

Научная статья  
УДК 336.132.1  
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.36.60.017

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДНЫХ ЗАВЕС ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

**Ринат Валерьевич Халиков**<sup>1</sup>

**Егор Николаевич Исаенко**<sup>2</sup>

**Дана Анзоровна Шокарова**<sup>3</sup>

**Юлия Николаевна Коваль**<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия,

<sup>4</sup> Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия,

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0842-4989>

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0009-0002-4307-7529>

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0009-0001-0364-4253>

<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5482-6439>

**Автор ответственный за переписку:** Юлия Николаевна Коваль, [a\\_yulya@inbox.ru](mailto:a_yulya@inbox.ru)

**Аннотация.** Ежегодно в Российской Федерации более 30% площади всего лесного фонда подвергаются воздействию пожаров. Объекты, находящиеся в непосредственной близости от лесных пожаров, воспламеняются из-за исходящих тепловых потоков. Для защиты данных объектов в 90% случаев применяются водные завесы. В рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования по определению оптимального диаметра капель распылённых струй воды для защиты объектов от лесных пожаров. Создана модель движения капли в условиях высоких тепловых потоков, она предназначена для определения диаметра капли воды и водных растворов, при котором период ее испарения совпадает со временем, необходимым для прохождения капли через высокотемпературные тепловые потоки пожара. Согласно полученным результатам экспериментального исследования, начиная с 7 минуты, происходило эффективное ослабление тепловых потоков от горения древесины. Стоит отметить, что изменение фиксируемой температуры с 480°C до 100°C происходит менее чем за минуту. Проведенной серией моделирования было установлено, что для наиболее эффективного снижения тепловых потоков от лесных пожаров необходимо создавать распыление с диаметром капель порядка 150-200 мкм.

**Ключевые слова:** лес, лесной пожар, снижение тепловых потоков, пожаротушение, моделирование, высокодисперсные системы

**Для цитирования:** Халиков Р.В., Исаенко Е.Н., Шокарова Д.А., Коваль Ю.Н. Экспериментальное исследование эффективности водных завес для защиты от тепловых потоков лесных пожаров // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. № 4 (35). С. 150-160. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.36.60.017>

Original article

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF WATER CURTAINS FOR PROTECTION FROM HEAT FLUXES OF FOREST FIRES

Rinat V. Khalikov<sup>1</sup>

Egor N. Isaenko<sup>2</sup>

Dana A. Shokarova<sup>3</sup>

Yulia N. Koval<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, Russia,

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-0842-4989>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0009-0002-4307-7529>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0001-0364-4253>

<sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0001-5482-6439>

**Corresponding author:** Yulia N. Koval, [a\\_yulya@inbox.ru](mailto:a_yulya@inbox.ru)

**Abstract.** Every year in the Russian Federation, more than 30% of the area of the entire forest fund is exposed to fires. Objects located in the immediate vicinity of forest fires will ignite due to outgoing heat flows. In 90% of cases, water curtains are used to protect these objects. As part of this work, experimental studies were conducted to determine the optimal diameter of droplets of sprayed water jets to protect objects from forest fires. A model of the movement of a drop in conditions of high heat flows has been created, it is designed to determine the diameter of a drop of water and aqueous solutions, at which the period of its evaporation coincides with the time required for the drop to pass through the high-temperature heat flows of a fire. According to the results of the experimental study, starting from 7 minutes, there was an effective weakening of heat fluxes from gorenje wood. It is worth noting that the change in the fixed temperature from 480°C to 100°C occurs in less than a minute.

**Keywords:** forest, forest fire, reduction of heat flows, firefighting, modeling, highly dispersed systems

**For citation:** Khalikov R.V., Isaenko E.N., Shokarova D.A., Koval Yu.N. Experimental study of the effectiveness of water curtains for protection from heat fluxes of forest fires // Siberian Fire and Rescue Bulletin.2024. № 4 (35). С. 150-160. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.36.60.017>

### Введение

Согласно существующей статистике площадь лесных пожаров с 2000 года до 2023 года распределяется неравномерно, однако явно следует отметить тенденцию увеличения (Рис.1). Для тушения масштабных пожаров необходимо максимально задействовать существующие в лесу преграды и границы, а также учитывать их особенности, и учитывать горючую нагрузку окружающих участков [1,3].

