

Распределение фракций огнетушащего порошка в моделируемом нестационарном газовом потоке

© А. С. Поляков, Д. Ф. Кожевин, А. С. Константинова

Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России
(Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

РЕЗЮМЕ

Введение. В статье приведены закономерности распределения частиц фракций огнетушащего порошка в поперечных сечениях моделируемого нерегулируемого нестационарного газового потока. Определено расстояние от среза огнетушителя до места, где поток наиболее стабилен по содержанию в нем частиц огнетушащего порошка. Ранее в работах уже исследовались физико-химические свойства огнетушащих порошков, было смоделировано движение частиц порошка в потоке и определено влияние фракционного состава порошка на его огнетушающую способность, но распределение фракций порошка при его движении в газопорошковом потоке не рассматривалось. Целью настоящей работы является поиск способов повышения эффективности порошковых огнетушителей путем регулирования распределения фракций порошка в нестационарном газовом потоке.

Материалы и методы. Установка для экспериментального исследования состоит из координатного стола, плоскостью ориентированного перпендикулярно к направлению движения газопорошкового потока. Стол оснащен сборниками, которые позволяют улавливать пробы порошка в контрольных точках поперечного сечения потока. В качестве модели огнетушащего порошка в эксперименте использовали соль поваренную пищевую, характеристики которой соответствуют ГОСТ Р 53280.4-2009. Координатный стол устанавливали последовательно на расстоянии 500, 750, 1000 и 1250 мм от среза огнетушителя. Затем навеску соли с известным фракционным составом подавали моделью огнетушителя на координатный стол и отбирали задержанные пробы порошка. После этого определяли массу и фракционный состав проб, уловленных каждым сборником. По их содержанию судили о стабильности распределения частиц в газовом потоке с помощью статистического анализа (по критерию Фишера).

Выводы. Установлены и аналитически описаны закономерности распределения частиц различных фракций огнетушащего порошка в поперечном сечении нерегулируемого нестационарного газового потока, которые могут быть использованы при поиске способов регулирования фракций огнетушащего порошка в процессе тушения очага пожара. Наиболее представительны и стабильны по точности (правильности и прецизионности) результаты содержания фракций порошка в сечении нестационарного газового потока на расстоянии 1000 мм от среза огнетушителя, что необходимо учитывать при проведении дальнейших исследований.

Ключевые слова: порошковое пожаротушение; порошковый огнетушитель; модель огнетушителя; фракционный состав; моделирование газопорошкового потока.

Для цитирования: Поляков А. С., Кожевин Д. Ф., Константинова А. С. Распределение фракций огнетушащего порошка в моделируемом нестационарном газовом потоке // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. – 2019. – Т. 28, № 6. – С. 80–88. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.80-88.

Константинова Алина Станиславовна, e-mail: as_konstantinova@mail.ru

Distribution of fire extinguishing powder fractions in simulated non-stationary gas stream

© Aleksandr S. Polyakov, Dmitriy F. Kozhevnik, Alina S. Konstantinova

Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia
(Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The article presents the regularities of particles distribution of fire extinguishing powder fractions in the cross sections of the simulated unregulated non-stationary gas stream. The distance from the fire extinguisher cut which the stream is most stable in terms of the content of fire extinguishing powder particles is determined. There are works in which the physical and chemical properties of fire-extinguishing powders are considered, the movement of powder particles in the stream is modeled, the influence of the fractional composition of the powder on its fire-extinguishing capacity is determined. At the same time distribution of powder fractions during its movement in gas-powder stream is not considered. The purpose of the present work is to find ways to improve the efficiency of powder extinguishers by controlling the distribution of powder fractions in a non-stationary gas stream.

Materials and methods. Experimental study installation consists of coordinate table oriented perpendicular to gas-powder stream direction. The table is equipped with collectors that allow to collect powder samples at control

points of flow cross-section. Food sodium chloride (further – salt) was used in the experiment. Its characteristics correspond to GOST R 53280.4–2009 and allow to apply it as a model. The coordinate table was installed sequentially at a distance of 500, 750, 1000 and 1250 mm from the fire extinguisher cut. Next, a shot of salt with a known fractional composition was supplied with a fire extinguisher model to a coordinate table and the retained powder samples were taken. The mass and fractional composition of the samples collected by each collector were then determined. Stability of the particle distribution in the gas stream by statistical analysis (by Fischer's criterion) was measured for their content.

Conclusions. Regularities of different fire extinguishing powder fractions distribution in cross section of non-regulated non-stationary gas stream are established and analytically described. These regularities can be used in finding ways to regulate fire extinguishing powder fractions during fire extinguishing. The most representative and stable in accuracy (correctness and precision) results of powder fractions content in the section of non-stationary gas stream at a distance of 1000 mm from the fire extinguisher cut. This should be taken into account in further research.

