

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 1. С. 51–56  
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(1):51-56

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.4

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.01.51-56>

## Взрывоопасность аэровзвеси сухой молочной сыворотки

Николай Львович Полетаев 

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В нормативной литературе многих стран принято относить фракцию горючей пыли с размером частиц более 500 мкм к дисперсным материалам, невзрывоопасным в состоянии аэровзвеси. Представляет интерес изучение взрывоопасности аэровзвесей, которые не подчиняются данному правилу. В частности, известна взрывоопасность образцов сухой молочной сыворотки (далее – сыворотки) со средним размером частиц 41, 162 и 750 мкм, выявленная испытаниями в камере объемом 1 м<sup>3</sup>. Поставлена задача определить максимальный размер частиц взрывоопасной фракции сыворотки  $d_{cr}$  с помощью ранее разработанной процедуры и продемонстрировать нарушение упомянутого выше правила.

**Метод обработки экспериментальных данных.** Для упомянутых трех образцов сыворотки с известными значениями бедного концентрационного предела взрываемости ( $\text{НКПР}_1 = 250 \text{ г}/\text{м}^3$ ,  $\text{НКПР}_2 = 250 \text{ г}/\text{м}^3$  и  $\text{НКПР}_3 = 500 \text{ г}/\text{м}^3$ ) построены непрерывные функции  $F$  распределения частиц по размерам  $d$ . Полученные функции  $F_1(d)$ ,  $F_2(d)$  и  $F_3(d)$  соответственно представлялись распределениями Розина – Раммлера, заполняющими промежутки между дискретными данными ситового анализа образцов.

**Оценка  $d_{cr}$ .** Следуя известной процедуре (Полетаев, 2014), использовали информацию о первом и третьем образцах сыворотки. Находили значения  $d_{cr}$  из уравнения  $F_1(d_{cr})/F_3(d_{cr}) = \text{НКПР}_3/\text{НКПР}_1$ . Решение уравнения дает  $d_{cr} = 750 \text{ мкм}$ .

**Обсуждение результатов.** Полученная оценка  $d_{cr}$  намного превышает предельное значение параметра, предлагаемое в нормах. Данная оценка носит объективный характер и не может объясняться известным из практики измельчением крупных частиц в процессе распыления. В пользу последнего утверждения свидетельствует характерное снижение индекса взрывоопасности сыворотки с ростом среднего размера частиц рассмотренных трех образцов.

**Выводы.** Максимальный размер частиц взрывоопасной фракции сыворотки составляет величину порядка 750 мкм.

**Ключевые слова:** порошок сыворотки; крупнодисперсная пыль; взрыв пыли; 1-м<sup>3</sup> камера; взрывоопасная фракция

**Для цитирования:** Полетаев Н.Л. Взрывоопасность аэровзвеси сухой молочной сыворотки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 51–56. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.51-56

 Полетаев Николай Львович, e-mail: nlpvniipo@mail.ru

## Explosion hazard of whey powder mixed with air

Nikolay L. Poletaev 

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** In many countries, regulations consider combustible dust with a particle size of more than 500 μm as dispersed material non-explosive if mixed with air. The explosiveness of mixtures of air and some substance arouses researchers' interest. In particular, the explosiveness of whey powder specimens (hereinafter referred to as whey powder) with an average particle size of 41, 162 and 750 μm, was identified in the process of their testing in a 1 m<sup>3</sup> chamber. The task is to find out the maximum particle size of whey powder  $d_{cr}$  using the earlier developed procedure and to demonstrate its failure to conform to the rule specified above.

**Method to process experimental data.** Continuous functions  $F$  of particle size distribution  $d$  were constructed for three whey powder specimens having the following values of the lower explosive limit ( $\text{LEL}_1 = 250 \text{ g}/\text{m}^3$ ,  $\text{LEL}_2 = 250 \text{ g}/\text{m}^3$  and  $\text{LEL}_3 = 500 \text{ g}/\text{m}^3$ , respectively). Resulting functions  $F_1(d)$ ,  $F_2(d)$  and  $F_3(d)$  were presented using Rosin – Rammler distributions that filled the gaps between the discrete data obtained as a result of the sieve analysis.

$d_{cr}$  evaluation. We used information about the first and third whey powder specimens in compliance with the well-known procedure (Poletaev, 2014).  $d_{cr}$  values were identified using equation  $F_1(d_{cr})/F_3(d_{cr}) = \text{LEL}_3/\text{LEL}_1$ . Having solved the equation, we found that  $d_{cr} = 750 \mu\text{m}$ .