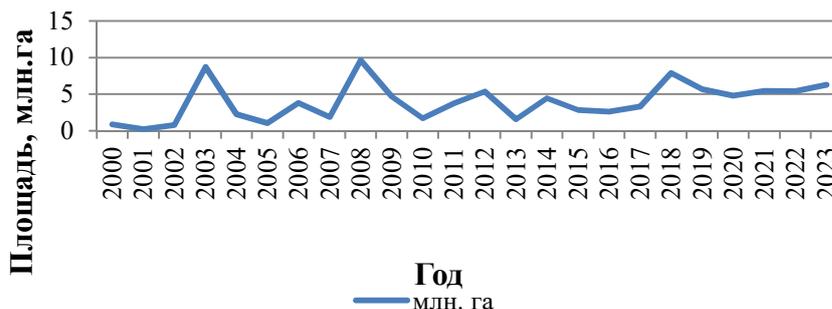


Рис.1. Площадь лесных пожаров в России до 2023 г. млн. га

Процесс борьбы с лесным пожаром можно разбить на несколько ключевых этапов: исследование очага возгорания, ограничение его распространения, локализация, ликвидация и окапывание. Разведка пожара подразумевает определение границ возгорания, а также анализа направленности и скорости его развития в различные моменты суток. На основании анализа динамика развития огня, с учетом текущей ситуации, включая такие природные данные, как реки, ручьи и лощины, разрабатывается план по тушению пожара. Достижение эффективной локализации в первую очередь осуществляется защитой объектов от тепловых потоков. Снижение тепловых потоков от пожара может осуществляться различными способами. Наиболее целесообразным является применение лафетных стволов, но на практике в большинстве применяются ручные стволы. Поэтому, в данной работе было проведено исследование эффективности водных завес для защиты от тепловых потоков лесных пожаров с применением ручных стволов.

### **Теоретические основы явления процесса испарения водных капель при высоких температурах.**

В работе [3-15] предложены модели, позволяющие исследовать процессы, возникающие при движении капель в условиях высокотемпературных потоков. Тем не менее, в этих моделях сделано предположение о постоянстве теплофизических свойств воды, продуктов горения и водяного пара, что является неверным при анализе процесса испарения капель в высокотемпературной среде лесного пожара. Это обусловлено тем, что распыленные водные струи ручных стволов образуют неравномерную плотность распределения капель в пространстве. В дополнение к этому, в моделях, описанных в исследованиях [15-18], не был изучен процесс нагрева капли в зависимости от ее динамических характеристик, что так же необходимо при рассмотрении процессов испарения, так как величина и направление скорости капель варьируется в зависимости от используемых технических средств подачи [1-4]. Следовательно, цель данной работы является определение оптимальных параметров распыления капель при подаче из ручных стволов для снижения плотности тепловых потоков при тушении лесных пожаров.

На первом этапе для решения данной задачи была создана универсальная модель движения капли в условиях интенсивного теплового потока, а также смоделирован процесс формирования водных завес с использованием ручных стволов. На втором этапе были проведены экспериментальные исследования эффективности снижения температуры от модельного очага при использовании водных завес от ручных стволов.

Упрощенная модель движения капли в условиях высоких тепловых потоков предназначена для определения диаметра капли воды и водных растворов, при котором период ее испарения совпадает с временем, необходимым для прохождения капли через высокотемпературные тепловые потоки огня (Рис.2).