Keywords: dry-chemical fire extinguishing; powder fire extinguisher; fire extinguisher model; fractional composition; gas powder stream modelling.

For citation: A. S. Polyakov, D. F. Kozhevnik, A. S. Konstantinova. Distribution of fire extinguishing powder fractions in simulated non-stationary gas stream. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 6, pp. 80–88 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.80-88.

✉ Alina Stanislavovna Konstantinova, e-mail: as konstantinova@mail.ru

Введение

Известно, что огнетушащая способность порошка зависит от его физико-химических свойств [1–3], в частности от фракционного состава. Эта способность возрастает с увеличением удельной площади поверхности огнетушащего порошка.

Эффект поглощения тепла частицами порошка при тушении очага пожара подробно исследован в [4–7]. Экспериментально установлено, что существуют затруднения в доставке мелких фракций к очагу пожара. Крупные же фракции обеспечивают большую длину струи порошка, но обладают сравнительно низкой огнетушащей способностью [8–11]. Установлено также, что для тушения пожара наиболее оптимальными являются фракции среднего размера.

Авторами [12] определены гранулометрические характеристики представленных на рынке огнетушащих порошков. Проведено математическое моделирование движения частиц в газопорошковом потоке [13] и в псевдоожженном слое [14]. В этих работах учтены соударения частиц и взаимодействие их с газовым потоком без разделения на фракции.

В [3, 15, 16] исследована динамика движения частиц огнетушащего порошка к очагу пожара при подаче с помощью модульных установок порошкового пожаротушения. При таком способе подачи поток порошка направлен в сторону, противоположную движению конвективных газовых потоков от очага пожара. Установлен минимальный критический диаметр частицы, при котором она не будет отброшена восходящими конвективными потоками.

Авторами [17] исследовано распределение фракций порошка в нестационарном газовом потоке. Навеску огнетушащего порошка с помощью ручного огнетушителя подавали на предварительно разложенные подложки известной массы и размера. После полного осаждения частиц каждую подложку взвешивали и строили граничные линии распределения

фракций порошка в нестационарном газовом потоке. Отметим сразу, что предложенный в [17] способ справедлив только для суммарной массы фракций, осевших в поперечном сечении потока, и не дает возможности определить распределение частиц в каждой его точке.

В настоящей работе исследовано распределение различных фракций порошка в поперечном сечении нестационарного газового потока в целях поиска способов повышения эффективности применения порошковых огнетушителей.

Материалы и методы

Методика проведения экспериментов описана нами в [18]. Распределение массы частиц огнетушащего порошка в поперечном сечении нестационарного газового потока смоделировано с помощью установки, схематично представленной на рис. 1.

Установка состоит из координатного стола 1, оснащенного сборниками порошка 2, размещенными в сквозных отверстиях стола. Материал тыльных торцевых поверхностей сборников обеспечивает беспрепятственное прохождение газового потока и задерживает частицы порошка. Входы 3 сборников порошка на координатном столе выступают в качестве контрольных точек при определении массы частиц различных фракций огнетушащего порошка.

В качестве модели огнетушащего порошка при проведении эксперимента использована соль пищевая поваренная по ТУ 9192-001-90844204–2011 (далее — соль). Фракционный состав соли определен нами ситовым анализом (табл. 1) методом ручного просева [19].

Проанализированы характеристики огнетушащих порошков, требования к которым представлены в ГОСТ Р 53280.4–2009 “Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 4. Порошки огнетушащие общего назначения. Общие тех-

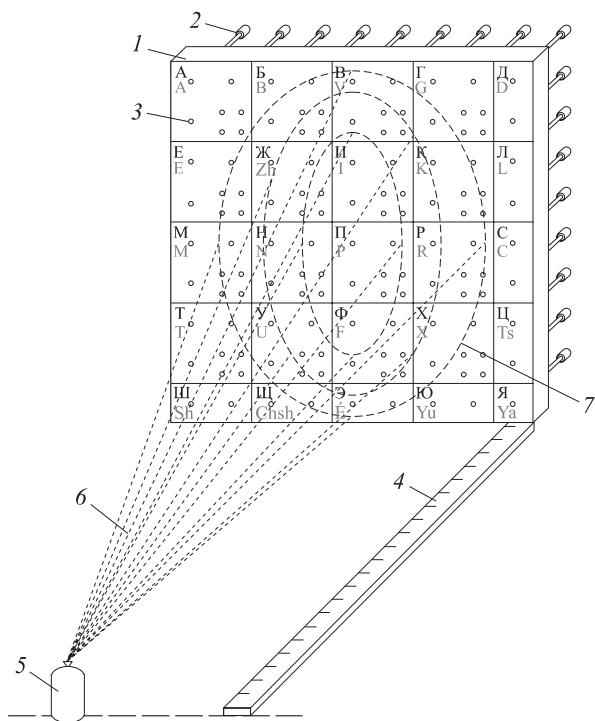


Рис. 1. Схема установки, моделирующей распределение огнетушащего порошка в нестационарном газовом потоке: 1 — координатный стол; 2 — сборники порошка; 3 — входы сборников порошка; 4 — измерительная линейка; 5 — модель огнетушителя; 6 — поток частиц порошка; 7 — граничные линии распределения различных фракций порошка

