

Научная статья

УДК 614.845.1; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-175-189

ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОГНЕТУШАЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ПОРОШКА НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА ЕГО ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА В НЕСТАЦИОНАРНОМ ГАЗОПОРОШКОВОМ ПОТОКЕ

✉ Кожевин Дмитрий Федорович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ Yagmort_KDF@mail.ru

Аннотация. На основании экспериментальных данных по анализу распределения частиц в нестационарном газопорошковым потоке по фракционному составу получены карты распределения частиц по размеру в облаке. Методом аналогии обосновано сходство конфигурации частиц порошка в слое облака с сеткой. Определены теплофизические характеристики слоя порошка и сетки. Расчет показал, что мощность теплоотвода фронтом порошкового облака соответствует мощности теплоотвода металлической сетки с размером ячейки 1 мм. Экспериментально подтверждено, что время контакта сетки с размером ячейки 1 мм и менее с фронтом пламени не влияет на эффект тушения, следовательно, приоритетным механизмом прекращения горения с помощью порошка является охлаждение зоны горения в узких каналах.

Ключевые слова: фракционный состав, огнетушащий порошковый состав, мощность теплопоглощения, эффект тушения порошком

Для цитирования: Кожевин Д.Ф. Обоснование механизма огнетушащего действия порошка на основании анализа его фракционного состава в нестационарном газопорошковым потоке // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 175–189. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-175-189.

Scientific article

JUSTIFICATION OF THE MECHANISM OF THE FIRE EXTINGUISHING ACTION OF THE POWDER BASED ON AN ANALYSIS OF ITS FRACTIONAL COMPOSITION IN A NON-STATIONARY GAS-POWDER FLOW

✉ Kozhevin Dmitriy F.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ Yagmort_KDF@mail.ru

Abstract. Based on experimental data on the analysis of the distribution of particles in a non-stationary gas-powder flow by fractional composition, maps of the particle size distribution in the cloud were obtained. The analogy method is used to substantiate the similarity of the configuration of powder particles in the cloud layer with the mesh. The thermophysical characteristics of the powder layer and mesh were determined; the calculation showed that the power of heat removal by the front of the powder cloud corresponds to the power of heat removal by a metal mesh with a cell size of 1 mm. It has been experimentally confirmed that the contact time of a grid with a mesh size of 1 mm or less with the flame front does not affect the extinguishing effect; therefore, the priority mechanism for stopping combustion of powder is cooling the combustion zone in narrow channels.

Keywords: fractional composition, fire extinguishing powder composition, heat absorption power, powder extinguishing effect

For citation: Kozhevnikov D.F. Justification of the mechanism of the fire extinguishing action of the powder based on an analysis of its fractional composition in a non-stationary gas-powder flow // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 1 (73). P. 175–189. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-175-189.

Введение

Огнетушащие порошковые составы (ОПС) в настоящее время являются наиболее универсальными огнетушащими веществами (ОТВ), а порошковые огнетушители применяются в качестве первичного средства пожаротушения при оснащении большинства зданий, сооружений и транспортных средств [1]. Огнетушащая эффективность ОПС при ликвидации практически всех классов пожаров (за исключением пожаров класса D) зависит от дисперсности ОПС: чем меньше размер частиц, тем сильнее эффект тушения [2]. Порошки обладают полифракционным составом, следовательно, кроме размера частиц на эффект тушения должно влиять и их распределение в облаке [3]. Данная статья посвящена результатам исследования влияния параметров пылевоздушных облаков ОПС на эффект тушения.

Методы исследования

Для оценки распределения частиц в нестационарном пылевоздушном потоке был запатентован способ [4] определения распределения массы частиц ОПС и разработана установка [5]. Конструкция установки приведена на рис. 1.

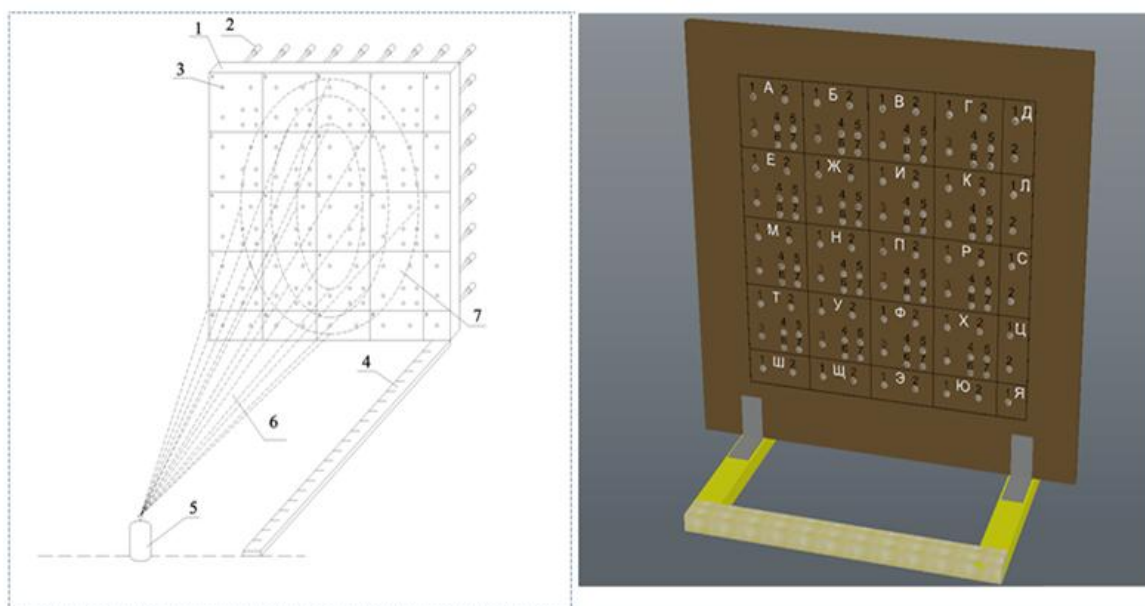


Рис. 1. Установка для исследования распределения огнетушащего порошка в поперечном сечении нестационарного газопорошкового потока

В комплект установки входит координатный стол (обозначен цифрой 1 на рис. 1), представляющий собой матрицу, состоящую из ячеек прямоугольной формы. Каждая ячейка имеет набор сквозных отверстий, служащих для установки сборников порошка (обозначен цифрой 2 на рис. 1). Тылные торцевые поверхности сборников порошка выполнены из воздухопроницаемого материала, обеспечивающего беспрепятственное прохождение газового потока и задерживающего твердые частицы. Срезы отверстий координатного стола 1, обращенные к потоку, являются входами сборников порошка (обозначены цифрой 3 на рис. 1),

а точки расположения входов сборников порошка на координатном столе принимают за контрольные точки при определении распределения массы частиц огнетушащего порошка [4].

