

## Исследование комплексных ингибирующих составов для объемного пожаротушения водными средами

Ринат Валерьевич Халиков , Антон Дмитриевич Корольченко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Одной из основных проблем современного объемного пожаротушения водными средами является применение средств, имеющих один механизм тушения. Введение водорастворимых ингибиторов в водные среды является наиболее эффективным способом повышения их огнетушащей способности. Однако на данный момент отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования по установлению повышения огнетушащей эффективности водных сред при введении двух и более ингибиторов.

**Цель.** Исследование влияния введения двух и более водорастворимых ингибиторов на огнетушащую эффективность водных сред.

**Методика исследования.** При выборе комплексных ингибирующих составов был применен метод анализа и синтеза. Для проверки адекватности составленной модели была применена методика валидации математических моделей. Для определения эффективной концентрации комплексных ингибиторов была использована теория математического анализа. Оценка эффективности введения комплексного ингибирующего состава проведена математическим моделированием в среде FDS.

**Теоретические основы.** Выбор комплексного ингибирующего состава осуществлен в соответствии с теорией разветвленно-цепных процессов горения.

**Результаты и обсуждение.** Разработана математическая модель подавления горения в замкнутом объеме комплексными водорастворимыми ингибиторами. Проведена успешная валидация данной модели на основании имеющихся экспериментальных данных. Проведено математическое моделирование подавления горения водными растворами: сульфата аммония и хлорида магния, карбоната калия и ацетата калия.

**Выводы.** Проведенными исследованиями установлено, что эффективная массовая концентрация комплексного ингибитора сульфата аммония и хлорида магния в водном растворе соответствует значению 3,4 %, что более чем в 4 раза меньше эффективной концентрации каждого из веществ, взятого в отдельности. Двухкомпонентный ингибитор карбоната калия и ацетата калия являются взаимоподавляющими и не приводят к подавлению горения химическим ингибирированием. Уменьшение времени подавления при увеличении концентрации карбоната калия и ацетата калия происходит по причине увеличения выделения углекислого газа в результате термического разложения данных ингибиторов.

**Ключевые слова:** температурно-активированная вода; подавление горения; моделирование; валидация

**Для цитирования:** Халиков Р.В., Корольченко А.Д. Исследование комплексных ингибирующих составов для объемного пожаротушения водными средами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 2. С. 60–68. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.60-68

 Халиков Ринат Валерьевич, e-mail: vokilah@rambler.ru

## Investigation of complex inhibiting compositions for volumetric fire extinguishing with aqueous media

Rinat V. Khalikov , Anton D. Korolchenko

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** One of the main problems of modern volumetric fire extinguishing with aqueous media is the use of agents having a single extinguishing mechanism. Introduction of water-soluble inhibitors into aqueous media is the most effective way to increase their extinguishing ability. However, at the moment there are no theoretical and experimental studies to establish the increase of fire extinguishing efficiency of aqueous media with the introduction of two or more inhibitors.

**Purpose.** To study the effect of introduction of two and more water-soluble inhibitors on the fire-extinguishing efficiency of aqueous media.

**Materials and methods.** The method of analysis and synthesis was applied for the selection of complex inhibitory compositions. The method of validation of mathematical models was applied to check the adequacy of the compiled model. The theory of mathematical analysis was used to determine the effective concentration of complex inhibitors. The evaluation of the effectiveness of the introduction of complex inhibitor composition was carried out by mathematical modelling in FDS environment.

**Theoretical bases.** The choice of complex inhibitory composition was carried out in accordance with the theory of branched chain combustion processes.

**Results and discussions.** A mathematical model of combustion suppression in a closed volume by complex water-soluble inhibitors has been developed. Successful validation of this model on the basis of available experimental data has been carried out. Mathematical modelling of combustion suppression by aqueous solutions of: ammonium sulphate and magnesium chloride, potassium carbonate and potassium acetate was carried out.

**Conclusions.** It has been established by the conducted studies that the effective mass concentration of the complex inhibitor of ammonium sulphate and magnesium chloride in aqueous solution corresponds to the value of 3.4 %, which is more than 4 times less than the effective concentration of each of the substances taken separately. The two-component inhibitor of potassium carbonate and potassium acetate are mutually suppressive and do not lead to suppression of combustion by chemical inhibition. Decrease of suppression time with increasing concentration of potassium carbonate and potassium acetate occurs due to increase of carbon dioxide release, as a result of thermal decomposition of these inhibitors.

**Keywords:** temperature-activated water; validation; combustion suppression; modelling

**For citation:** Khalikov R.V., Korolchenko A.D. Investigation of complex inhibiting compositions for volumetric fire extinguishing with aqueous media *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(2):60-68. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.60-68 (rus).