Fig. 1. Scheme of the installation simulating the fire extinguishing powder distribution in the non-stationary gas stream: 1 — coordinate table; 2 — powder collectors; 3 — inlets of powder collectors; 4 — measuring line; 5 — fire extinguisher model; 6 — stream of powder particles; 7 — boundary distribution lines of various powder fractions

нические требования и методы испытаний". На движение порошка в нестационарном газовом потоке оказывают влияние характеристики, отражающие соотношение массы и характерной площади частицы:

1) кажущаяся плотность (для неуплотненных и уплотненных порошков);

2) фракционный состав (остаток порошка на сите с сеткой №05К по ГОСТ 6613–86 "Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия" и на сите 1000 мкм при ситовом анализе).

В табл. 2 приведены требования ГОСТ Р 53280.4–2009 к характеристикам соли.

Данные табл. 2 допускают возможность использования соли поваренной пищевой в качестве модели огнетушащего порошка.

Координатный стол с закрепленными сборниками порошка устанавливали на разных расстояниях от модели огнетушителя. Схема расположения исследуемых сечений А–Г представлена на рис. 2. Наибольшим принято расстояние, при котором размеры проекции поперечного сечения потока соли не превышают размеров координатного стола.

Таблица 1. Фракционный состав соли

Table 1. Fractional composition of salt

Интервал размеров частиц фракции, мкм Particle size range of fraction, μm	450...629	200...449	40...199
Содержание фракции, % масс. Content of fraction, % mass	39,7	55,0	5,3

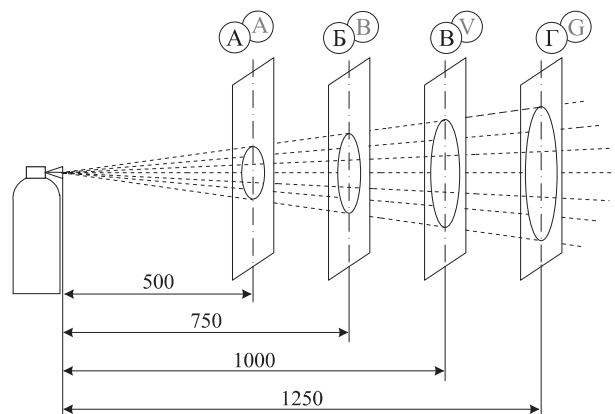


Рис. 2. Схема взаимного расположения модели огнетушителя и исследуемых сечений нестационарного газового потока
Fig. 2. Scheme of mutual arrangement of fire extinguisher model and tested sections of non-stationary gas stream

Установлена минимальная масса навески соли, которая позволяет определить массу частиц соли, задержанных отдельными сборниками порошка, с учетом технических характеристик весов. Она составляет 150 г. Подачу навески порошка к координатному столу осуществляли воздухом под давлением 0,7 МПа. Затем от координатного стола поочередно отсоединяли сборники и проводили взвешивание и ситовой анализ уловленной каждым из них пробы. При взвешивании использовали электронные лабораторные весы марки "Петвес Е-2000" (верхний предел взвешивания — 2000 г, класс точности — II). Для каждого из исследуемых сечений потока описанный эксперимент повторяли по 4 раза (в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011), значение доверительной вероятности принимали равным 0,95.

Определена совокупная масса соли, уловленной сборниками координатного стола, который располагали последовательно на расстояниях 500, 750, 1000 и 1250 мм от модели огнетушителя, и процентный состав различных фракций в сборниках (табл. 3).