Схема размещения входов сборников порошка на координатном столе и размеры ячеек представлены на рис. 1. Каждая ячейка координатного стола промаркирована буквами русского алфавита от А до Я (для удобства работы в маркировке ячеек не использованы буквы, имеющие сходное написание с цифрами), входы сборников порошка 3 в каждой ячейке пронумерованы арабскими цифрами от 1 до n, где n – количество входов сборников порошка в рассматриваемой ячейке [4].

Огнетушащий порошок заданной массы под заданным давлением подают к координатному столу (1) с помощью модели огнетушителя (обозначен цифрой 5 на рис. 1). Для измерения расстояния между срезом модели огнетушителя 5 и вертикальной плоскостью координатного стола (1) используют измерительную линейку (обозначена цифрой 4 на рис. 1) [4].

Осуществляют подачу огнетушащего порошка к координатному столу (1). Затем отсоединяют сборники порошка (2) от координатного стола и проводят ситовой анализ пробы порошка, отобранной каждым сборником. По его результатам, зная координаты расположения каждого сборника порошка на координатном столе, определяют поля распределения приблизительно равных масс различных фракций и совокупной массы порошка в поперечном сечении газового потока в прогнозируемой области пожара [5].

Описанный прием повторяют, изменяя расстояние от модели огнетушителя (5) до координатного стола (1).

Предлагаемый способ позволяет оценить распределение частиц порошка в нестационарном потоке [6]. Предложенным способом была проведена серия испытаний с поваренной солью заданного гранулометрического состава (характеристики приведены в табл. 1) и получено распределение частиц порошка в нестационарном пылевоздушном потоке (струе).

Таблица 1

Гранулометрический состав поваренной соли (NaCl)

Интервал размеров частиц фракции, мкм		Гранулометрический состав, % (масс.)	
Общий для соли	Частный для эксперимента (№ фракции)	Общий для соли	Частный для эксперимента
450–629	0,6589 (14)	39,7	0,0
	0,5432 (13)		13,2
	0,4475 (12)		23,2
200–449	0,4532 (11)	55,0	0,0
	0,4129 (10)		11,9
	0,3419 (9)		18,4
	0,2487 (8)		17,6
	0,1954 (7)		10,0
40–199	0,1452 (6)	5,3	5,0
	0,1094 (5)		3,6
	0,0855 (4)		1,5
	0,0672 (1–3)		0,0

На установке [4] с заданными значениями расстояния от раструба огнетушителя до координатного стола была проведена серия опытов. Цель проведения экспериментов заключалась в определении значения масс различных фракций соли в пробоотборниках на различных расстояниях [7].

Осуществлялась подача порошка из макета огнетушителя (давление в огнетушителе 0,7 МПа) в сторону координатного стола.

После выхода всей массы порошка из огнетушителя для заданного расстояния были определены массы навесок и их фракционный состав в каждом пробоотборнике. Для определения массы навески использовались электронные лабораторные весы марки «Петвес Е-2000» (наибольший предел взвешивания – 2 000 г, класс точности – II). Для каждого из исследуемых сечений потока описанный эксперимент повторен по четыре раза (в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения»), значение доверительной вероятности принято равным 0,95.

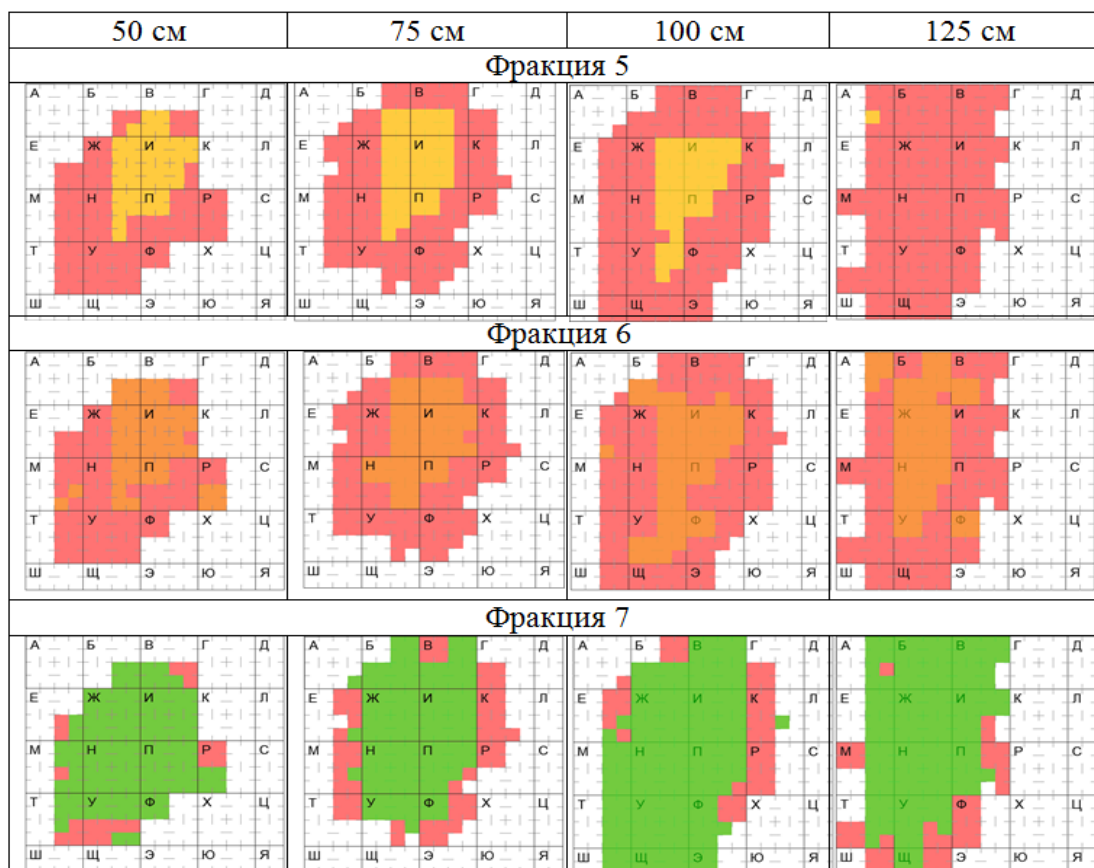
Ситовой анализ был проведен на просеивающей машине Вибрационный грохот, для анализа использовались 14 сит с разными размерами ячеек. Характеристики сит соответствуют требованиям ГОСТ Р 51568–99 «Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия».