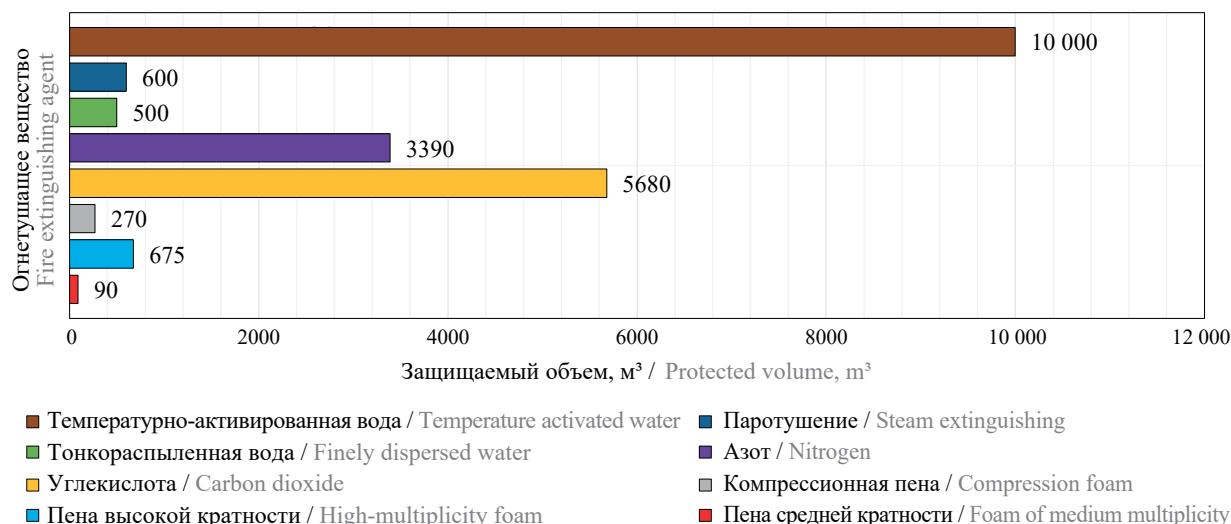
✉ Rinat Valerievich Khalikov, e-mail: vokilah@rambler.ru

## Введение

Температурно-активированная вода (далее — ТАВ) занимает ведущее место среди технологий объемного пожаротушения благодаря своей высокой эффективности [1–3]. Данная среда представляет собой гетерогенную смесь, включающую монодисперсные паровые частицы и полидисперсные капли, что обеспечивает комбинированное воздействие на очаг возгорания [4]. Генерация струй ТАВ осуществляется через процесс взрывного вскипания, возникающий при резком снижении давления в суженной части ствола. Это приводит к мгновенному переходу перегретой воды ( $160\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 20 атм) из метастабильного состояния в двухфазную струю [5, 6].

Основной механизм огнетушащего действия ТАВ связан с подавлением тепловой энергии пламени. Однако максимальная результативность достигается при комбинации термического охлаждения и химического ингибирирования, направленного на нейтрализацию активных радикалов, участвующих в разветвленно-цепных реакциях горения (далее — РЦП)<sup>1</sup> [7]. Сравнительный анализ средств пожаротушения (рис. 1) выявил, что ТАВ обеспечивает защиту более обширных замкнутых пространств.

<sup>1</sup> Storesund K.L. Fire incidents and potential fire incidents on Norwegian oil and gas installations. SPFR Report, 2015. URL: [https://www.researchgate.net/publication/325869491\\_Fire\\_incidents\\_and\\_potential\\_fire\\_incidents\\_on\\_Norwegian\\_oil\\_and\\_gas\\_installations](https://www.researchgate.net/publication/325869491_Fire_incidents_and_potential_fire_incidents_on_Norwegian_oil_and_gas_installations) (дата обращения: 10.06.2020).



**Рис. 1.** Зависимость защищаемого объема от типа огнетушащего агента

Fig. 1. Dependence of the protected volume on the type of extinguishing agent

Для поддержания эффективности пожаротушения струями ТАВ при уровне негерметичности помещения до 0,2 рекомендуется введение в перегретую воду растворимых ингибиторов, модифицирующих свойства струи [5, 8–10].

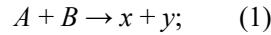
Критическим фактором успешного применения ТАВ является полное испарение капель в зоне горения, что достигается за счет оптимизации дисперсного состава [11, 12]. Технические решения, генерирующие струи с преобладанием наноразмерных капель (диаметр порядка 0,01 мкм), усиливают охлаждение и доставку ингибиторов. Однако преждевременное испарение таких частиц до контакта с пламенем может снизить термическое воздействие и ограничить транспортировку активных компонентов в очаг [13, 14].

### **Методика исследования и теоретические основы поставленной задачи.**

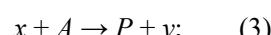
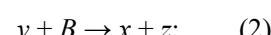
#### **Выбор объекта моделирования**

В рамках анализа механизмов ингибирования процессов горения ключевая роль отводится теоретическим основам РЦП, где термальный фактор саморазогрева не выступает доминирующим параметром, что исключает доминирование механизма тушения, основанного на тепловом отводе<sup>1</sup> [6, 15]. Математическое моделирование РЦП для горючих систем предполагает последовательность элементарных стадий, описываемых следующими кинетическими уравнениями:

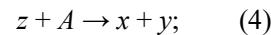
Инициирование цепей  
(генерация первичных  
радикалов)



Разветвление цепей  
(образование бирадикала,  
регенерация активных  
центров)



Продолжение цепей  
(продуктообразующая  
стадия)



Обрыв цепей  
(лимитирующая стадия  
в отсутствие ингибиторов)



где  $A, B$  — реагенты (горючее и окислитель);

$x, y$  — монорадикалы;

$z$  — бирадикал;

$P$  — конечные продукты реакции.