Результаты и их обсуждение

Проверка приемлемости результатов измерений в поперечных сечениях нестационарного газового потока (табл. 4) проведена по условиям повторяе-

Таблица 2. Соответствие характеристик соли, определяющих движение в нестационарном газовом потоке
Table 2. Correspondence of salt characteristics determining movement in a non-stationary gas stream

Характеристика огнетушащего порошка Fire extinguishing powder characteristic	Значение характеристики / Characteristic value		Заключение о соответствии требованиям Conclusion of compliance with requirements
	по ГОСТ Р 53280.4–2009 GOST R 53280.4–2009	фактическое actual	
Кажущаяся плотность порошка, кг/м ³ Apparent density of powder, kg/m ³ :			
– неуплотненного / non-compacted	≥700	1300	Соответствует / Conforms
– уплотненного / compacted	≥1000	≥1300	Соответствует / Conforms
Остаток порошка на сите 1000 мкм при ситовом анализе. % масс. Powder residue on sieve 1000 µm in sieve analysis, % mass	Отсутствие Absence	Отсутствие Absence	Соответствует Conforms

Таблица 3. Фракционный состав соли, уловленной сборниками координатного стола
Table 3. Fractional composition of salt caught by coordinate table collectors

Сечение (расстояние от модели огнетушителя, мм) Cross-section (distance from fire extinguisher model, mm)	Номер эксперимента No. of experiment	Общая масса соли, уловленной сборниками, г Total mass of salt caught by collectors, g	Масса <i>m</i> частиц диаметром <i>d</i> , мкм, в сечении Mass <i>m</i> of particles of diameter <i>d</i> , µm, in section					
			450...629		200...449		40...199	
			г g	% масс. % mass	г g	% масс. % mass	г g	% масс. % mass
A (500)	1	12,11	4,47	36,9	7,04	58,1	0,60	5,0
	2	12,74	4,17	32,7	7,90	62,0	0,67	5,3
	3	19,65	6,24	31,8	11,90	60,6	1,51	7,7
	4	13,19	2,44	18,5	9,85	74,7	0,90	6,8
Среднее значение содержания фракции, % масс. Average fraction content, % mass			30,0		63,8		6,2	
Б (750)	1	11,57	5,04	43,6	6,33	54,7	0,20	1,7
	2	17,08	7,55	44,2	8,96	52,5	0,57	3,3
	3	18,35	8,09	44,1	9,81	53,5	0,45	2,5
	4	17,83	6,55	36,7	10,47	58,7	0,81	4,5
Среднее значение содержания фракции, % масс. Average fraction content, % mass			42,1		54,8		3,0	
В (1000)	1	13,01	5,03	38,7	7,51	57,7	0,47	3,6
	2	17,84	7,17	40,2	9,69	54,3	0,98	5,5
	3	21,66	8,19	37,8	12,36	57,1	1,11	5,1
	4	22,13	8,55	38,6	12,78	57,7	0,80	3,6
Среднее значение содержания фракции, % масс. Average fraction content, % mass			38,8		56,7		4,5	
Г (1250)	1	14,55	4,93	33,9	8,81	60,5	0,81	5,6
	2	16,79	7,20	42,9	8,78	52,3	0,81	4,8
	3	18,08	6,40	35,4	10,77	59,6	0,91	5,0
	4	16,60	7,40	44,6	8,93	53,8	0,27	1,6
Среднее значение содержания фракции, % масс. Average fraction content, % mass			39,2		56,6		4,3	

мости по ГОСТ Р ИСО 5725-1–2002 “Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения” и ГОСТ Р ИСО 5725-6–2002 “Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов

измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике”.

В табл. 5 и 6 приведены результаты оценки статистической значимости полученных данных по критерию Фишера. Результат считали статистиче-

ски значимым при выполнении условия $F_t < F_p$, где F_t — критическое значение критерия Фишера, $F_t = 8,53$ для $n = 4$; F_p — расчетное значение критерия Фишера, определяемое по формуле

$$F_p = S_6^2 / S_m^2, \quad (1)$$

где S_6^2 и S_m^2 — соответственно большее и меньшее значения дисперсий [20].

Изменения процентного содержания фракций в поперечном сечении потока в зависимости от расстояния между срезом огнетушителя и исследуемым сечением приведены на рис. 3.

Таблица 4. Проверка приемлемости измерений по условиям повторяемости

Table 4. Check of measurement suitability by repeatability conditions

Интервал диаметров частиц фракции, мкм Particle diameter range of fraction, μm	Расстояние от среза огнетушителя, мм Distance from fire extinguisher cut, mm	Массовое содержание фракции x_i , % масс. Weight content of fraction x_i , % mass				Диапазон (размах) измерений $x_{\max} - x_{\min}$ Measuring range (span) $x_{\max} - x_{\min}$	Критическое значение диапазона при $n = 4$ и доверительной вероятности 0,95 Critical value of range at $n = 4$ and confidence probability 0,95
450...629	500	36,9	32,7	31,8	18,5	18,4	28,7
	750	43,6	44,1	44,2	36,7	7,5	13,1
	1000	38,7	37,8	40,2	38,6	2,4	3,6
	1250	33,9	35,4	42,9	44,6	10,7	19,2
200...449	500	58,1	60,6	62,0	74,7	16,6	26,7
	750	54,7	53,5	52,5	58,7	6,2	9,8
	1000	57,7	57,1	54,3	57,7	3,4	5,8
	1250	60,5	59,6	52,3	53,8	8,2	14,8
40...199	500	5,0	7,7	5,3	6,8	2,7	4,6
	750	1,7	2,5	3,3	4,5	2,8	4,3
	1000	3,6	5,1	5,5	3,6	1,9	3,6
	1250	5,6	5,0	4,8	1,6	4,0	6,5