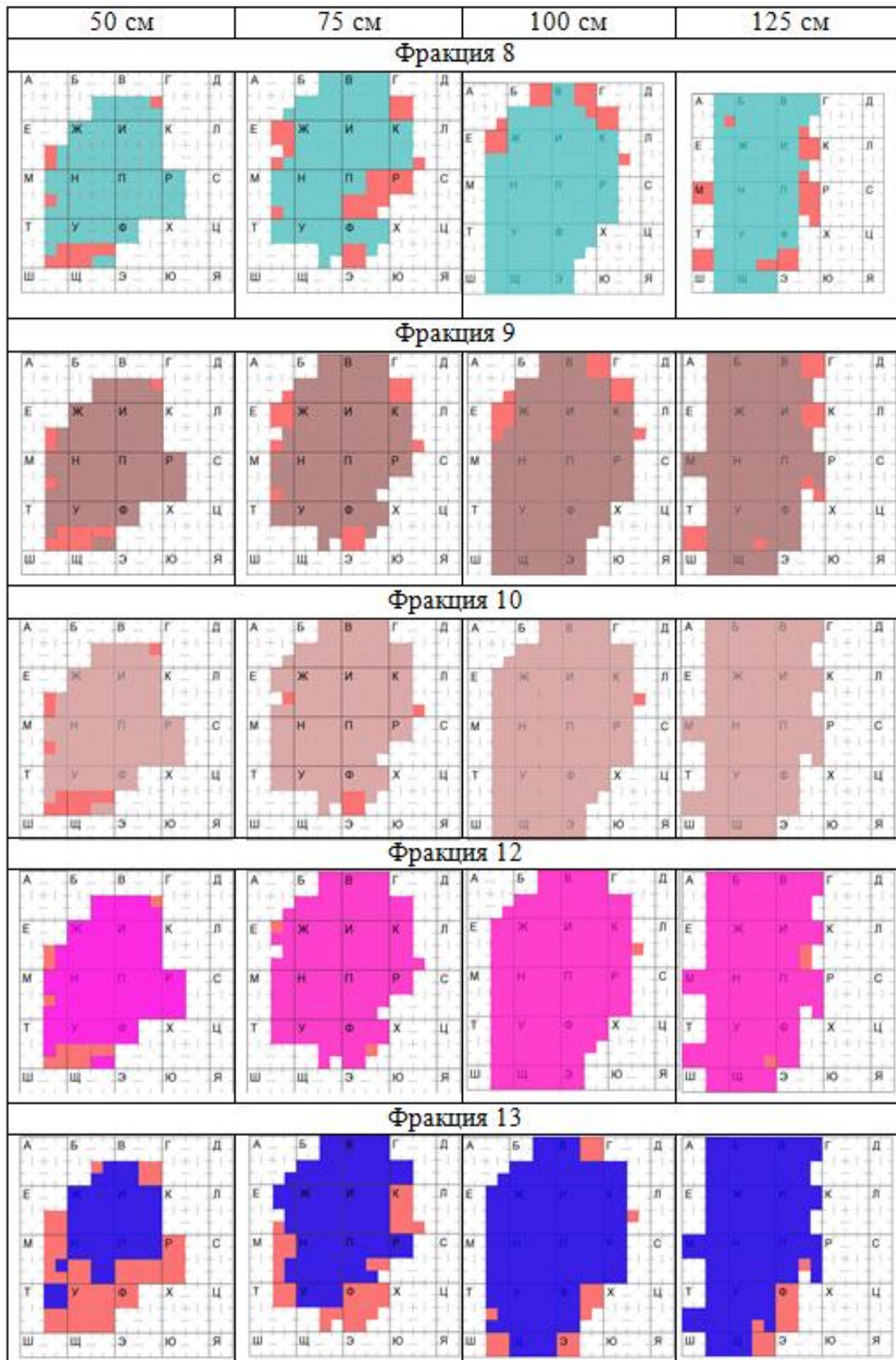
Результаты исследования и их обсуждение

По полученным результатам были построены карты распределения частиц порошка по фракционному составу. Карты распределения частиц приведены в табл. 2, а обобщенные численные значения сведены в табл. 3.