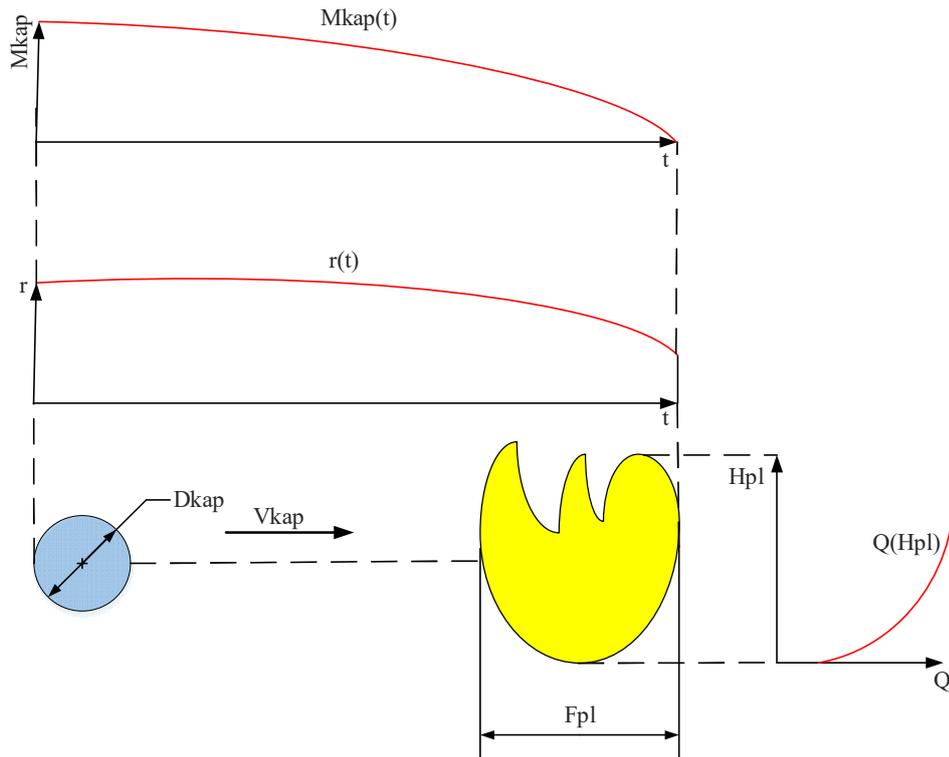


Рис.2. Обобщенная модель движения капли в сильно нагретых тепловых потоках пожара, где:  $D_{кап}$  – размер капли, м;  $V_{кап}$  – скорость, м/с;  $F_{пл}$  – размер пожара, м;  $H_{пл}$  – высота пожара, м;  $Q_{пот}$  – удельное количество тепла от пожара, кВт/(м<sup>2</sup>·с);  $Q(H_{пл})$  – разность величины тепловыделения от высоты пожара, кВт/(м<sup>2</sup>·с);  $t$  – время, с.

Преимуществом разработанной модели по сравнению с известными [13-15] является то, что она учитывает изменение определенной величины испарения, которая зависит от температуры движущихся капель в тепловом потоке (уравнение Клаузиуса-Клапейрона) [16]. Температура капли, в свою очередь, зависит от действующего на нее теплового потока (уравнение 2) и самонагрева капли во время ее движения (уравнение 3).

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta r}{T_{кип}(V_{п} - V_{ж})} \quad (1)$$

где:  $p$  – давление, Па;  $T$  – величина нагрева, °С;  $T_{кип}$  – момент начала интенсивного парообразования, °С;  $V_{п}$  – объем выхода образовавшейся кипящей фазы, м<sup>3</sup>;  $V_{ж}$  – жидкость, м<sup>3</sup>.

Скорость капли определяли по Уравнению 2 [18]:

$$Q_{dviz} = 0,62 \times \lambda_{в} \times t_{нагр} \times \pi \times d^{1,5} \times \sqrt{\frac{V_{кап}}{\nu_{в}}} \quad (2)$$

где:  $\lambda_{в}$  – величина теплопроводности, Вт/(м·К);  $t_{нагр}$  – время кипения капли, с;  $d$  – размер капли, м;  $\nu_{в}$  – вязкость, м<sup>2</sup>/с [19].