Таблица 5. Оценка статистической значимости результатов для сечения А

Table 5. Evaluation of statistical significance of results for section A

Размер фракции, мкм Size of fraction, μm	Расстояние от модели огнетушителя до сечения А ($L_A = 50$ см) Distance from fire extinguisher model to section A ($L_A = 50$ cm)						
	Содержание частиц фракции в сечении, % масс., по 4 измерениям Content of fraction particles in section, % mass, by 4 dimensions				Среднее арифметическое содержания частиц фракции в сечении, % масс. Average arithmetic content of fraction particles in section, % mass	Дисперсия среднего арифметического содержания частиц фракции S_n^2 Dispersion of the average arithmetic of the particle content of the fraction S_n^2	Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического содержания частиц фракции S_n Standard deviation of the average arithmetic of the particle content of the fraction S_n
	1	2	3	4			
450...629	36,9	32,7	31,8	18,5	30,0	63,46	7,97
200...449	58,1	62,0	60,6	74,7	63,9	54,92	7,41
40...199	5,0	5,3	7,7	6,8	6,2	1,62	1,27

Расчет отношения дисперсий по критерию Фишера Calculation of the dispersions relation by Fischer's criterion

Фракция Fraction	200...449	40...199
450...629	$F_p = S_1^2 / S_3^2 = 63,46 / 54,92 = 1,16$ Отклонение незначимое / Insignificant deviation	$F_p = S_1^2 / S_3^2 = 63,46 / 1,62 = 39,17$ Отклонение значимое / Significant deviation
200...449		$F_p = S_2^2 / S_2^2 = 54,92 / 1,62 = 33,90$ Отклонение значимое / Significant deviation

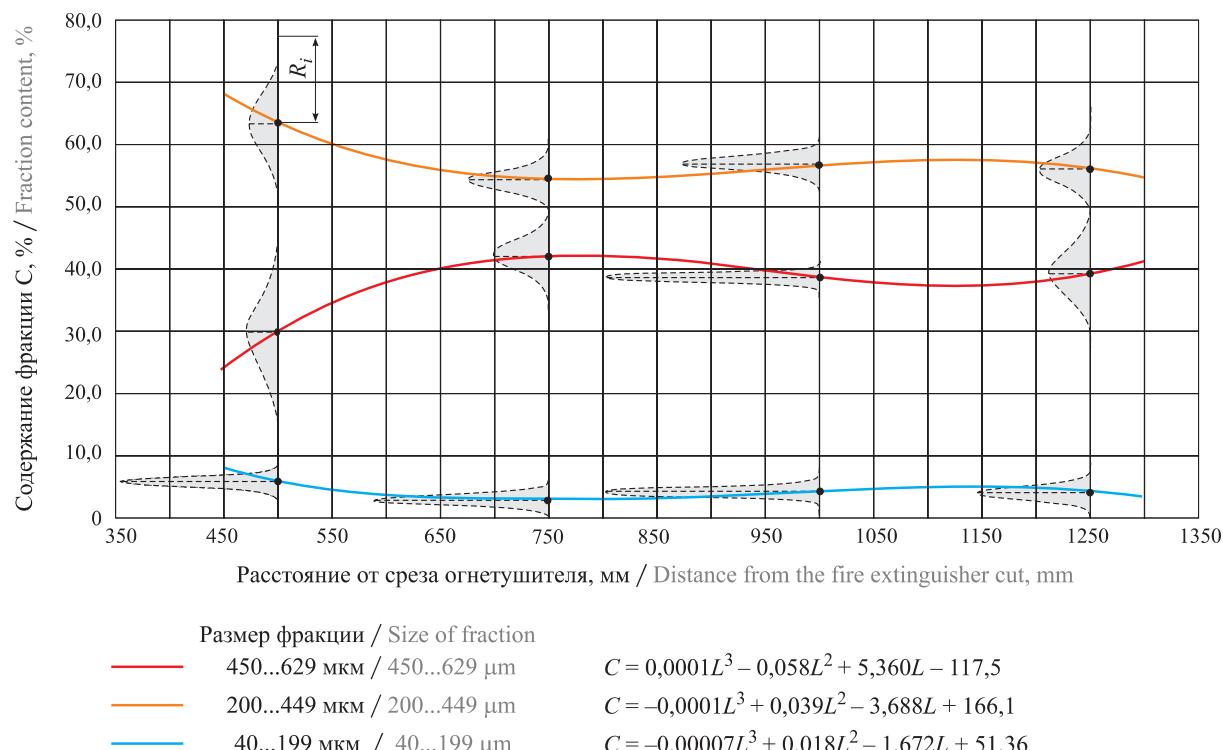
Примечание. S_1^2 , S_2^2 , S_3^2 — значения дисперсий для содержания частиц фракций размером 450...629, 200...449 и 40...199 мкм соответственно.