Таблица 2

Распределение частиц по фракциям в струе на заданном расстоянии

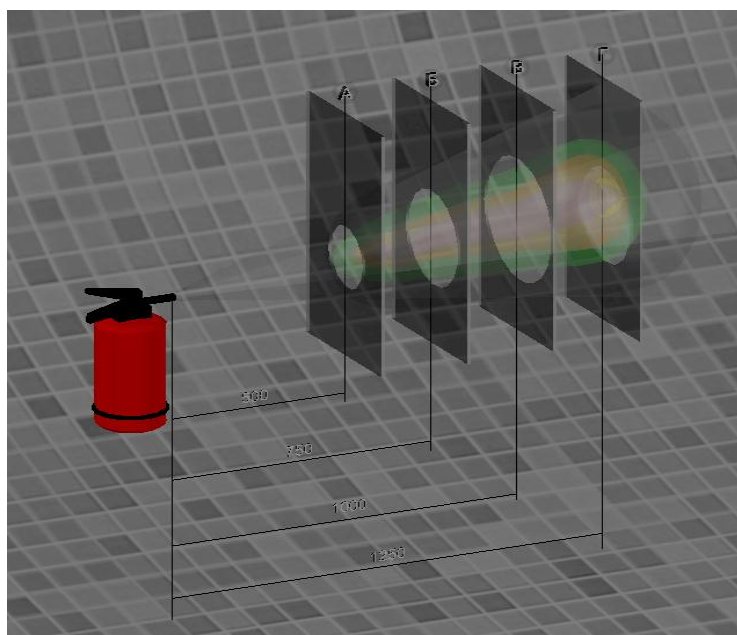




**Обобщенные численные значения результатов эксперимента
по распределению частиц в облаке по фракциям**

Цвет маркировки	Фракция	Площадь распределения, см ²				Исходная масса фракции, г				Масса фракции в пробоотборниках, г			
		50	75	100	125	50	75	100	125	50	75	100	125
■	№ 13	144,00	256,50	369,00	344,25	19,42	17,87	21,05	25,62	2,17	2,50	3,52	3,25
■	№ 12	249,00	337,50	409,50	369,00	35,06	33,57	36,29	38,23	3,89	4,05	5,03	4,15
■	№ 10	249,00	328,50	409,50	375,75	12,19	12,19	10,79	11,65	2,04	2,24	2,72	2,08
■	№ 9	249,00	306,00	378,00	342,00	30,00	30,90	20,72	32,04	3,09	3,47	4,22	3,10
■	№ 8	249,00	272,25	369,00	312,75	27,55	29,50	26,81	26,66	2,94	3,57	3,82	2,52
■	№ 7	236,00	227,25	330,75	292,50	11,81	29,50	11,22	8,86	1,78	1,78	2,02	1,23
■	№ 6	248,00	110,25	130,00	130,50	6,80	13,12	6,26	3,69	0,67	0,64	0,62	0,25
■	№ 5	83,25	92,25	85,50	2,25	2,98	7,65	2,48	0,91	0,23	0,17	0,18	0,02
■	Общая	249,00	342,00	411,75	375,75	150,53	152,59	151,71	155,93	16,81	18,42	22,13	16,60

По полученным экспериментальным данным построена модель порошкового облака с распределением в нем частиц порошка по фракциям, иллюстрация, полученного результата приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Схема распределения частиц порошка по фракциям
в нестационарном газопорошковом потоке**

Из данных табл. 3, 4 следует, что частицы фракций № 5 (самые мелкие частицы в эксперименте) и № 6 располагаются внутри облака, частицы фракции № 7 – № 12 равномерно распределены по всему сечению облака вне зависимости от удаления анализируемого среза от сопла. Частицы фракции № 13 (самые крупные частицы в эксперименте) на расстоянии от сопла 50 см располагаются внутри облака, на расстоянии 75 и более см равномерно распределены по всему сечению. Из вышеизложенного видно, что в центре облака плотность частиц выше, чем на периферии, это связано с тем, что более мелкие частицы, расположенные внутри облака, заполняют пространство между более крупными частицами, поэтому удельная поверхность внутри облака выше, чем по краям.

Из анализа экспериментальных данных получена гипотетическая конфигурация частиц в порошковой струе. Для этого струя условно разделена на слои по длине, толщина слоя принята равной минимальному размеру частицы в облаке (фракция № 5 – 0,1 мм). Для каждой фракции, исходя из массы частиц, среднего размера частиц и размера облака определены расстояния между этими частицами, полученные результаты сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты определения расстояний между частицами в облаке

Фракция	Расстояние, см	Объем облака, м ³	Количество частиц в облаке	Объем первого слоя облака, м ³	Количество частиц в первом слое облака	Расстояние между частицами в слое (круг), м	Расстояние между частицами в слое (квадрат), м	Расстояние между частицами в слое (пятиугольник), м	Расстояние между частицами в слое (шестиугольник), м
5	50	1.39E-03	3.95E+09	9.11E-07	2.60E+06	1.76E-01	1.56E-01	1.19E-01	9.69E-02
	75	2.30E-03	1.01E+10	1.01E-06	4.45E+06	2.31E-01	2.04E-01	1.55E-01	1.27E-01
	100	2.85E-03	3.29E+09	9.35E-07	1.08E+06	1.14E-01	1.01E-01	7.66E-02	6.25E-02
	125	9.37E-05	1.21E+09	2.46E-08	3.17E+05	6.16E-02	5.46E-02	4.15E-02	3.39E-02
6	50	4.13E-03	3.86E+09	3.60E-06	3.37E+06	2.66E-01	2.36E-01	1.79E-01	1.46E-01
	75	2.75E-03	7.44E+09	1.60E-06	4.33E+06	3.02E-01	2.68E-01	2.03E-01	1.66E-01
	100	4.33E-03	3.55E+09	1.89E-06	1.55E+06	1.81E-01	1.60E-01	1.22E-01	9.93E-02
	125	5.43E-03	2.09E+09	1.89E-06	7.30E+05	1.24E-01	1.10E-01	8.36E-02	6.82E-02
7	50	3.93E-03	2.75E+09	4.61E-06	3.23E+06	3.51E-01	3.11E-01	2.36E-01	1.93E-01
	75	5.68E-03	6.87E+09	4.44E-06	5.37E+06	4.53E-01	4.01E-01	3.05E-01	2.49E-01
	100	1.10E-02	2.61E+09	6.46E-06	1.53E+06	2.42E-01	2.14E-01	1.63E-01	1.33E-01
	125	1.22E-02	2.06E+09	5.72E-06	9.68E+05	1.92E-01	1.70E-01	1.29E-01	1.06E-01
8	50	4.15E-03	3.11E+09	6.19E-06	4.65E+06	5.36E-01	4.75E-01	3.61E-01	2.95E-01
	75	6.80E-03	3.33E+09	6.77E-06	3.32E+06	4.53E-01	4.01E-01	3.05E-01	2.49E-01
	100	1.23E-02	3.03E+09	9.18E-06	2.26E+06	3.74E-01	3.31E-01	2.52E-01	2.06E-01
	125	1.30E-02	3.01E+09	7.78E-06	1.80E+06	3.34E-01	2.96E-01	2.25E-01	1.83E-01
9	50	4.15E-03	1.30E+09	8.51E-06	2.68E+06	5.59E-01	4.96E-01	3.77E-01	3.08E-01
	75	7.64E-03	1.34E+09	1.05E-05	1.84E+06	4.64E-01	4.11E-01	3.12E-01	2.55E-01
	100	1.26E-02	9.01E+08	1.29E-05	9.25E+05	3.29E-01	2.91E-01	2.21E-01	1.81E-01
	125	1.42E-02	1.39E+09	1.17E-05	1.14E+06	3.66E-01	3.24E-01	2.46E-01	2.01E-01
10	50	4.15E-03	3.01E+08	1.03E-05	7.46E+05	3.57E-01	3.16E-01	2.40E-01	1.96E-01
	75	8.20E-03	3.01E+08	1.36E-05	4.97E+05	2.91E-01	2.58E-01	1.96E-01	1.60E-01
	100	1.36E-02	2.66E+08	1.69E-05	3.30E+05	2.37E-01	2.10E-01	1.60E-01	1.30E-01
	125	1.56E-02	2.87E+08	1.55E-05	2.85E+05	2.20E-01	1.95E-01	1.48E-01	1.21E-01
12	50	4.15E-03	6.80E+08	1.11E-05	1.83E+06	6.05E-01	5.36E-01	4.07E-01	3.32E-01
	75	8.43E-03	6.51E+08	1.51E-05	1.17E+06	4.83E-01	4.28E-01	3.25E-01	2.66E-01
	100	1.36E-02	7.03E+08	1.83E-05	9.45E+05	4.35E-01	3.85E-01	2.93E-01	2.39E-01
	125	1.54E-02	7.41E+08	1.65E-05	7.97E+05	3.99E-01	3.54E-01	2.69E-01	2.20E-01
13	50	2.40E-03	2.10E+08	7.82E-06	6.87E+05	4.50E-01	3.99E-01	3.03E-01	2.47E-01
	75	6.41E-03	1.94E+08	1.39E-05	4.21E+05	3.53E-01	3.12E-01	2.37E-01	1.94E-01
	100	1.23E-02	2.28E+08	2.00E-05	3.72E+05	3.31E-01	2.94E-01	2.23E-01	1.82E-01
	125	1.43E-02	2.78E+08	1.87E-05	3.62E+05	3.27E-01	2.90E-01	2.20E-01	1.80E-01