Суммарное уравнение выглядит следующим образом:

$$Q_{dviz} + (S_{оч} \times Q_{пот} \times t)dt = (N_{кап} \times M_{кап}) \times (\Delta r + \frac{dC_v}{dT} \times \Delta T) \quad (3)$$

где:  $S_{оч}$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>;  $t$  – время, с;  $N_{кап}$  – капли, ед.;  $\frac{dC_v}{dT}$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\Delta T$  – температура, К.

### Экспериментальное исследование оптимальных параметров распыленных струй воды для тушения лесных пожаров.

В ходе экспериментов созданы следующие условия:

- удельный расход воды,  $q_{\text{воды}}$ , л/с;
- интенсивность подачи,  $I_{\text{тав}}$ , л/(м<sup>2</sup>·с);
- температура на расстоянии 5000 мм от очага,  $T$  °С.

Экспериментальное исследование проводилось на базе 2 ПСО 27 ПСЧ ГУ МЧС России по Белгородской области. Для создания необходимых условий был использован АЦ 6,0 – 40 (5557) (далее – АЦ). Подача огнетушащего вещества происходило через 2 напорных рукава DN50 и ствол РСКУ-50. Эксперименты проводились на улице, специально отведенной площадке в условиях нормальных испытаний. Также в качестве очага был использован очаг 0,1А. Очаг был размещен в центре специального металлического противня. Очаг представлял собой 18 сложенных друг на друга брусков размером 200×200×20 мм, выставленные согласно ГОСТ 8510 (Рис.4). Средняя температура воздуха в момент проведения экспериментального исследования составляла 20°С. Подача водных распыленных струй осуществлялась при полном раскрытии струи для определения эффективности поглощения тепловых потоков подаваемой струей. Для измерения температуры был использован пирометр инфракрасный С-300.3 «ФОТОН» с встроенным запоминающим устройством и лазерным целеуказателем предназначенные для бесконтактного измерения температуры объектов по их тепловому (инфракрасному) излучению (Таблица 1) на расстоянии 5 м от очага. Измерение температуры осуществлялось каждые 15 секунд. Создание водной среды начиналось с 7 минуты.



Рис.3. Пирометр С-300.3 «ФОТОН»



*Рис.4. Общий вид модельного очага 0,1 А*



*Рис.5. Проведение экспериментального исследования*

По результатам экспериментального исследования была получена зависимость температуры от времени (Рис.6).