На начальной стадии (1) формируются активные промежуточные частицы (радикалы), выступающие носителями цепей. Последующие стадии (2–5) характеризуются экспоненциальным ростом концентрации радикалов, что обуславливает развитие неуправляемого цепного процесса с разветвлением цепей [11, 16, 17]. Кинетика процесса лимитируется конкуренцией между реакциями продолжения/разветвления

цепей и их обрыва, причем скорость гибели радикалов в базовом сценарии на порядки ниже скорости их генерации.

Принцип действия ингибиторов заключается во внедрении в систему химических агентов, селективно взаимодействующих с активными центрами (радикалами) через реакции квазимолекулярного обрыва. Это приводит к снижению концентрации радикалов ниже критического порога  $R_{kp}$ , при котором выполняется условие:

$$k_{ob} \cdot R_{kp} \geq k_{gen} \cdot [A, B], \quad (6)$$

где  $k_{ob}$ ,  $k_{gen}$  — константы скоростей генерации и гибели радикалов соответственно.

Достижение данного условия индуцирует подавление цепного механизма за счет доминирования процессов дезактивации активных частиц [18–20].

Для оценки эффективности ингибирующих составов на основе водорастворимых солей в условиях замкнутого объема необходимо учитывать как физико-химические свойства растворов, так и параметры подавления пламени [21, 22]. Ниже рассмотрим основные контролируемые параметры при проведении математического моделирования процесса пожаротушения различными ингибирующими веществами.

1. Минимальная огнетушащая концентрация (далее — МГК):

$$C = \frac{m_{inh}}{V_{p-pa}}, \quad (7)$$

где  $m_{inh}$  — масса ингибирующего вещества, г;

$V_{p-pa}$  — объем раствора ингибитора, поданного на тушение, л.

2. Время тушения:

$$\Delta t = t_1 - t_0, \quad (8)$$

где  $t_1$  — момент времени окончания подачи огнетушащего состава, мин;

$t_0$  — момент времени начала подачи огнетушащего состава, мин.

3. Изменение средней температуры на высоте рабочей зоны в исследуемом объеме тушения:

$$\Delta T = T_0 - T_1, \quad (9)$$

где  $T_0$  — средняя температура на высоте рабочей зоны в исследуемом объеме на момент начала подачи огнетушащего вещества, °С;

$T_1$  — средняя температура на высоте рабочей зоны в исследуемом объеме на момент окончания подачи огнетушащего вещества, °С.

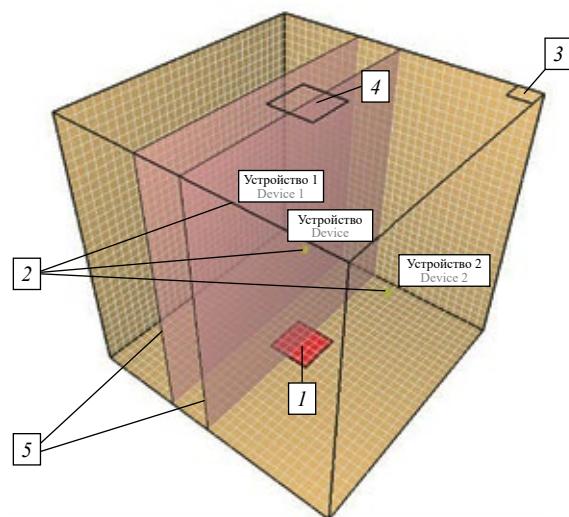
4. Скорость снижения температуры в замкнутом объеме:

$$K_{\text{инг}} = \frac{\Delta T}{\Delta t}. \quad (10)$$

Для моделирования подавления горения комплексными ингибиторами была выбрана камера размерами  $2 \times 2 \times 2$  м, суммарным объемом 8 м<sup>3</sup> (рис. 2). В качестве горючей нагрузки был выбран очаг 5В, установленный в центральной части камеры на уровне нижней стенки, в соответствии с ГОСТ<sup>2</sup>. Датчики температуры, давления, концентрации кислорода были размещены на высоте 1 м по периметру и в центральной части.

Выбор комплексных ингибирующих водорасторимых солей был обусловлен экспериментально доказанной ингибирующей способностью каждого из веществ в отдельности и отсутствием токсичности [23–25]. В рамках моделирования была осуществлена подача следующих комплексных ингибирующих составов:

1. 15%-ный раствор  $K_2CO_3$  (далее — карбонат калия).



**Рис. 2.** Камера для моделирования эффективности подавления горения водорасторимыми ингибиторами: 1 — моделируемый очаг 5В; 2 — датчики температуры, давления, концентрации кислорода; 3 — впускной/выпускной клапан продувки воздухом объема камеры; 4 — форсунка подачи растворов ингибиторов; 5 — 2D-сечения температуры и давления

**Fig. 2.** Chamber for modelling the combustion suppression efficiency of water-soluble inhibitors, where: 1 — modelled hearth 5B; 2 — temperature, pressure, oxygen concentration sensors; 3 — inlet/outlet valve for air purging of the chamber volume; 4 — nozzle for inhibitor solutions supply; 5 — 2D plots of temperature and pressure

<sup>2</sup> ГОСТ Р 51057–2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний.