Из данных табл. 4 следует, что наиболее близко к реальному расположению частиц в сечении облака является расположение в форме шестиугольника с частицей в центре. В работе [8] было обосновано, что конфигурация частиц порошка в элементарном объеме облака соответствует октаэдру, грань, которого является треугольником.

Из анализа распределения частиц в сечениях порошкового облака по данным табл. 4 построена карта распределения в нем частиц. Полученная карта приведена на рис. 3.

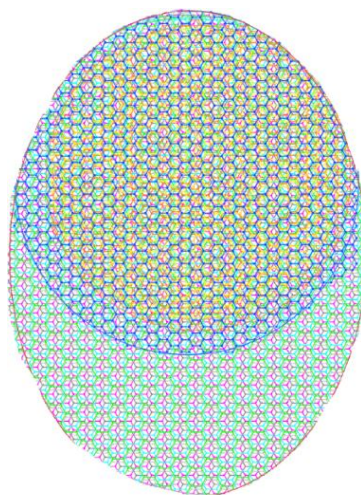


Рис. 3. Карта распределения частиц в слое облака (фронт струи)

По приведенной на рис. 3 карте, составленной по данным, полученным экспериментальным путем, можно численно определить площадь поверхности частиц в облаке. По своей структуре слой фронта струи порошкового облака аналогичен металлической сетке с различным распределением ячеек по размеру. Подобие слоя порошка и аналогичной ему сетки приведено на рис. 4.

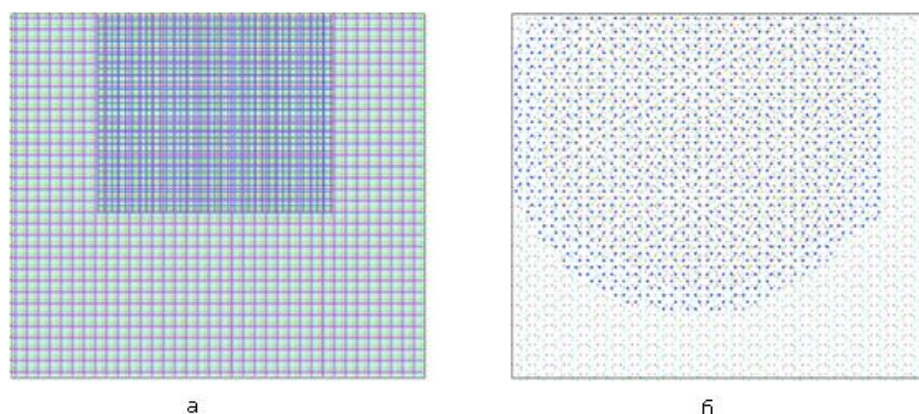


Рис. 4. Визуальное подобие слоя порошкового облака и сетки
а – сетка с различными размерами ячеек; б – фронт порошкового облака

Представление порошкового облака по сечениям как набор сеток позволяет определить механизм огнетушащего действия порошка. В настоящее время данный механизм полностью не изучен, общеприняты три основные гипотезы о механизме огнетушащего действия ОПС:

- гетерогенное ингибирование [9–11];
- охлаждение зоны горения [12, 13];
- гашение пламени в узких каналах, отделяя этот механизм от механизма охлаждения [14–16].

Если рассматривать порошковое облако как набор сеток с приведенной удельной поверхностью, то подтверждается идея, что тушение порошком реализуется в первую очередь за счет охлаждения зоны горения, причем время контакта сетки (частиц порошка) с фронтом пламени на эффективность охлаждения не влияют. Для подтверждения тезиса об отсутствии влияния времени контакта сетки с фронтом пламени на эффективность тушения была проведена серия экспериментов по тушению очага пожара сетками с разными размерами ячеек при подаче в очаг с разной скоростью.

