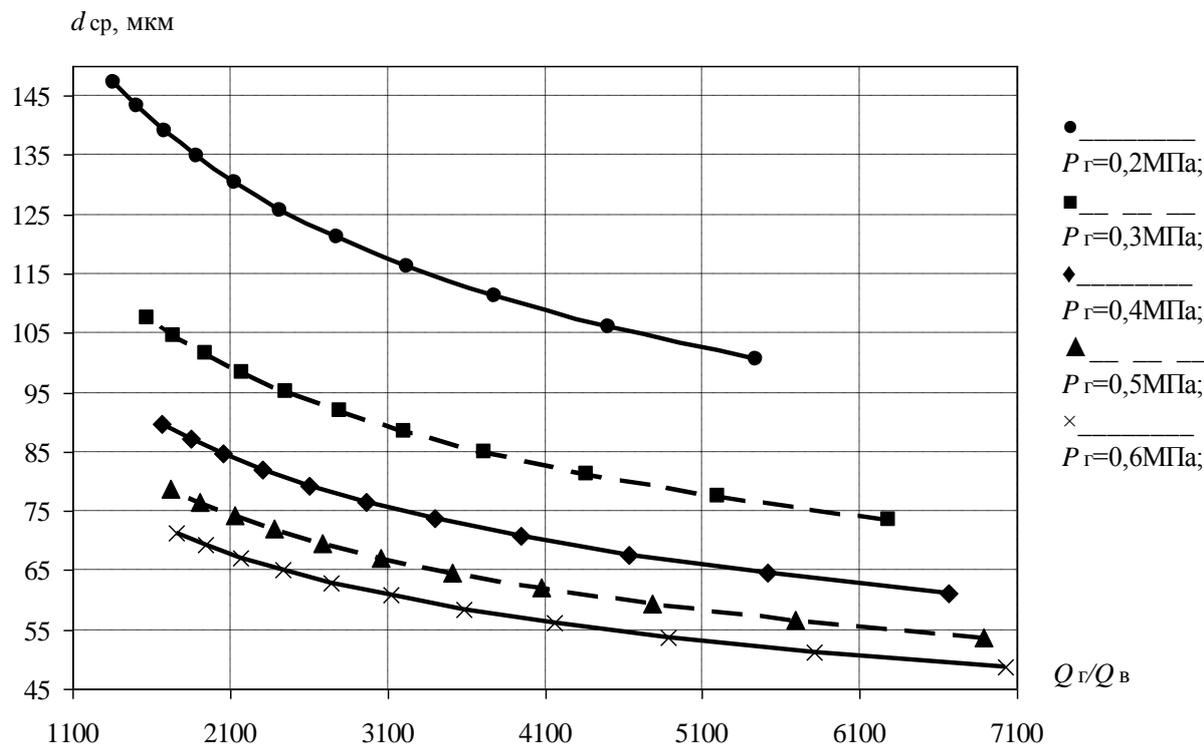


Рис. 2. Зависимость среднего диаметра капель воды  $d_{\text{ср}}$  от соотношения объемных расходов воздуха и воды  $Q_r/Q_v$  при различном давлении воздуха перед кольцевой щелью  $P_r$

При расчете по выражениям (1–9) получена зависимость среднего диаметра капель воды  $d_{\text{ср}}$  от соотношения объемных расходов воздуха и воды  $Q_r/Q_v=1500\text{--}7000$  (рис. 2).

Анализ результатов расчета показывает, что водогазовые форсунки применимы для получения ТРВ (рис. 2). Средний диаметр распыленных капель  $d_{\text{ср}} < 100$  мкм при  $Q_r/Q_v > 2000$  наблюдается при давлении воздуха перед кольцевой щелью  $P_r > 0,3$  МПа, а капли с размером  $d_{\text{ср}} < 80$  мкм – при  $P_r > 0,4$  МПа. Увеличение соотношения объемного расхода воздуха к объемному расходу воды  $Q_r/Q_v$  от 1500 до 7000 обеспечивает уменьшение среднего диаметра капель на 30 %. Дальнейший рост объемного расхода воздуха к объемному расходу воды  $Q_r/Q_v$  к существенному снижению размера капель не приводит. Водогазовые форсунки позволяют получать капли только со средним диаметром более 50 мкм.

С ростом давления воздуха перед кольцевой щелью  $P_r$  интенсивность уменьшения среднего диаметра капель  $d_{\text{ср}}$  снижается. Так, при увеличении давления воздуха перед кольцевой щелью  $P_r$  от 0,2 МПа до 0,4 МПа средний диаметр капель  $d_{\text{ср}}$  уменьшается на 35 %. При росте давления воздуха перед кольцевой щелью  $P_r$  от 0,4 МПа до 0,6 МПа средний диаметр капель  $d_{\text{ср}}$  снижается только на 17 %.