Note. S_1^2 , S_2^2 , S_3^2 is dispersion values for the particle content of fractions 450...629, 200...449 and 40...199 μm respectively.

Таблица 6. Оценка статистической значимости результатов для сечений Б, В и Г

Table 6. Evaluation of statistical significance of results for sections B, V and G

Фракция Fraction	Сечение (расстояние от модели огнетушителя) / Section (distance from fire extinguisher model)					
	Б ($L_B = 750$ мм) B ($L_B = 750$ mm)		B ($L_B = 1000$ мм) V ($L_V = 1000$ mm)		Г ($L_G = 1250$ мм) G ($L_G = 1250$ mm)	
	200...449	40...199	200...449	40...199	200...449	40...199
450...629	$F_p = 1,79$ Отклонение незначимое Insignificant deviation	$F_p = 9,30$ Отклонение значимое Significant deviation	$F_p = 2,63$ Отклонение незначимое Insignificant deviation	$F_p = 1,01$ Отклонение незначимое Insignificant deviation	$F_p = 1,69$ Отклонение незначимое Insignificant deviation	$F_p = 8,79$ Отклонение значимое Significant deviation
200...449		$F_p = 5,18$ Отклонение незначимое Insignificant deviation		$F_p = 2,67$ Отклонение незначимое Insignificant deviation		$F_p = 5,20$ Отклонение незначимое Insignificant deviation

**Рис. 3.** Изменения процентного содержания различных фракций в поперечном сечении нестационарного газового потока в зависимости от расстояния L : частота распределения погрешностей содержания фракций обозначена серым цветом; R_i — отклонение от среднего значения содержания частиц по массе; i — номер фракцииFig. 3. Changes in the content of different fractions in the cross-section of the non-stationary gas stream depending on the distance L : frequency of error distribution of fractions content are indicated in gray; R_i is the deviation from the average particle content by mass; i is the fraction number

Выводы

1. Установлены и аналитически описаны закономерности распределения частиц различных фракций огнетушащего порошка в поперечном сечении нерегулируемого нестационарного газового потока, которые могут быть использованы при поиске способов регулирования фракций огнетушащего порошка в процессе тушения очага пожара.