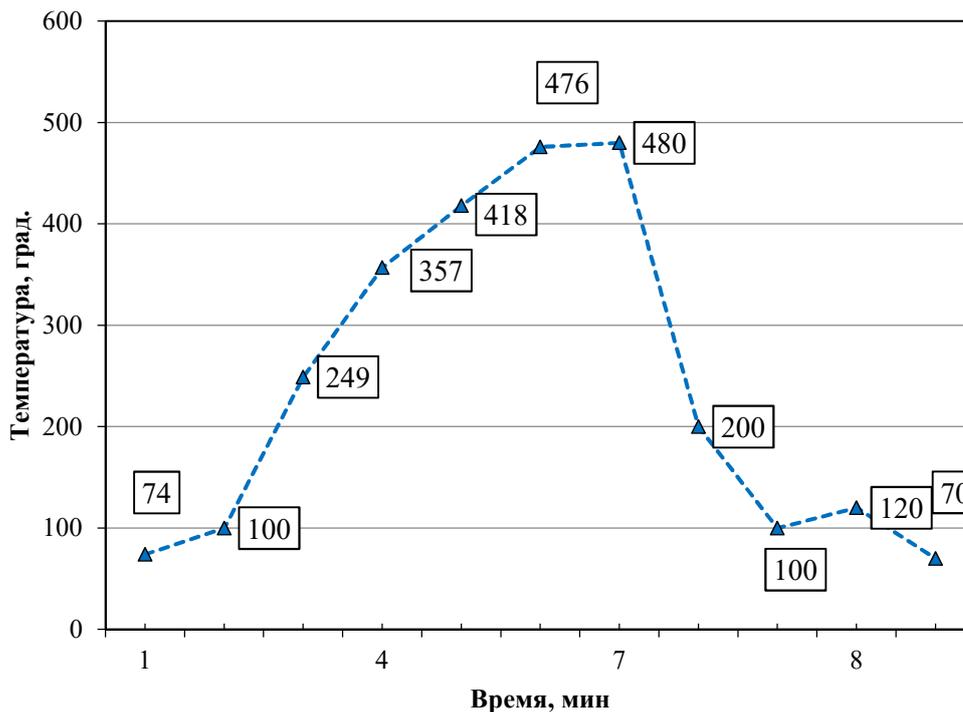


Рис.6. Результаты экспериментального исследования

Согласно полученным результатам экспериментального исследования, начиная с 7 минуты, происходило эффективное ослабление тепловых потоков от горения древесины. Стоит отметить, что изменение фиксируемой температуры с 480°C до 100°C происходит менее чем за минуту. Данный факт объясняется тем, что время формирования создаваемой водной завесы от ручных стволов занимает менее 5 секунд.

### Обсуждения и результаты

Проведенные исследования позволяют утверждать, что постановка водных завес из ручных стволов для защиты от тепловых потоков лесных пожаров является достаточно эффективной. Однако проведённый эксперимент не позволяет установить наиболее эффективные размеры капель для снижения тепловых потоков. Для установления данного факта существует два основных варианта:

Проведение дополнительных натурных экспериментальных исследований по эффективности снижения тепловых потоков для водных завес из различного типа;

Организовать математическое моделирование процесса испарения водных капель в программно-аппаратном комплексе с учетом проведенного экспериментального анализа.

Реализация математического моделирования представляется экономически обоснованной. В соответствии с исходными данными проведённого экспериментального исследования была построена модель в программно-аппаратном комплексе Pyrosim (Рис.7).

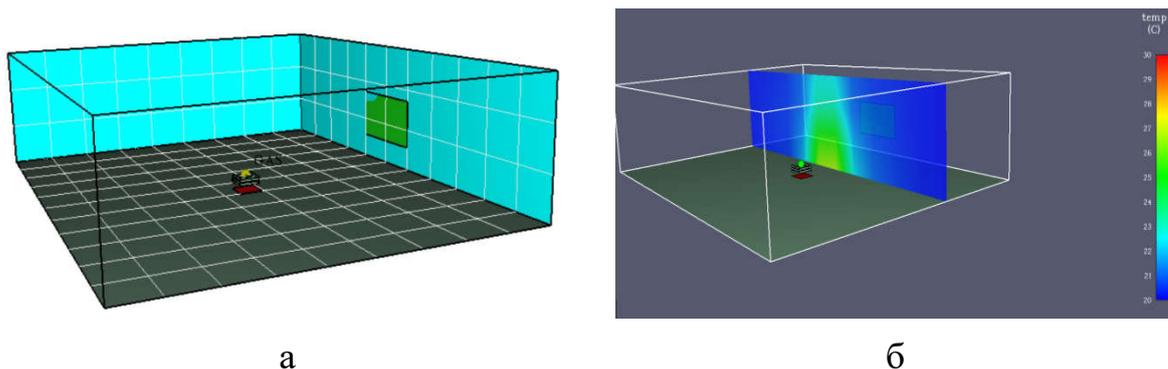


Рис. 7. Результаты экспериментального исследования: а – расчетная модель; б – полученные результаты

Проведенной серией моделирования было установлено, что для наиболее эффективного снижения тепловых потоков от лесных пожаров необходимо создавать распыление с диаметром капель порядка 150-200 мкм.

Таким образом, проведенными исследованиями было установлено, что для эффективной постановки водных завес защиты от тепловых потоков лесных пожаров необходимо выбирать ручные стволы, позволяющие создавать компактную струю с распылением 150-200 мкм.