Таким образом, для эффективного пожаротушения ТРВ применимы водогазовые форсунки с давлением газа перед кольцевой щелью  $P_r=0,4\text{--}0,6$  МПа, обеспечивающие средний диаметр капель распыленной воды  $d_{\text{ср}} < 80$  мкм.

## Результаты исследования и их обсуждение

В замкнутых пространствах на начальной стадии возгорания эффективно пожаротушение ТРВ, характеризуемой средним диаметром капель менее 80 мкм. Такие капли имеют большую наружную площадь поверхности и обеспечивают интенсивный отвод тепла в зоне орошения.

Проведен анализ водогазовых форсунок, показавший их применимость для получения ТРВ. Водогазовые форсунки обеспечивают интенсивное охлаждение очага возгорания при минимальном расходе воды за короткое время. Приведено выражение (1) для оценки размера капель, полученных при распылении с помощью водогазовой форсунки.

Представлена методика расчета среднего диаметра капель при распылении водогазовыми форсунками. Получена зависимость среднего диаметра капель от параметров распыления водогазовой форсункой. Установлено, что капли с размерами  $d_{cp} < 80$  мкм образуются при распылении водогазовыми форсунками при давлении газа перед кольцевой щелью  $P_r = 0,4–0,6$  МПа и соотношении объемных расходов газа и воды  $Q_r/Q_v > 2000$ . Получение с помощью водогазовых форсунок капель со средним диаметром менее 50 мкм проблематично.

Цель исследования можно считать достигнутой – дана теоретическая оценка среднего диаметра капель ТРВ, образованных водогазовой форсункой.

## Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В замкнутых пространствах эффективно пожаротушение ТРВ со средним диаметром капель менее 80 мкм.
2. Получены зависимости среднего диаметра капель воды от соотношения объемных расходов воздуха и воды при различном давлении воздуха перед кольцевой щелью.
3. Для формирования капель ТРВ с размером менее 80 мкм применимы водогазовые форсунки с давлением газа перед кольцевой щелью от 0,4 до 0,6 МПа и отношением объемного расхода газа к объемному расходу воды более 2000.

Таким образом, показана применимость водогазовых форсунок для пожаротушения ТРВ.

## Список источников

1. Филиппов А.Г. Перспективы применения модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой // Алгоритм безопасности. 2016. № 5. С. 46–48.
2. Крапивин В.Ю., Бледнов Д.А., Зубков П.А. Система пожаротушения тонкораспыленной водой высокого давления // Морской сборник. 2018. № 11 (2060). С. 69–74.
3. Доминюк О.В., Панов С.Ю. Эффективность нейтрализации токсичных продуктов горения системы пожаротушения тонкораспыленной водой // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. Т. 1. С. 194–196.
4. Пефтибай Г.И., Галухин Н.А., Ефименко В.Л. Анализ ранцевых устройств пожаротушения тонкораспыленной водой // Вестник Академии гражданской защиты. 2019. № 1 (17). С. 68–73.
5. Обласова О.Н., Дубровина О.Б. Системы автоматического пожаротушения тонкораспыленной водой для высокостеллажных складов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2019. № 2 (206). С. 28–30.
6. Гергель В.И., Мешалкин Е.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой высокого давления // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 3. С. 45–49.
7. Особенности пожаротушения в замкнутом объеме тонкораспыленной водой / А.Л. Душкин [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 3. С. 60–69.

8. Динь К.Х., Корольченко А.Я., Охромченко А.С. Пожаротушение тонкораспыленной водой в отсеках высотного здания // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. № 3. С. 63–66.
9. Овчаренко А.Г., Виноградский В.В., Курепин М.О. Совершенствование конструкции оросителя тонкораспыленной воды «Бриз» // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2018. Т. 5. № 3-4. С. 84–88.
10. Оросители водяных и пенных автоматических установок пожаротушения: учеб.-метод. пособие / Л.М. Мешман [и др.] М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2002. 314 с.
11. Казаков А.В., Смирнов Н.В., Гладилин А.В. Исследование гозоводяных составов ультрадисперсного распыла для установок // *Безопасность труда в промышленности*. 2021. № 7. С. 60–65.
12. Андриюшкин А.Ю. Диспергирование жидкостей сверхзвуковым газодинамическим методом (Обзор) // *Конструкции из композиционных материалов*. 2011. № 3. С. 5–26.
13. Андриюшкин А.Ю., Пелех М.Т. Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2012. № 1 (21). С. 64–69.
14. Андриюшкин А.Ю. Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением: монография. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ». 2012. 400 с.