**Discussion.** The obtained evaluation of  $d_{cr}$  is much higher than the limit value of the parameter proposed in the regulations. This evaluation is of objective origin, and it cannot be explained by the grinding of large particles during the spraying process. The latter statement is supported by a characteristic decrease in the explosibility index of whey powder and an increase in the average particle size (for explosive fractions) of the three specimens in question.

**Conclusions.** The maximum particle size of the explosive whey fraction is about  $750 \mu\text{m}$ .

**Keywords:** whey powder; coarse dust; dust explosion;  $1 \text{ m}^3$  chamber; explosive fraction

**For citation:** Poletaev N.L. Explosion hazard of whey powder mixed with air. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):51-56. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.51-56 (rus).

✉ Nikolay Lvovich Poletaev, e-mail: nlpvnii@yandex.ru

## Введение

Известно, что проявление взрывоопасности мелко-дисперсным горючим материалом в состоянии аэровзвеси возможно лишь при достаточно малом размере частиц этого материала [1, 2]. Данное обстоятельство учитывается в нормативной литературе Канады<sup>1</sup>, России<sup>2</sup>, США<sup>3, 4</sup> и многих других стран в виде правила, согласно которому допускается относить фракцию горючей пыли с размером частиц более  $500 \mu\text{m}$  к дисперсным материалам, невзрывоопасным в состоянии аэровзвеси. Действительно, многие исследования показали, что горючие пыли могут быть взрывобезопасны уже с размера, превышающего  $30\dots100 \mu\text{m}$  [3–7].

В то же время представляет интерес изучение взрывоопасности аэровзвесей, которые не подчиняются указанному правилу. В частности, известна взрывоопасность фракций образцов сухой молочной сыворотки (далее — сыворотки) со средним размером частиц  $41, 162$  и  $750 \mu\text{m}$ , выявленная испытаниями в камере объемом  $1 \text{ m}^3$ . Поставлена задача определить максимальный размер частиц взрывоопасной фракции сыворотки  $d_{cr}$  с помощью ранее разработанной процедуры [3, 8] и продемонстрировать нарушение упомянутого выше правила.

Во избежание недоразумений, связанных с разнообразием форм частиц, предполагается, что рассматриваемые здесь и далее дисперсные материалы состоят из частиц, которые можно характеризовать единственным габаритным размером. Допускается, что приближенный характер такого подхода не окажет существенного влияния на результаты данного исследования.

<sup>1</sup> CSA C22.1–2021. The Canadian Electrical Code (CE Code): 2021.

<sup>2</sup> ГОСТ ISO/IEC 80079-20-2–2017. Взрывоопасные среды. Часть 20-2. Характеристики материалов. Методы испытаний горючей пыли.

<sup>3</sup> NFPA 499 (2021). Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas. Current Edition: 2021.

<sup>4</sup> NFPA 70. National Electrical Code, Current Edition: 2020.

## Метод обработки экспериментальных данных

Использование процедуры [3] предполагает наличие не менее двух полидисперсных образцов исследуемой пыли с существенно отличными распределениями частиц по размерам  $F(d)$  и различными значениями НКПР. Под  $F(d)$  понимается массовая доля частиц, имеющих размер  $d$ .

Согласно [9], для упомянутых выше трех полидисперсных образцов сыворотки имеются известные данные дискретного ситового анализа и показатели взрыва в  $1\text{-м}^3$  камере, которые представлены в табл. 1 и 2 соответственно, где  $d_{50}$  — медианный размер частицы, определяемый условием  $F(d_{50}) = 0,5$ ;  $P_{\max}$  — максимальное давление взрыва, кПа;  $(dP/dt)_{\max}$  — максимальная скорость нарастания давления взрыва, бар/с; 1 бар =  $100 \text{ kPa}$ .

**Таблица 1.** Данные, % масс., ситового анализа образцов сыворотки [9]

**Table 1.** Data, wt %, on the sieve analysis of whey powder specimens [9]

Номер образца Specimen No.	$< 20 \mu\text{m}$	$< 20 \mu\text{m}$	$< 32 \mu\text{m}$	$< 32 \mu\text{m}$	$< 71 \mu\text{m}$	$< 71 \mu\text{m}$	$< 125 \mu\text{m}$	$< 125 \mu\text{m}$	$< 500 \mu\text{m}$	$< 500 \mu\text{m}$	$d_{50}, \mu\text{m}$ $d_{50}, \mu\text{m}$
1	13	35	73	—	—	—	—	—	—	—	41
2	—	—	20	40	—	—	—	—	—	—	152
3	—	—	8	16	40	40	—	—	—	—	750