#### Список источников

1. Кузнецов Г.В., Жданова А.О., Стрижак П.А., Атрошенко Ю.К. Влияние способа подачи воды в зону лесного пожара на эффективность его тушения // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 6. – С. 1513-1522. – EDN EMLTUP.
2. Волков Р. С. Тушение низового лесного пожара путем распыления воды по его кромке / Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, № 3. – С. 807-814. – EDN XMGRDV.
3. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Кузнецов А.Е. [и др.] Повышение эффективности тушения лесных пожаров с использованием добавок к воде // Пожарная безопасность. – 2015. – № 4. – С. 46-50. – EDN VCMJVJ.
4. Azatyan V.V. Suppression of Detonations by Efficient Inhibitors. Gaseous and Heterogeneous Detonations / Azatyan V.V., Wagner G.Gg., Vedeshkin G.K. -M.: ENAS Publishers, 1999. - С. 331– 336.
5. Fleming Suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type / James W. Fleming, Bradley A. Williams and Ronald S. Sheinson / Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section. – 2019. – 21 с.
6. Халиков Р.В. Применение ингибиторов горения для объемного пожаротушения газокompрессорных станций [Текст] / Халиков Р.В. // Материалы I Международной научной конференции «Роль противопожарных служб в решении нетрадиционных угроз безопасности», Вьетнам.: Институт пожарной безопасности МОБ СРВ. – 2020. – С. 1535–1540.
7. Шмаков А.Г. Исследование фосфорорганических, фторорганических, металлсодержащих соединений и твердотопливных газогенерирующих составов с добавками фосфорсодержащих соединений в качестве эффективных пламегасителей. [Электронный ресурс] / Шмаков А.Г., Коробейничев О.П., Шварцберг В.М., Якимов С.А., Князьков Д.А., Комаров В.Ф., Сакович Г.В. // Физика горения и взрыва. – 2006. – № 6. – 10 с. - Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16757038> (дата обращения 12.05.2024).
8. Коробейничев О.П. Применение аэрозольной технологии и эффективных нелетучих пламегасителей для тушения различных типов пожаров. [Электронный ресурс] / Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Чернов А.А., Шварцберг В.М., Куценогий К.П., Марков В.И. // Интерэкспо гео-сибирь. – 2012. – № 3. – 10 с. - Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17980207> (дата обращения 12.05.2024).

9. Высокоморная О.В. Численное исследование влияния условий распыления воды на температуру в следе «Водяного снаряда» / Высокоморная О.В., Марков А.О., Назаров М.Н., Стрижак П.А., Янов С.Р. // Известия ТПУ. 2013. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-issledovanie-vliyaniya-usloviy-raspyleniya-vody-na-temperaturu-v-slede-vodyanogo-snaryada> (дата обращения 12.05.2024).
10. Стрижак П.А. Численный анализ диффузионно-конвективных процессов тепломассопереноса при движении капель воды через высокотемпературные продукты сгорания / Стрижак П.А. // Пожаровзрывобезопасность. 2013. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennyy-analiz-diffuzionno-konvektivnyh-protsessov-teplomassoperenosa-pri-dvizhenii-kapel-vody-cherez-vysokotemperaturnye> (дата обращения 12.05.2024).
11. Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние распределения капель воды в "водяном снаряде" на температуру в его следе / Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // Пожаровзрывобезопасность. 2013. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raspredeleniya-kapel-vody-v-vodyanom-snaryade-na-temperaturu-v-ego-slede> (дата обращения 12.05.2024).
12. Розенцвайг А.К. Кипение капель низкокипящей дисперсной фазы в режиме гетерогенной нуклеации / Розенцвайг А.К., Страшинский Ч.С. // Инновационная наука. 2016. №11-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kipenie-kapel-nizkokipyaschey-dispersnoy-fazy-v-rezhime-geterogennoy-nukleatsii> (дата обращения 12.05.2024).
13. Хасанов Р.М. Исследование интенсивности теплового излучения в зависимости от очага пожара и площади разлива, легко воспламеняющихся жидкостей и горючих веществ / Хасанов Р.М., Лиштаков А.А., Чистов Ю.С. // Вестник Казанского технологического университета. 2017. №16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-intensivnosti-teplovogo-izlucheniya-v-zavisimosti-ot-ochaga-pozhara-i-ploschadi-rozлива-legko-воспламеняющихся> (дата обращения 12.05.2024).
14. Дахин С.В. К определению относительной скорости капли жидкости в потоке газа / Дахин С.В., Дроздов И.Г., Шматов Д.П. // Вестник ВГТУ. 2013. №5-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-otnositelnoy-skorosti-kapli-zhidkosti-v-potoke-gaza> (дата обращения 12.05.2024).
15. Маркус Е.С. Численное моделирование распространения пламени по дискретной совокупности горючих материалов / Маркус Е.С., Снегирев А.Ю., Кузнецов Е.А., Танклевский Л.Т., Аракчеев А.В. // Пожаровзрывобезопасность. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-rasprostraneniya-plameni-po-diskretnoy-sovokupnosti-goryuchih-materialov> (дата обращения 12.05.2024).
16. Бородай С.П. Экспериментальные исследования структуры пламени и его воздействия на ограждающие судовые конструкции [Электронный ресурс] / Бородай С.П., Летин А.Н., Шедько С.В. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. №2 (392). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-struktury-plameni-i-ego-vozdeystviya-na-ograzhdayuschie-sudovye-konstruktsii> (дата обращения 12.05.2024).
17. Пузач С.В. К определению высоты пламенной зоны при диффузионном горении жидкости [Электронный ресурс] / Пузач С.В., Абакумов Е.С. // Пожаровзрывобезопасность. 2012. №2. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-vysoty-plamennoy-zony-pri-diffuzionnom-gorenii-zhidkosti-1> (дата обращения 12.05.2024).
18. Daniel T., Joseph T., Frederick W. Fire dynamic of spill fires Spill Fires. — 2000. — С. 1–36.