### References

1. Filippov A.G. Perspektivy primeneniya modul'nyh ustanovok pozharotusheniya tonkoraspylennoj vodoj // *Algoritm bezopasnosti*. 2016. № 5. S. 46–48.
2. Krapivin V.Yu., Blednov D.A., Zubkov P.A. Sistema pozharotusheniya tonkoraspylennoj vodoj vysokogo davleniya // *Morskoj sbornik*. 2018. № 11 (2060). S. 69–74.
3. Dominyuk O.V., Panov S.Yu. Effektivnost' neytralizacii toksichnyh produktov goreniya sistemy pozharotusheniya tonkoraspylennoj vodoj // *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij*. 2018. T. 1. S. 194–196.
4. Peftibaj G.I., Galuhin N.A., Efimenko V.L. Analiz rancevyh ustrojstv pozharotusheniya tonkoraspylennoj vodoj // *Vestnik Akademii grazhdanskoj zashchity*. 2019. № 1 (17). S. 68–73.
5. Oblasova O.N., Dubrovina O.B. Sistemy avtomaticheskogo pozharotusheniya tonkoraspylennoj vodoj dlya vysokostellazhnyh skladov // *Santekhnika, Otoplenie, Kondicionirovanie*. 2019. № 2 (206). S. 28–30.
6. Gergel' V.I., Meshalkin E.A. Pozharotushenie tonkoraspylennoj vodoj vysokogo davleniya // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2017. T. 26. № 3. S. 45–49.
7. Osobennosti pozharotusheniya v zamknutom ob"eme tonkoraspylennoj vodoj / A.L. Dushkin [i dr.] // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2017. T. 26. № 3. S. 60–69.
8. Din' K.H., Korol'chenko A.Ya., Ohromenko A.S. Pozharotushenie tonkoraspylennoj vodoj v otsekah vysotnogo zdaniya // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2013. T. 22. № 3. S. 63–66.
9. Ovcharenko A.G., Vinogradskij V.V., Kurepin M.O. Sovershenstvovanie konstrukcii orositelya tonkoraspylennoj vody «Briz» // *Aktual'nye problemy v mashinostroenii*. 2018. T. 5. № 3-4. S. 84–88.
10. Orositeli vodyanyh i pennnyh avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya: ucheb.-metod. posobie / L.M. Meshman [i dr.] M.: FGU VNIPO MCHS Rossii, 2002. 314 s.
11. Kazakov A.V., Smirnov N.V., Gladilin A.V. Issledovanie gozovodyanyh sostavov ul'tradispersnogo raspyla dlya ustanovok // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2021. № 7. S. 60–65.
12. Andryushkin A.Yu. Dispergирование жидкостей сверхзвуковым газодинамическим методом (Обзор) // *Конструкции из композиционных материалов*. 2011. № 3. S. 5–26.
13. Andryushkin A.Yu., Pelekh M.T. Effektivnost' pozharotusheniya tonkoraspylennoj vodoj // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2012. № 1 (21). S. 64–69.
14. Andryushkin A.Yu. Formirovanie dispersnyh sistem sverhzhvukovym gazodinamicheskim raspyleniem: monografiya. SPb.: BGTU «VOENMEKH». 2012. 400 s.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 07.11.2023; одобрена после рецензирования: 08.01.2024;  
принята к публикации: 10.01.2024

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 07.11.2023; approved after review: 08.01.2024;  
accepted for publication: 10.01.2024

*Информация об авторах:*

**Андрюшкин Александр Юрьевич**, заведующий кафедрой А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1), доцент, кандидат технических наук, e-mail: [Sascha1a@mail.ru](mailto:Sascha1a@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7812-069X>, SPIN-код: 7905-9345

**Хмелевской Никита Юрьевич**, магистрант кафедры А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1), e-mail: [nkhmelevskof@gmail.com](mailto:nkhmelevskof@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0002-7094-6224>

**Кадочникова Елена Николаевна**, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института (военно-системных исследований материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева (191123, Санкт-Петербург, Воскресенская набережная, д. 10 А), доцент, кандидат технических наук, e-mail: [vf10@yandex.ru](mailto:vf10@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4577-390X>, SPIN-код: 9778-4011

*Information about the authors:*

**Andryushkin Alexander Yu.**, head of the A2 department «Technologies of structural materials and production of rocket and space technology» of the D.F. Ustinov Baltic state technical university «VOENMEH» (190005, Saint-Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1), associate professor, candidate of technical sciences, e-mail: [Sascha1a@mail.ru](mailto:Sascha1a@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7812-069X>, SPIN: 7905-9345

**Khmelevskoy Nikita Yu.**, master's student of the A2 Department «Technologies of structural materials and production of rocket and space technology» of the D.F. Ustinov Baltic state technical university «VOENMEH» (190005, Saint-Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1), e-mail: [nkhmelevskof@gmail.com](mailto:nkhmelevskof@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0002-7094-6224>

**Kadochnikova Elena N.**, senior researcher at the Research institute (military system research of logistics of the Armed Forces of the Russian Federation) of Military academy of logistics named after general of the army A.V. Khrulev (191123, Saint-Petersburg, Voskresenskaya Embankment, 10 A), associate professor, candidate of technical sciences, e-mail: [vf10@yandex.ru](mailto:vf10@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4577-390X>, SPIN: 9778-4011