2. Установлено, что наиболее представительны и стабильны по точности (правильности и прецизионности) результаты содержания фракций порошка в сечении нестационарного газового потока на расстоянии 1000 мм от среза огнетушителя, что необходимо учитывать при проведении дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li H., Feng L., Du D., Guo X., Hua M., Pan X.* Fire suppression performance of a new type of composite superfine dry powder // *Fire and Materials.* — 2019. — Vol. 43, Issue 8. — P. 905–916. DOI: 10.1002/fam.2750.
2. *Сабинин О. Ю., Агаларова С. М.* Огнетушащие порошки. Проблемы. Состояние вопроса // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2007. — Т. 16, № 6. — С. 63–68.
3. *Сабинин О. Ю.* Оптимальные характеристики огнетушащих порошков и параметры их подачи для импульсных модулей порошкового пожаротушения : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2008. — 176 с.
4. *Лапшин Д. Н.* Модифицирование огнетушащих порошковых составов на основе фосфата и сульфата аммония в условиях интенсивных механических воздействий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Иваново, 2014. — 16 с.
5. *Huang D., Wang X., Yang J.* Influence of particle size and heating rate on decomposition of BC dry chemical fire extinguishing powders // *Particulate Science and Technology.* — 2015. — Vol. 33, Issue 5. — P. 488–493. DOI: 10.1080/02726351.2015.1013591.
6. *Лапшин Д. Н., Кунин А. В., Смирнов С. А.* Описание процесса разложения компонентов огнетушащего порошка на основе фосфатов аммония // Фундаментальные и прикладные проблемы в научном обеспечении пожарной безопасности : матер. конф. — М. : Национальная академия наук пожарной безопасности, 2012. — С. 27.
7. *Лапшин Д. Н., Смирнов С. А., Кунин А. В.* Исследование теплового эффекта разложения огнетушащих порошковых композиций // XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (г. Волгоград, 25–30 сентября 2011 г.) : тез. докл. — В 4 т. — Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. — Т. 3. — С. 119.
8. *Баратов А. Н., Богданов Л. П.* Огнетушащие порошковые составы. — М. : Стройиздат, 1982. — 72 с.
9. *Yan Y., Han Z., Zhao L., Du Z., Cong X.* Study on the relationship between the particle size distribution and the effectiveness of the K-powder fire extinguishing agent // *Fire and Materials.* — 2018. — Vol. 42, Issue 3. — P. 336–344. DOI: 10.1002/fam.2500.
10. *Lee E., Choi Y.* Effects of particle size of dry water on fire extinguishing performance // *Journal of the Korean Society of Safety.* — 2019. — Vol. 34, Issue 3. — P. 28–35. DOI: 10.14346/JKOSOS.2019.34.3.28.
11. *Liu H.-Q., Zong R.-W., Lo S., Hu Y., Zhi Y.-R.* Fire extinguishing efficiency of magnesium hydroxide powders under different particle size // *Procedia Engineering.* — 2018. — Vol. 211. — P. 447–455. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.035.
12. *Сытдыков М. Р., Кожевин Д. Ф., Поляков А. С.* Гранулометрические характеристики огнетушащих порошков // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). — 2014. — № 1(9). — С. 48–52.
13. *Wu Y., Zhuang H., Yu P.* Numerical simulation of gas-solid two-phase jet in a non-pressure-accumulated and handheld fire extinguisher // *Proceedings of the 3rd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM 2018) (Shanghai, China, July 22–23, 2018).* — Atlantis Press, 2018. — Vol. 160. — P. 93–98. DOI: 10.2991/msam-18.2018.22.
14. *Yuu S., Umekage T., Johno Y.* Numerical simulation of air and particle motions in bubbling fluidized bed of small particles // *Powder Technology.* — 2000. — Vol. 110, Issue 1-2. — P. 158–168. DOI: 10.1016/s0032-5910(99)00277-6.
15. *Kitsak A. I.* The dynamics of dry chemical powder particles towards the fire source during their pulse feeding into the combustion zone // *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza.* — 2018. — Vol. 49, No. 1. — P. 76–85. DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.7.
16. *Долговидов А. В., Сабинин О. Ю.* Автоматические средства подачи огнетушащих порошков // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2008. — Т. 17, № 1. — С. 62–67.
17. *Сытдыков М. Р., Кожевин Д. Ф., Поляков А. С.* Способ и результаты оценки распределения частиц огнетушащих порошков в потоке аэрозоля // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2014. — № 3(31). — С. 60–67.
18. *Polyakov A. S., Kozhevina D. F., Konstantinova A. S.* Regularities of dry chemical powder particles mass distribution in cross sections of a non-stationary gas stream // *Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration : Proceedings of the International Conference (Beijing, PRC, May 16–17, 2019).* — Part 2. — P. 163–173.
19. *Коузов П. А.* Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. — 3-е изд., перераб. — Л. : Химия, 1987. — 265 с.
20. *Глурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов. — 9-е изд., стер. — М. : Высшая школа, 2003. — 479 с.