2. 25%-ный раствор  $CH_3COOK$  (далее — ацетат калия).
3. 15%-ный раствор  $(NH_4)_2SO_4$  (далее — сульфат аммония).
4. 15%-ный раствор  $MgCl_2$  (далее — хлорид магния).
5. Карбонат калия и ацетат калия, массовое соотношение 1:1.
6. Сульфат аммония и хлорид магния, массовое соотношение 1:1.

Концентрации ингибиторов (1–4) в растворе ТАВ были выбраны исходя из установленных ранее в натурных экспериментах и необходимых для проведения валидации разработанной модели с экспериментальными данными [26]. Эффективные концентрации ингибиторов (5, 6) определялись в ходе математического моделирования. Подача раствора ингибитора осуществлялась через форсунку с расходом 5 г/с. Распыление осуществлялось так, что 60 % всех капель имело размер капель около 3,2 мкм. Время свободного горения бензина выдерживалось 60 с, после этого происходила подача огнетушащего состава.

## Результаты и обсуждения

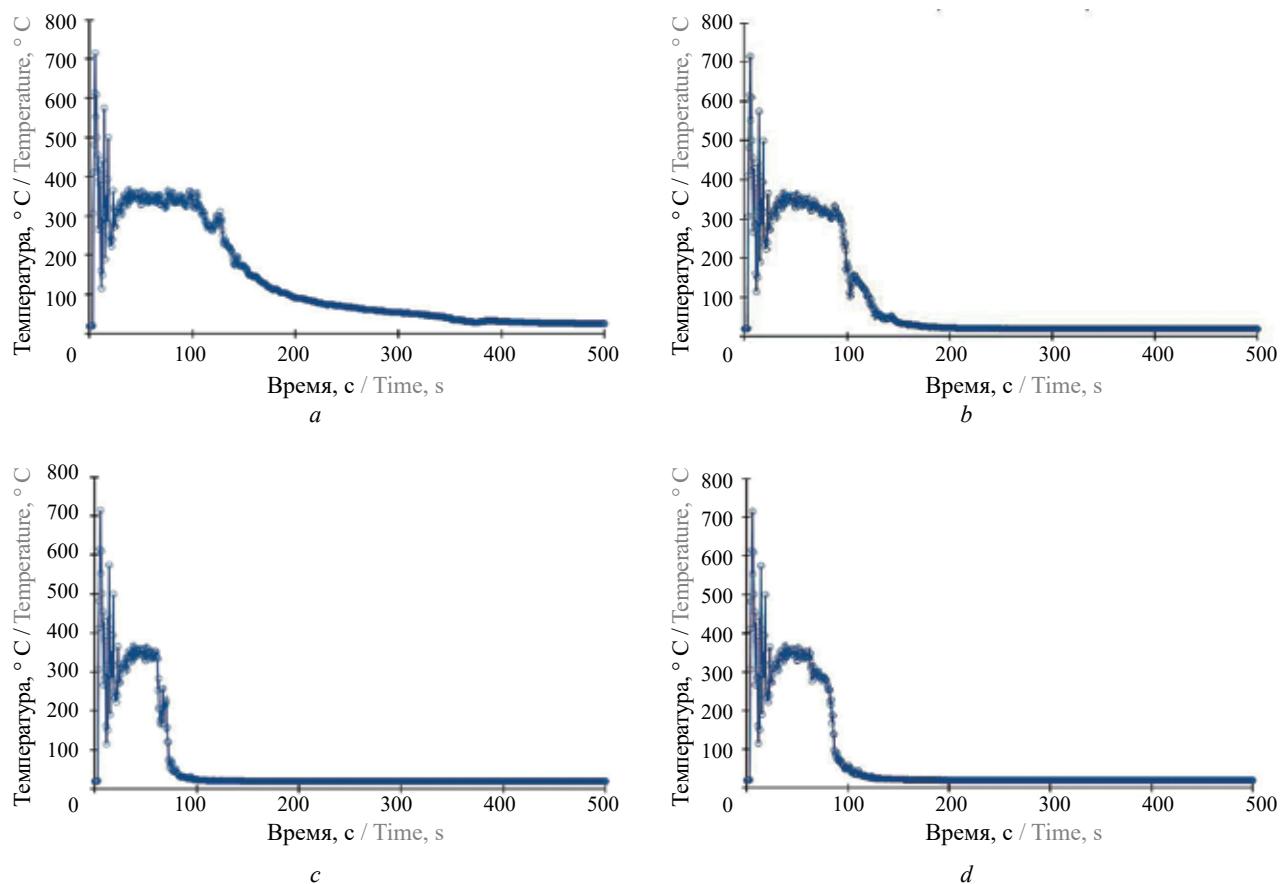
Рассмотрение результатов моделирования было разделено на два блока:

- проведение валидации разработанной модели с экспериментальными данными;
- определение эффективных концентраций комплексных ингибиторов в растворе ТАВ.

В первом блоке рассматривается зависимость среднеобъемной температуры в камере сгорания от времени для всех ингибиторов в отдельности (рис. 3). Данные, полученные при моделировании, были проанализированы и сведены в таблицу.