Конструкция установки приведена на рис. 5.

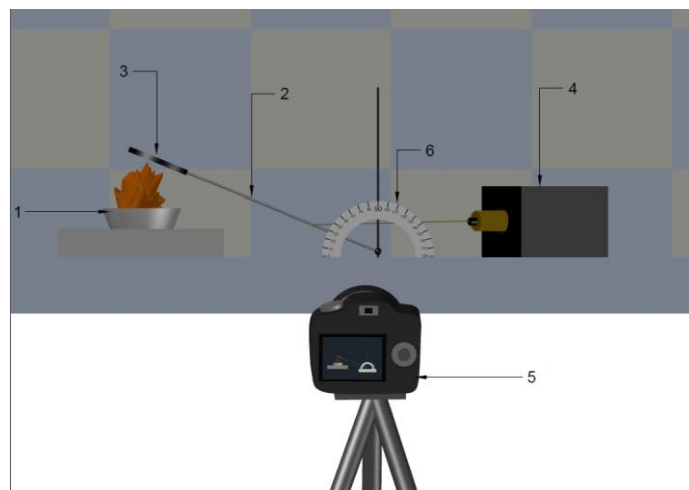


Рис. 5. Установка определения эффективности прекращения горения сеткой

Установка состоит из тигля с горючей жидкостью (1), поворотного кронштейна (2) с закрепленной на нем сеткой (3). Скорость опускания сетки в очаг пожара регулируется шаговым двигателем (4) и фиксируется высокоскоростной камерой (5) по изменению угла наклона кронштейна во времени. Угол наклона определяется по установленному на кронштейне транспортиру (6).

Результаты опыта с сетками с разными ячейками при сжигании нонана в тигле диаметром 2 см приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты определения эффективности прекращения горения сеткой

Сетка с ячейкой	Время, определенное на установке (рис. 5), с	Эффект тушения
Сетка № 1 (ячейка 0,1 мм)	$1 \cdot 10^{-6}$	+
	$1 \cdot 10^{-3}$	+
	$1 \cdot 10^0$	+
Сетка № 2 (ячейка 1 мм)	$1 \cdot 10^{-6}$	+
	$1 \cdot 10^{-3}$	+
	$1 \cdot 10^0$	+
Сетка № 3 (ячейка 6 мм)	$1 \cdot 10^{-6}$	–
	$1 \cdot 10^{-3}$	–
	$1 \cdot 10^0$	+

Из экспериментальных данных следует, что короткое время контакта теплосъемника с фронтом пламени [9], составляющее 10^{-6} с, не влияет на эффект тушения сеткой с размером ячейки 0,1 мм и менее, а значит и слоем частиц порошка. Эксперимент показал, что эффект тушения достигается только в том случае, если площадь проекции сетки на пламя превышает площадь проекции самого пламени.

Результаты исследования и их обсуждение

В статьях [1, 17] было обосновано, что для оценки эффективности средств тушения пожаров, в том числе огнетушителей, необходимо в качестве критерия использовать мощность теплопоглощения ОТВ. Мощность теплопоглощения, в отличие от количества теплоты, поглощаемого единицей массы ОТВ, напрямую зависит от степени измельчения ОТВ, поэтому

в процессе тушения важнейшими показателями будут являться характеристики пылевоздушного облака, образуемого огнетушащим порошком и временем его существования [12].

Для обоснования подобия слоя частиц в порошковой струе с сетками определено значение мощности теплопоглощения (скорости теплоотвода) для сеток с различными ячейками и для слоя порошкового облака с конфигурацией частиц с характеристиками, приведенными в табл. 5:

$$q_{-} = \alpha \cdot (T - T_0) \cdot S, \quad (1)$$

где q_{-} – мощность теплопоглощения (скорость теплоотвода), Дж/с; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T – температура среды, К; T_0 – температура теплосъемника, К; S – площадь теплоотвода, м².

Определение значения коэффициента теплоотдачи от фронта пламени к движущейся сетке или к движущемуся порошковому облаку – задача нетривиальная, но если рассмотреть систему «движущаяся сетка (частицы порошка) – неподвижный фронт пламени (паровоздушная смесь)» относительно сетки (частицы порошка), то задача становится аналогичной теории процессов и аппаратов, связанной с прохождением потока воздуха сквозь трубный пучок, где трубы расположены в шахматном порядке (для частиц порошка) и для труб с поперечными ребрами (для сетки):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, \quad (2)$$

где Nu – критерий Нуссельта; λ – теплопроводность продуктов сгорания, Вт/(м·К); d – характерный размер теплосъемника (нить сетки, частица порошка), м.

Критерий Нуссельта в данной постановке задачи возможно определить по следующей формуле [18]:

$$Nu = 0,4 \cdot \varepsilon_{\varphi} \cdot Re_f^{0,6} \cdot Pr_f^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

где Re_f – критерий Рейнольдса; Pr_f – критерий Прандтля при температуре во фронте пламени; Pr_w – критерий Прандтля при температуре поверхности сетки (частиц порошка); ε_{φ} – коэффициент, учитывающий влияние угла атаки потока частицы (сетки) на среду.

В соответствии с данными [19] диаметр резервуара от 1 до 100 м на скорость выгорания влияет слабо.

$$Re = \sqrt{\frac{V_{\text{теплосъемника}}^2 + \left(\frac{m_{\text{выг}}}{F_{\text{очага}} \cdot \rho_{\text{пара(газа)}}} \right)^2}{\mu}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{теплосъемника}}$ – скорость выхода порошка из огнетушителя (подачи сетки к фронту пламени), м/с; $m_{\text{выг}}$ – удельная массовая скорость выгорания жидкости, кг/(м²·с); $F_{\text{очага}}$ – площадь очага пожара, м²; $\rho_{\text{пара(газа)}}$ – плотность паров (газов), кг/м³; μ – кинематическая вязкость горючей смеси, м²/с.