REFERENCES

1. H. Li, L. Feng, D. Du, X. Guo, M. Hua, X. Pan. Fire suppression performance of a new type of composite superfine dry powder. *Fire and Materials*, 2019, vol. 43, issue 8, pp. 905–916. DOI: 10.1002/fam.2750.
2. O. Yu. Sabinin, S. M. Agalarova. Dry chemical powders. Problems. Question state. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 6, pp. 63–68 (in Russian).
3. O. Yu. Sabinin. *Optimal characteristics of dry chemical powders and parameters of their supply for pulse modules of powder fire extinguishing*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, 2008. 176 p. (in Russian).
4. D. N. Lapshin. *Modification of dry chemical powders compositions based on ammonium phosphate and sulfate under intensive mechanical effects*. Abstr. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Ivanovo, 2014. 16 p. (in Russian).
5. D. Huang, X. Wang, J. Yang. Influence of particle size and heating rate on decomposition of BC dry chemical fire extinguishing powders. *Particulate Science and Technology*, 2015, vol. 33, issue 5, pp. 488–493. DOI: 10.1080/02726351.2015.1013591.
6. D. N. Lapshin, A. V. Kunin, S. A. Smirnov. Description of decomposition process of dry chemical powders components based on ammonium phosphates. In: *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy v nauchnom obespechenii pozharnoy bezopasnosti* [Fundamental and applied problems in scientific fire safety]. Proceedings of conference. Moscow, National Academy of Fire Safety Sciences Publ., 2012, p. 27 (in Russian).
7. D. N. Lapshin, S. A. Smirnov, A. V. Kunin. Investigation of thermal effect of dry chemical powders compositions decomposition. In: *XIX Mendeleyevskiy syezd po obshchey i prikladnoy khimii* [XIX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry]. Volgograd, September 25–30, 2011. Abstracts of conference. Volgograd, Volgograd State Technical University Publ., vol. 3, p. 119 (in Russian).
8. A. N. Baratov, L. P. Vogman. *Ognetushashchiye poroshkovyye sostavy* [Fire extinguishing powder structures]. Moscow, Stroyizdat, 1982. 72 p. (in Russian).
9. Y. Yan, Z. Han, L. Zhao, Z. Du, X. Cong. Study on the relationship between the particle size distribution and the effectiveness of the K-powder fire extinguishing agent. *Fire and Materials*, 2018, vol. 42, issue 3, pp. 336–344. DOI: 10.1002/fam.2500.
10. E. Lee, Y. Choi. Effects of particle size of dry water on fire extinguishing performance. *Journal of the Korean Society of Safety*, 2019, vol. 34, issue 3, pp. 28–35. DOI: 10.14346/JKOSOS.2019.34.3.28.
11. H.-Q. Liu, R.-W. Zong, S. Lo, Y. Hu, Y.-R. Zhi. Fire extinguishing efficiency of magnesium hydroxide powders under different particle size. *Procedia Engineering*, 2018, vol. 211, pp. 447–455. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.035.
12. M. R. Sytdykov, D. F. Kozhevnik, A. S. Poliakov. Granulometric characteristics of fire extinguishing powders. *Prirodnye i tekhnogenyye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) / Natural and Technological Risks (Physics-Mathematical and Applied Aspects)*, 2014, no. 1(9), pp. 48–52 (in Russian).
13. Y. Wu, H. Zhuang, P. Yu. Numerical simulation of gas-solid two-phase jet in a non-pressure-accumulated and handheld fire extinguisher. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM 2018) (Shanghai, China, July 22–23, 2018)*. Atlantis Press, 2018, vol. 160, pp. 93–98. DOI: 10.2991/msam-18.2018.22.
14. S. Yuu, T. Umekage, Y. Johno. Numerical simulation of air and particle motions in bubbling fluidized bed of small particles. *Powder Technology*, 2000, vol. 110, issue 1–2, pp. 158–168. DOI: 10.1016/s0032-5910(99)00277-6.
15. A. I. Kitsak. The dynamics of dry chemical powder particles towards the fire source during their pulse feeding into the combustion zone. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 2018, vol. 49, no. 1, pp. 76–85. DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.7.
16. A. V. Dolgovidov, O. Yu. Sabinin. Automatic means for supplying dry chemical powders. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2008, vol. 17, no. 1, pp. 62–67 (in Russian).
17. M. R. Sytdykov, D. F. Kozhevnik, A. S. Poliakov. Method and results of the distribution of particles of fire extinguishing powders in the flow of aerosol. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2014, no. 3(31), pp. 60–67 (in Russian).
18. A. S. Polyakov, D. F. Kozhevnik, A. S. Konstantinova. Regularities of dry chemical powder particles mass distribution in cross sections of a non-stationary gas stream. In: *Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration. Proceedings of the International Conference (Beijing, PRC, May 16–17, 2019)*, part 2, pp. 163–173.
19. P. A. Kouzov. *Osnovy dispersnogo analiza sostava promyshlennykh pyley i izmelchennykh materialov* [Basis of dispersed analysis of the composition of industrial dusts and ground materials]. 3rd ed. Lenigrad, Khimiya Publ., 1987. 265 p. (in Russian).

20. V. E. Gmurman. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. 9th ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 479 p. (in Russian).

*Поступила 10.10.2019, после доработки 15.11.2019;
принята к публикации 28.11.2019*

*Received 10 October 2019; Received in revised form 15 November 2019;
Accepted 28 November 2019*

Информация об авторах

ПОЛЯКОВ Александр Степанович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-4743-3941; e-mail: poljakov_as@mail.ru

КОЖЕВИН Дмитрий Федорович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6418-107X; e-mail: yagmort_kdf@mail.ru

КОНСТАНТИНОВА Алина Станиславовна, аспирант кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2893-9058; e-mail: as_konstantinova@mail.ru

Information about the authors

Aleksandr S. POLYAKOV, Doctor Sci. (Eng.), Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor of Physical and Technical Bases of Fire Safety Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4743-3941; e-mail: poljakov_as@mail.ru

Dmitriy F. KOZHEVIN, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Physical and Chemical Bases of the Burning and Extinguishing Processes Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6418-107X; e-mail: yagmort_kdf@mail.ru

Alina S. KONSTANTINOVA, Adjunct of Physical and Technical Bases of Fire Safety Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2893-9058; e-mail: as_konstantinova@mail.ru