Анализ рис. 3 и таблицы позволяет сделать вывод, что наибольшей эффективностью обладает 25%-ный раствор ацетата калия, стоит отметить, что концентрация активного вещества в растворе является наибольшей среди исследуемых образцов. Наименьшей эффективностью среди представленных образцов обладает 15%-ный раствор карбоната калия. Анализ результатов моделирования показал высокую сходимость с экспериментальными данными, адекватность разработанной модели составляет не менее 95 %, что является удовлетворительным для продолжения дальнейших этапов исследования в рамках текущей работы.

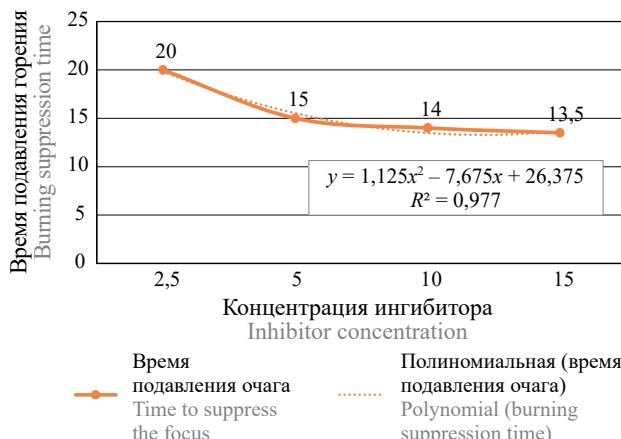
Для определения эффективных концентраций карбоната калия и ацетата калия с массовым соотношением 1:1 было проведено моделирование подавления горения при следующих концентрациях: 15, 20, 22,5, 25 % (рис. 5). Определение эффективных концентраций сульфата аммония и хлорида магния



**Рис. 3.** Зависимость среднеобъемной температуры в камере сгорания от времени: *a* — 15%-ный раствор карбоната калия; *b* — 25%-ный раствор ацетата калия; *c* — 15%-ный раствор сульфата аммония; *d* — 15%-ный раствор хлорида магния  
**Fig. 3.** Time dependence of the average volume temperature in the combustion chamber: *a* — 15 % potassium carbonate solution; *b* — 25 % potassium acetate solution; *c* — 15 % ammonium sulfate solution; *d* — 15 % magnesium chloride solution

Анализ эффективности подавления горения в камере сгорания различными ингибирующими составами  
Analysis of combustion suppression efficiency in the combustion chamber by different inhibiting compositions

Ингибитор Inhibitor	Время тушения $\Delta t$ , с Extinguishing time $\Delta t$ , s	Изменение средней температуры на высоте рабочей зоны $\Delta T$ , °C Change in average temperature at the height of the working area $\Delta T$ , °C	Скорость снижения температуры в замкнутом объеме $K_{inh}$ , °C/c, Rate of temperature decrease in the closed $K_{inh}$ , °C/sec
15%-ный раствор карбоната калия 15 % potassium carbonate solution	60,5	365	6,03
25%-ный раствор ацетата калия 25 % potassium acetate solution	20,6	440	21,36
10%-ный раствор сульфата аммония 10 % ammonium sulphate solution	32,3	415	12,84
7%-ный раствор хлорида магния 7 % magnesium chloride solution	25,7	310	12,06

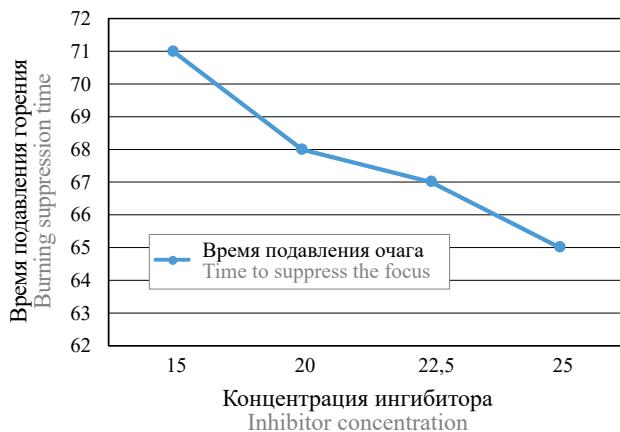


**Рис. 4.** Зависимость времени подавления горения в камере сгорания от концентрации сульфата аммония и хлорида магния  
**Fig. 4.** Dependence of combustion suppression time in the combustion chamber on the concentration of ammonium sulphate and magnesium chloride

с массовым соотношением 1:1 было проведено моделированием подавления горения при следующих концентрациях: 2,5, 5, 10, 15 % (рис. 4).

Для определения эффективной концентрации был использован математический анализ с нахождением экстремума функции, обозначенного на рисунке касательной линией. Значение абсциссы точки экстремума функции соответствует эффективной концентрации для исследуемого состава. Для графика функции, представленного на рис. 4 на отрезке от 2,5 до 15, экстремум функции соответствует точке (3,4; 13,2). То есть для подавления горения водным раствором сульфата аммония и хлорида магния, взятого 1:1, эффективная массовая концентрация соответствует значению 3,4 %.