## References

1. Roenko V.V., Khalikov R.V. Pozharovzryvobezopasnost closed spaces of objects of gas compressor stations. // Fires and emergencies: prevention, elimination. 2020. №. 1. pp. 30-35. DOI: 10.25257/FE. 2020.1.30-35.
2. Azatyan V.V. Features of physico-chemical mechanisms and kinetic laws of gorenje, vzrast i detonatsii gazov [Features of physico-chemical mechanisms and kinetic regularities of combustion, explosion and detonation of gases]. 2020. №. 3 Vol. 61 pp. 291-311.

3. Liu H, Wang F Research on N<sub>2</sub>-inhibitor-water mist fire prevention and extinguishing technology and equipment in coalmine goaf, PLoS ONE № 14(9), 2019, pp. 1-21.
4. Azatyan, V.V. Suppression of Detonations by Efficient Inhibitors. Gaseous and Heterogeneous Detonations / Azatyan V.V., Wagner G. Gg., Vedeshkin G.K. -M.: ENAS Publishers, 1999. - PP. 331– 336.
5. Fleming Suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type / James W. Fleming, Bradley A. Williams and Ronald S. Sheinson./ Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section. – 2019. – 21 PP.
6. Khalikov R.V. The use of flame inhibitors for volumetric fire extinguishing of gas compressor stations [Text] / Khalikov R.V. // Proceedings of the I International Scientific conference "The role of fire services in solving non-traditional security threats", Vietnam.: Institute of Fire Safety, SRV. - 2020. - pp. 1535-1540.
7. Shmakov A.G. Investigation of organophosphorus, organofluorine, metal-containing compounds and solid-fuel gas-generating compositions with additives of phosphorous-containing compounds as effective flame arresters. [Electronic resource] / Shmakov A.G., Korobeinichev O.P., Shvartsberg V.M., Yakimov S.A., Knyazkov D.A., Komarov V.F., Sakovich G.V. // Physics of gorenje i vzraza. - 2006. - №. 6 – - 10 pp. - Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16757038> (accessed 12.05.2024).
8. Korobeinichev O.P. Application of aerosol technology and effective non-volatile flame extinguishers for extinguishing various types of fires. [Electronic resource] / Korobeinichev O.P., Shmakov A.G., Chernov A.A., Shvartsberg V.M., Kutsenogiy K.P., Markov V.I. // Interexpo geosiberia. - 2012. - №. 3 – - 10 pp. - Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17980207> (accessed 15.04.2024).
9. Vysokomornaya O.V., Markov A.O., Nazarov M.N., Strizhak P.A., Yanov S.R. Numerical study of the influence of water atomization conditions on the temperature in the wake of a "Water projectile" / Izvestiya TPU. 2013. №. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-issledovanie-vliyaniya-usloviy-raspyleniya-vody-na-temperaturu-v-slede-vodyanogo-snaryada> (accessed 12.05.2024).
10. Strizhak P.A. Numerical analysis of diffusion-convective processes of heat and mass transfer in the movement of water droplets through high-temperature combustion products / Strizhak P.A. / Pozharovzryvobezopasnost. 2013. №. 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislenny-analiz-diffuzionno-konvektivnyh-protsesov-teplomassoperenosa-pri-dvizhenii-kapel-vody-cherez-vysokotemperaturnye> (accessed 12.05.2024).
11. Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of water droplet distribution in a "water projectile" on the temperature in its wake / Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. / Pozharovzryvobezopasnost. 2013. №. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raspredeleniya-kapel-vody-v-vodyanom-snaryade-na-temperaturu-v-ego-slede> (accessed 12.05.2024).
12. Rosenzweig A.K. Boiling of low-boiling dispersed phase droplets in the mode of heterogeneous nucleation / Rosenzweig A.K., Strashinsky Ch.S. // Innovative science. 2016. №. 11-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kipenie-kapel-nizkokipyaschey-dispersnoy-fazy-v-rezhime-eterogennoy-nukleatsii> (accessed 12.05.2024).
13. Khasanov R.M., Lishtakov A.A., Chistov Yu.S. Study of the intensity of thermal radiation depending on the fire source and the area of filling of highly flammable liquids and combustible substances. 2017. №. 16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-intensivnosti-teplovogo-izlucheniya-v-zavisimosti-ot-ochaga-pozhara-i-ploschadi-rozliva-legko-voisplameniyayuschih-sya> (accessed 12.05.2024).
14. Dakhin S.V. K opredeleniyu relative velocity of a liquid drop in a gas flow / Dakhin S.V., Drozdov I.G., Shmatov D.P. // Vestnik VSTU. 2013. No. 5-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-otnositelnoy-skorosti-kapli-zhidkosti-v-potoke-gaza> (accessed 12.05.2024).
15. Markus E.S. Numerical modeling of flame propagation over a discrete set of combustible materials / Markus E.S., Snegirev A.Yu., Kuznetsov E.A., Tanklevsky L.T., Arakcheev A.V. // Fire and explosion safety. 2019. №. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-rasprostraneniya-plameni-po-diskretnoy-sovokupnosti-goryuchih-materialov> (accessed 12.05.2024).
16. Borodai S.P. Experimental studies of the structure of the flame and its impact on the enclosing ship structures [Electronic resource] / Borodai S.P., Letin A.N., Shedko S.V. // Trudy

Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2020. №2 (392). - Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-struktury-plameni-i-ego-vozdeystviya-na-ograzhdayuschie-sudovye-konstruktsii> (accessed 12.05.2024).

17. Puzach S.V. К определению вышениа пламенной зоны при диффузионном гorenje zhidki [Electronic resource] / Puzach S.V., Abakumov E.S. // Pozharovzryvobezопасnost. 2012. №. 2. Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-vysoty-plamennoy-zony-pri-diffuzionnom-gorenii-zhidkosti-1> (accessed 12.05.2024).

18. Daniel T., Joseph T., Frederick W. Fire dynamic of spill fires Spill Fires. — 2000. — pp. 1–36.

Информация об авторах

Р.В. Халиков – кандидат технических наук

Ю.Н. Коваль – кандидат биологических наук, доцент

Information about the authors

R.V. Khalikov – Ph.D. of Engineering Sciences

Yu.N. Koval – Ph.D. of Biological Sciences, Associate Professor

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.11.2024, одобрена после рецензирования 02.12.2024, принята к публикации 04.12.2024.

The article was submitted 18.11.2024, approved after reviewing 02.12.2024, accepted for publication 04.12.2024.