Значение площади теплоотвода для фронта порошкового облака с характеристиками, приведенными в табл. 4, и сеток с характеристиками, представленными в табл. 5, рассчитано по следующим формулам:

$$S_{\text{порошка}} = \sum_{i=1}^k n_{\text{ч.слое}_i} \cdot S_{\text{ч.слое}_i}, \quad (5)$$

где $S_{\text{порошка}}$ – площадь теплоотвода во фронте порошкового облака, м^2 ; $n_{\text{ч.слое}i}$ – количество частиц i -й фракции в слое; $S_{\text{ч.слое}i}$ – площадь поверхности частицы i -й фракции в слое; k – количество фракций в слое.

$$S_{\text{сетки}} = \pi d \cdot (l_1 \cdot n_1 + l_2 \cdot n_2), \quad (6)$$

где $S_{\text{сетки}}$ – площадь теплоотвода сеткой, м^2 ; d – диаметр нити сетки, м; l_1 – длина поперечных нитей в сетке на участке воздействия, м; n_1 – количество поперечных нитей на участке воздействия; l_2 – длина продольных нитей в сетке на участке воздействия, м; n_2 – количество продольных нитей на участке воздействия.

Исходные данные для расчета коэффициента теплоотдачи порошка и сеток приведены в табл. 6.

Таблица 6

Исходные данные для расчета коэффициента теплоотдачи¹

№ п/п	Наименование показателя	Обозначение	Размерность	Значение
1	Температура теплосъемника (порошка/сетки)	T_0	К	293
2	Температура среды (газов в зоне горения)	T	К	1 400
3	Коэффициент теплопроводности порошка (сетки)	λ	Вт/(м·К)	7,4 (90)
4	Критерий Прандтля продуктов горения при температуре порошка (сетки)	P_{rf}	–	0,56
5	Критерий Прандтля продуктов горения при их температуре	P_{rw}	–	0,651
6	Скорость выхода порошка из огнетушителя (подачи сетки в очаг)	$V_{\text{порошка}}$	м/с	32 (3)
7	Горючее вещество	–	–	нонан
8	Удельная массовая скорость выгорания жидкости	$m_{\text{выг}}$	кг/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)	0,06
9	Площадь очага пожара	$F_{\text{очага}}$	м^2	$3,14 \cdot 10^{-4}$
10	Плотность паров нонана	$\rho_{\text{пара (газа)}}$	кг/ м^3	2,03
11	Кинематическая вязкость горючей смеси	μ	$\text{м}^2/\text{с}$	$5,299 \cdot 10^{-5}$

По формулам (2) – (4) с использованием исходных данных, приведенных в табл. 6, определены значения коэффициентов теплоотдачи для фронта облака поваренной соли с характеристиками, представленными в табл. 4, и для сеток с различными ячейками. По формулам (5), (6) для фронта порошкового облака поваренной соли с характеристиками, приведенными в табл. 4, и для сеток с различными ячейками определена площадь теплоотвода.

Результаты расчета мощности теплопоглощения (скорости теплоотвода) по формуле (1) сведены в табл. 7.

¹ Физические величины: справ. / А.П. Бабичев [и др.]; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

Таблица 7

Мощность теплопоглощения сеток и порошкового облака

Объект	Площадь поверхности теплоемника, м ²	Коэффициент теплоотдачи, α (Вт/(м ² ·К))	Мощность теплопоглощения, Дж/с
Поваренная соль	1.91E+00	1.48E+07	3.14E+10
Сетка № 1	2.45E-01	1.44E+09	3.91E+11
Сетка № 2	8.24E-02	3.92E+08	3.58E+10
Сетка № 3	5.65E-02	2.18E+08	1.36E+10

Из данных табл. 7 следует, что мощность теплопоглощения фронтальным слоем порошкового облака соответствует мощности теплопоглощения (скорости теплоотвода) металлической сетки с ячейкой, равной 1 мм. С учетом результатов эксперимента, приведенных в табл. 5, следует, что при соразмерной мощности теплопоглощения поваренной соли и сетки № 2 время нахождения частицы порошка во фронте пламени влияния на эффект тушения не оказывает.

Проведенные эксперименты и их анализ доказывают, что основной механизм тушения огнетушащим порошковым составом связан с охлаждением зоны горения в узких каналах между частицами.

Заключение

В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы:

- обосновано, что эффект тушения порошком в первую очередь реализуется за счет охлаждения, так как время присутствия частицы во фронте пламени на этот эффект не влияет;
- обосновано, что для эффективного тушения порошком очага пожара необходимо, чтобы сечение порошкового облака охватывало все сечение факела пламени.

Перспективной видится оценка огнетушащей эффективности порошкового облака по аналогии с действием металлических сеток с различным размером ячейки.

Список источников

1. Кожевин Д.Ф. Концепция перспективного развития первичных средств порошкового пожаротушения // Безопасность жизнедеятельности. 2022. № 7 (259). С. 44–50. EDN ZDKCDW.
2. Коробейникова Е.Г., Кожевин Д.Ф., Кожевникова Н.Ю. Теоретические основы процессов горения и тушения: учеб. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 436 с.
3. Корольченко Д.А., Пузач С.В. Учет механизма тушения пламени в интегральных и зонных моделях расчета динамики опасных факторов пожара в помещении // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30. № 2. С. 78–87. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.0.
4. Способ определения распределения массы частиц огнетушащего вещества в нестационарном газовом потоке: пат. RU 2705914 С1 Рос. Федерация, МПК G 01 N 15/02 / Кожевин Д.Ф., Константинова А.С., Поляков А.С.
5. Установка для определения распределения частиц огнетушащего порошка в поперечном сечении нестационарного газового потока / А.С. Константинова [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. № 4 (19). С. 20–24.
6. Поляков А.С., Кожевин Д.Ф., Константинова А.С. Распределение фракций огнетушащего порошка в моделируемом нестационарном газовом потоке // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 6. С. 80–88. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.80-88.
7. Поляков А.С., Кожевин Д.Ф., Константинова А.С. Оценка влияния формы поперечного сечения регулирующего насадка на распределение фракций в газопорошковым

потоке // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2020. № 3. С. 38–46.

8. Кожевин Д.Ф. Методика комплексной оценки эффективности огнетушителей (применительно к пожароопасным производственным объектам нефтебаз): дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 120 с.

9. Баратов А.Н., Иванов В.Н. Пожаротушение. М.: Химия, 1979.