Рассмотрим график времени подавления горения в камере сгорания от концентрации карбоната калия и ацетата калия, представленный на рис. 5. Данная зависимость имеет 2 точки экстремума, однако физического смысла данные точки не имеют, так как при резком повышении концентрации комплексного ингибитора время подавления изменяется несущественно. Более того, стоит отметить, что время подавления горения данным комплексным составом больше, чем каждого из ингибиторов, взятых в отдельности при



**Рис. 5.** Зависимость времени подавления горения в камере сгорания от концентрации карбоната калия и ацетата калия  
**Fig. 5.** Dependence of combustion suppression time in the combustion chamber on the concentration of potassium carbonate and potassium acetate

соответствующих концентрациях. Соответственно, можно предположить, что данные ингибиторы являются взаимоподавляющими, а уменьшение времени подавления при увеличении концентрации происходит по причине увеличения выделения углекислого газа в результате термического разложения данных ингибиторов.

## Выходы

В рамках исследования была разработана модель подавления горения комплексными ингибиторами, проведена ее валидация, используя имеющиеся экспериментальные данные. Были проведены исследования по эффективности подавления горения двухкомпонентными ингибиторами:

1. Сульфат аммония и хлорид магния.
2. Карбонат калия и ацетат калия.

Установлено, что эффективная массовая концентрация сульфата аммония и хлорида магния в водном растворе соответствует значению 3,4 %, что более чем в 4 раза меньше эффективной концентрации каждого из веществ, взятого в отдельности. Двухкомпонентные ингибиторы карбоната калия и ацетата калия являются взаимоподавляющими и не приводят к подавлению горения химическим ингибированием.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Babrauskas V. Ignition handbook : principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science. Issaquah : Fire Science Publishers, 2003. 1116 p.
2. Levchik S., Piotrowski A., Weil E., Yao Q. New developments in flame retardancy of epoxy resins // Polymer Degradation and Stability. 2005. No. 88 (1). Pp. 57–62. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.02.019
3. Amor H.B., Elaoud A., Salah N.B., Elmoueddeb K. Effect of Magnetic Treatment on Surface Tension and Water Evaporation // International Journal of Advance Industrial Engineering. 2017. No. 5. Pp. 119–124. DOI: 10.14741/Ijae/5.3.4

4. Роенко В.В., Халиков Р.В. Пожаровзрывобезопасность замкнутых пространств объектов газокомпрессорных станций // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 1. С. 30–35. DOI: 10.25257/FE.2020.1.30-35
5. Шмаков А.Г., Коробейничев О.П., Шварцберг В.М., Якимов С.А., Князьков Д.А., Комаров В.Ф. и др. Исследование фосфорорганических, фтороганических, металлоксодержащих соединений и твердотопливных газогенерирующих составов с добавками фосфоросодержащих соединений в качестве эффективных пламегасителей // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 6. С. 64–73. EDN OCSBEP.
6. Пожаркова И.Н., Елфимова М.В., Лагунов А.Н. Моделирование пожаров в машинных отделениях объектов теплоэнергетического комплекса // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. № 1. С. 39–45. EDN ZFCUSL.
7. Азатян В.В. Особенности физико-химических механизмов и кинетических закономерностей горения, взрыва и детонации газов // Кинетика и катализ. 2020. № 3. Т. 61. С. 291–311. DOI: 10.1134/S0023158420030039
8. Котова Д.Л., Крысанова Т.А., Новикова Л.А., Бельчинская И.Л., Давыдова Е.Г. Об особенностях влияния слабого импульсного магнитного последействия на гидратационные свойства алюмосиликатов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2020. № 2. Т. 20. С. 166–174. DOI: 10.17308/sorpchrom.2020.20/2771
9. Азатян В.В., Шебеко Ю.Н., Болодъян И.А., Навцена В.Ю. Влияние разбавителей различной химической природы на концентрационные пределы распространения пламени в газовых смесях // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 6. С. 96–102. EDN OCSBGD.
10. Liu H., Wang F. Research on N<sub>2</sub>-inhibitor-water mist fire prevention and extinguishing technology and equipment in coal mine goaf // PLoS ONE. 2019. No. 14 (9). Pp. 1–21. DOI: 10.1371/journal.pone.0222003
11. Azatyan V.V., Wagner G.G., Vedeshkin G.K. Suppression of Detonations by Efficient Inhibitors. Gaseous and Heterogeneous Detonations. Moscow : ENAS Publishers, 1999. Pp. 331–336.
12. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion: physical and chemical fundamentals, modelling and simulation, experiments, pollutant formation with 14 tables. Einheitssach : Tech-nische Verbrennung, 2018. 15 p. DOI: 10.1007/978-3-540-45363-5
13. Fleming J.W., Williams B.A., Sheinson R.S. Suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type // Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section. 2019. 21 p. DOI: 10.6028/NIST.SP.984.4
14. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 164. P. 114501. DOI: 10.1016/j.aplthermaleng.2019.114501. EDN ETRVGA.
15. Gottuk D.T., Gott J.E., Williams F.W. Fire dynamic of spill fires Spill Fires : An Experimental Study. 2000. Pp. 1–36.
16. Тоцкий Д.В., Шинкаренко Д.Н., Петренко Е.Н., Романцова О.А., Захарова Е.С. Исследование ингибиторов нового поколения : Междунар. науч.-практ. конф. «От модернизации к опережающему развитию: обеспечение конкурентоспособности и научного лидерства АПК». 2022.
17. Роенко В.В., Храмцов С.П., Кармес А.П., Чистяков Т.И., Музыченко А.С., Кочетыков В.А. Опыт применения и совершенствование технологии температурно-активированной воды для тушения пожаров и предупреждения чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности. 2022. Вып. 2 (96). С. 34–52. DOI: 10.25257/TTS.2022.2.96.34-52. EDN WNQWN.
18. Халиков Р.В. Объемное пожаротушение газокомпрессорных станций температурно-активированной водой с водорастворимыми ингибиторами : дис. ... канд. техн. наук. 2024. 134 с. EDN RUKIWD.
19. Корольченко Д.А., Пузач С.В. Учет механизма тушения пламени в интегральных и зонных моделях расчета динамики опасных факторов пожара в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 2. С. 78–87. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.78-87
20. Корольченко Д.А., Пузач С.В. Оценка механизмов тушения горючих жидкостей тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 1. С. 54–63. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.54-63
21. Чистяков Т.И. Применение температурно-активированной воды при тушении электроустановок под напряжением на объектах энергетики : дис. ... канд. техн. наук. 2020. 277 с.
22. Аксенов С.Г., Кильдибаев Р.М. Применение температурно-активированной воды при тушении электроустановок под напряжением на объектах энергетики // Международный электронный журнал «Устойчивое развитие: наука и практика». 2024. № 2 (38). С. 27–30.
23. Роенко В.В., Халиков Р.В., Кудрин А.Н. Исследование объемного пожаротушения температурно-активированной водой при введении ингибирующих солей // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2022. № 1. С. 5–11. DOI: 10.25257/FE.2022.1.5-11. EDN SFLEUX.
24. Роенко В.В., Чистяков Т.И., Тараканов Д.В., Халиков Р.В. Оценка электропроводимости струй температурно-активированной воды с дозированием ингибирующей соли для тушения электрооборудования

- газокомпрессорных станций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 1. С. 64–74. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.64-74. EDN ANOFSS.
25. Рoenko B.B., Karmes A.P., Храмцов С.П., Колосков А.А. Метод тушения лесных пожаров температурно-активированной водой : мат. науч.-практ. конф. с Междунар. участием, посвящ. 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России. М. : Академия Государственной противопожарной службы, 2024. С. 262–267. EDN OZBKCO.
26. Roenko B.B., Xalikov R.B., Храмцов С.П., Karmes A.P. Моделирование процесса объемного пожаротушения струями температурно-активированной воды // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 3. С. 21–29. DOI: 10.25257/FE.2021.3.21-29. EDN NEATGY.

## REFERENCES

1. Babrauskas V. *Ignition handbook : principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. Issaquah, Fire Science Publishers, 2003; 1116.
2. Levchik S., Piotrowski A., Weil E., Yao Q. New developments in flame retardancy of epoxy resins. *Polymer Degradation and Stability*. 2005; 88(1):57-62. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.02.019
3. Amor H.B., Elaoud A., Salah N.B., Elmoueddeb K. Effect of Magnetic Treatment on Surface Tension and Water Evaporation. *International Journal of Advance Industrial Engineering*. 2017; 5:119-124. DOI: 10.14741/Ijae/5.3.4
4. Roenko V.V., Khalikov R.V. Fire and explosion safety of enclosed spaces of facilities of gas compressor stations. *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 2020; 1:30-35. DOI: 10.25257/FE.2020.1.30-35 (rus).
5. Shmakov A.G., Korobeynichev O.P., Shvartsberg V.M., Yakimov S.A., Knyazkov D.A., Komarov V.F. et al. Investigation of organophosphorus, organofluorine, metal-containing compounds and solid-fuel gas-generating compositions with additives of phosphorus-containing compounds as effective flame retardants. *Physics of flame and explosion*. 2006; 42(6):64-73. EDN OCSBEP. (rus).
6. Pozharkova I.N., Elfimova M.V., Lagunov A.N. Modelling fires in engine rooms of thermal power complex facilities. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2019; 1:39-45. EDN ZFCUSL. (rus).
7. Azatyan V.V. Physico-chemical mechanisms and kinetic patterns of flame, explosion and detonation of gases. *Kinetics and catalysis*. 2020; 3(61):291-311. DOI: 10.1134/S0023158420030039 (rus).
8. Kotova D.L., Krysanova T.A., Novikova L.A., Belchinskaya I.L., Davydova E.G. The influence of a weak pulsed magnetic aftereffect on the hydration properties of aluminosilicates. *Sorption and chromatographic processes*. 2020; 2(20):166-174. DOI: 10.17308/sorpchrom.2020.20/2771 (rus).
9. Azatyan V.V., Shebeko Yu.N., Bolodyan I.A., Navtsenya V.Yu. The influence of diluents of various chemical nature on the concentration limits of flame propagation in gas mixtures. *Physics of combustion and explosion*. 2006; 42(6):96-102. EDN OCSBGD. (rus).
10. Liu H., Wang F. Research on N<sub>2</sub>-inhibitor-water mist fire prevention and extinguishing technology and equipment in coal mine goaf. *PLoS ONE*. 2019; 14(9):1-21. DOI: 10.1371/journal.pone.0222003
11. Azatyan V.V., Wagner G.G., Vedeshkin G.K. Suppression of Detonations by Efficient Inhibitors. *Gaseous and Heterogeneous Detonations*. Moscow, ENAS Publishers, 1999; 331-336.
12. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion: physical and chemical fundamentals, modelling and simulation, experiments, pollutant formation with 14 tables. *Einheitssach : Technische Verbrennung*. 2018; 15. DOI: 10.1007/978-3-540-45363-5
13. Fleming J.W., Williams B.A., Sheinson R.S. Fleming Suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type. *Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section*. 2019; 21. DOI: 10.6028/NIST.SP.984.4
14. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 164:114501. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114501. EDN ETRVGA.
15. Gottuk D.T., Gott J.E., Williams F.W. *Fire dynamic of spill fires Spill Fires: An Experimental Study*. 2000; 1-36.
16. Trotsky D.V., Shinkarenko D.N., Petrenko E.N., Romantsova O.A., Zakharova E.S. Investigation of new generation inhibitors : *International Scientific and Practical Conference “From modernization to advanced development: ensuring competitiveness and scientific leadership of the agroindustrial complex”*. 2022.
17. Roenko V.V., Khramtsov S.P., Karmes A.P., Chistyakov T.I., Muzychenko A.S., Kochetygov V.A. Application experience and aspects of improving the temperature activated water technology for extinguishing fires and preventing emergencies. *Technology of technosphere safety*. 2022; 2(96):34-52. DOI: 10.25257/TTS.2022.2.96.34-52. EDN WNWQWN. (rus).
18. Khalikov R.V. *Volumetric fire extinguishing of gas compressor stations with temperature-activated water with water-soluble inhibitors : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. 2024; 134. EDN RUKIWD. (rus).