10. Горючесть веществ и химические средства пожаротушения / А.Н. Баратов [и др.]. Вып. 2. М.: ВНИИПО, 1974. С. 4.

11. Dewitte M, Vrebosch J, van Tiggelen A. Inhibition and Extinction of Premixed Flames by Dust Particles // Combustion and Flame. 1964. Vol. 8. P. 257–266.

12. Абдурагимов И.М. О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 4. С. 60–82.

13. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1980. 376 с.

14. Simon D.M., Belles F.E., Spakowski A.E. IV Simposium on Combastion, 1953. P. 126.

15. Заказнов В.Ф., Розловский А.И., Стрижевский И.И. Влияние движения газа на пределы гашения пламени в узких каналах // Физика горения и взрыва. 1966. № 2. P. 109–110; Combustion, Explosion and Shock Waves. 1966. № 2. P. 70–71.

16. Шаулов Ю.Х. Распространение пламени через пористые среды. Баку: Изд-во АН АзССР, 1954.

17. Кожевин Д.Ф. Концепция оценки эффективности порошковых средств пожаротушения по мощности теплопоглощения их огнетушащего вещества // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. № 4 (60). С. 79–88. EDN XDCCFS.

18. Романов П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): учеб. пособие для вузов. 3-е изд., испр. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2010. 544 с.

19. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. М.: Изд-во АН СССР, 1961.

References

1. Kozhevin D.F. Konceptsiya perspektivnogo razvitiya pervichnyh sredstv poroshkovogo pozharotusheniya // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2022. № 7 (259). S. 44–50. EDN ZDKCDW.

2. Korobejnikova E.G., Kozhevin D.F., Kozhevnikova N.Yu. Teoreticheskie osnovy processov goreniya i tusheniya: ucheb. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 436 s.

3. Korol'chenko D.A., Puzach S.V. Uchet mekhanizma tusheniya plameni v integral'nyh i zonnyh modelyah rascheta dinamiki opasnyh faktorov pozhara v pomeshchenii // Pozharovzryvobezopasnost'. 2021. T. 30. № 2. S. 78–87. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.0.

4. Sposob opredeleniya raspredeleniya massy chastic ognetushashchego veshchestva v nestacionarnom gazovom potoke: pat. RU 2705914 C1 Ros. Federaciya, MPK G 01 N 15/02 / Kozhevin D.F., Konstantinova A.S., Polyakov A.S.

5. Ustanovka dlya opredeleniya raspredeleniya chastic ognetushashchego poroshka v poperechnom sechenii nestacionarnogo gazovogo potoka / A.S. Konstantinova [i dr.] // Sibirskij pozharno-spatatel'nyj vestnik. 2020. № 4 (19). S. 20–24.

6. Polyakov A.S., Kozhevin D.F., Konstantinova A.S. Raspredelenie frakcij ognetushashchego poroshka v modeliruemom nestacionarnom gazovom potoke // Pozharovzryvobezopasnost'. 2019. T. 28. № 6. S. 80–88. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.80-88.

7. Polyakov A.S., Kozhevin D.F., Konstantinova A.S. Ocenka vliyaniya formy poperechnogo secheniya reguliruyushchego nasadka na raspredelenie frakcij v gazoporoshkovom potoke // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2020. № 3. S. 38–46.

8. Kozhevina D.F. Metodika kompleksnoj ocenki effektivnosti ognetushitelej (primenitel'no k pozharoopasnym proizvodstvennym ob'ektam neftebaz): dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2011. 120 s.
9. Baratov A.N., Ivanov V.N. Pozharotushenie. M.: Himiya, 1979.
10. Goryuchest' veshchestv i himicheskie sredstva pozharotusheniya / A.N. Baratov [i dr.]. Vyp. 2. M.: VNIPO, 1974. S. 4.
11. Dewitte M., Vreboosch J, van Tiggelen A. Inhibition and Extinction of Premixed Flames by Dust Particles // Combustion and Flame. 1964. Vol. 8. P. 257–266.
12. Abduragimov I.M. O mekhanizmah ognetushashchego dejstviya sredstv pozharotusheniya // Pozharovzryvobezopasnost'. 2012. № 4. S. 60–82.
13. Rozlovskij A.I. Osnovy tekhniki vzryvobezopasnosti pri rabote s goryuchimi gazami i parami. 2-e izd., pererab. M.: Himiya, 1980. 376 s.
14. Simon D.M., Belles F.E., Spakowski A.E. IV Simposium on Combustion, 1953. P. 126.
15. Zakaznov V.F., Rozlovskij A.I., Strizhevskij I.I. Vliyanie dvizheniya gaza na predely gasheniya plameni v uzkih kanalakh // Fizika goreniya i vzryva. 1966. № 2. P. 109–110; Combustion, Explosion and Shock Waves. 1966. № 2. P. 70–71.
16. Shaulov Yu.H. Rasprostranenie plameni cherez poristye sredy. Baku: Izd-vo AN AzSSR, 1954.
17. Kozhevina D.F. Konceptiya ocenki effektivnosti poroshkovykh sredstv pozharotusheniya po moshchnosti teplopogloshcheniya ih ognetushashchego veshchestva // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2021. № 4 (60). S. 79–88. EDN XDCCFS.
18. Romanov P.G., Frolov V.F., Flisyuk O.M. Metody rascheta processov i apparatov himicheskoy tekhnologii (primery i zadachi): ucheb. posobie dlya vuzov. 3-e izd., ispr. SPb.: HIMIZDAT, 2010. 544 s.
19. Blinov V.I., Hudyakov G.N. Diffuzionnoe gorenie zhidkostej. M.: Izd-vo AN SSSR, 1961.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 28.01.2025; одобрена после рецензирования: 10.02.2025;
принята к публикации: 03.03.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 28.01.2025; approved after review: 10.02.2025;
accepted for publication: 03.03.2025

Информация об авторах:

Кожевин Дмитрий Федорович, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru, SPIN-код: 9647-7196

Information about the authors:

Kozhevina Dmitry F., head of the department of physico-chemical fundamentals of gorenje and extinguishing processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: Yagmort_KDF@mail.ru, SPIN: 9647-7196