19. Korolchenko D.A., Puzach S.V. Introduction of a flame suppression pattern into integrated and zone models used to analyze the dynamics of hazardous factors of indoor fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(2):78-87. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.78-87 (rus).
20. Korolchenko D.A., Puzach S.V. The assessment of extinction mechanisms involving water mist applied to combustible liquids. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(1):54-63. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.54-63 (rus).
21. Chistyakov T.I. *Application of temperature-activated water in extinguishing live electrical installations at energy facilities : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. 2020; 277. (rus).
22. Aksenov S.G., Kildibayev R.M. Application of temperature-activated water in fire extinguishing for electrical installations under voltage at power facilities. *Network scientific publication “Sustainable development: design and management”*. 2024; 2(38):27-30. (rus).
23. Roenko V.V., Khalikov R.V., Kudrin A.N. Total flooding by temperature-activated water with inhibiting salts. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2022; 1:5-11. DOI: 10.25257/FE.2022.1.5-11. EDN SFLEUX. (rus).
24. Roenko V.V., Chistyakov T.I., Tarakanov D.V., Khalikov R.V. Assessment of the electrical conductivity of thermally activated water jets containing injections of inhibiting salt used to extinguish electrical equipment at gas compressor stations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(1):64-74. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.01.64-74. EDN ANOFSS. (rus).
25. Roenko V.V., Karmes A.P., Khramtsov S.P., Koloskov A.A. Method of extinguishing forest fires with temperature-activated water : *Materials of a scientific and practical conference with international participation dedicated to the 90th anniversary of the founding of the Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. Moscow, Academy of the State Fire Service, 2024; 262-267. EDN OZBKCO. (rus).
26. Roenko V.V., Khalikov R.V., Khramtsov S.P., Karmes A.P. Modelling of flooding by temperature-activated water sprays. *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 2021; 3:21-29. DOI: 10.25257/FE.2021.3.21-29. EDN NEATGY. (rus).

Поступила 20.03.2025, после доработки 11.04.2025;

принята к публикации 14.04.2025

Received March 20, 2025; Received in revised form April 11, 2025;

Accepted April 14, 2025

## Информация об авторах

**ХАЛИКОВ Ринат Валерьевич**, к.т.н., старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве (КБС), Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; SPIN-код: 2007-4793; AuthorID: 1045928; ORCID: 0000-0002-0842-4989; e-mail: vokilah@rambler.ru

**КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич**, заведующий сектором испытаний НИЦ «Взрывобезопасность» Института комплексной безопасности в строительстве (ИКБС), старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве (КБС), соискатель на ученую степень кандидата наук, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0002-1383-574X; РИНЦ ID: 890113; ScopusID: 57215919375; WoS ResearcherID: E-3295-2017; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Information about the authors

**Rinat V. KHALIKOV**, Cand. Sci. (Eng.), senior lecturer at the department of integrated safety in construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2007-4793; AuthorID: 1045928; ORCID: 0000-0002-0842-4989; e-mail: vokilah@rambler.ru

**Anton D. KOROLCHENKO**, head of the testing sector of the explosion safety research center, senior lecturer of department of integrated safety in construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1383-574X; ID RSCI: 890113; ScopusID: 57215919375; WoS ResearcherID: E-3295-2017; Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interest.