**Таблица 2.** Показатели взрыва образцов сыворотки

**Table 2.** Explosion parameters of whey powder specimens

Номер образца Specimen No.	НКПР, $\text{g}/\text{m}^3$ $\text{LEL}, \text{g}/\text{m}^3$	$P_{\max}$ , $\text{kPa}$ $P_{\max}$ , $\text{kPa}$	$(dP/dt)_{\max}$ , бар/с $(dP/dt)_{\max}$ , бар/с	$d_{50}^*, \mu\text{m}$ $d_{50}^*, \mu\text{m}$
1	125	9,8	140	41
2	125	7,4	41	152
3	250	5,8	27	250

Поскольку значения НКПР первых двух образцов совпадают, для оценки  $d_{cr}$  будет использоваться только один из этих образцов совместно с третьим. Для определенности это будут первый и третий образцы. Как увидим из дальнейшего изложения, результат оценки  $d_{cr}$  останется неизменным, если в упомянутой паре произвести замену первого образца на второй.

Необходимые для последующего анализа непрерывные функции распределения частиц образцов по размерам моделировались следующим образом. Функция  $F(d)$  на отрезке оси  $d$  между соседними аргументами, для которых величина  $F$  известна по результатам ситового анализа, представляется распределением Розина – Раммлера [10]:

$$F(d) = 1 - [1 - F(d_1)]^B,$$

где  $B = (d/d_1)^{G_k}$ ;

$G_k$  — крутизна функции распределения;

$$G_k = \frac{\ln\left(\frac{\ln[1 - F(d_2)]}{\ln[1 - F(d_1)]}\right)}{\ln(d_2/d_1)},$$

$F(d_1), F(d_2)$  — известные значения функции распределения на концах рассматриваемого отрезка  $d_1$  и  $d_2$ ;

индекс  $k$  принимает значение от 1 до 4, отвечающее порядковому номеру рассматриваемого отрезка оси  $d$  в следующем перечне отрезков: от 20 до 32 мкм, от 32 до 71 мкм, от 71 до 125 мкм, от 125 до 500 мкм.

В табл. 3 приводятся значения параметра  $G_k$ .

Полученные кусочно-гладкие и непрерывные функции распределения  $F_1, F_2$  и  $F_3$  представлены на рисунке.

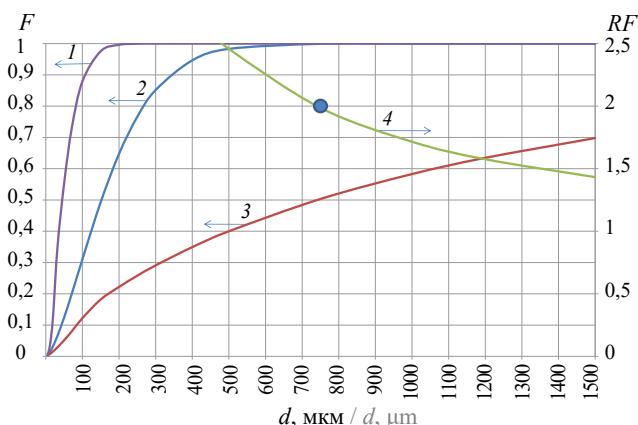
### Оценка $d_{cr}$

Согласно построению процедуры [3], оценка параметра  $d_{cr}$  использует следующие три предположения о закономерностях горения пыли заданного химического состава. НКПР полидисперсной пыли обратно пропорционален полноте выгорания пыли вблизи НКПР [11]. Зависимость полноты выгорания

Таблица 3. Результаты обработки данных табл. 1

Table 3. Table 1 data processing results

Номер образца Specimen No.	$G_k$			
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
1	2,403	1,395	—	—
2	—	—	1,489	—
3	—	—	1,30412	0,77541



Функции распределения  $F_1$  (1),  $F_2$  (2) и  $F_3$  (3) частиц сыворотки по размерам  $d$  и отношение  $RF = F_1/F_3$  (4). Жирной точкой на кривой 4 отмечен случай  $RF = \text{НКПР}_3/\text{НКПР}_1 = 2$ , который отвечает  $d_{cr} = 750$  мкм

Functions  $F_1$  (1),  $F_2$  (2) and  $F_3$  (3) showing whey powder particles distribution by size  $d$  and their ratios  $RF = F_1/F_3$  (4). The bullet point on curve 4 marks the case  $RF = \text{LEL}_3/\text{LEL}_1 = 2$ , which corresponds to  $d_{cr} = 750$   $\mu\text{m}$

$Z$  монодисперсной фракции пыли от размера частиц  $d$  вблизи НКПР близка к одноступенчатой функции (см., например, [12]) и может быть представлена в виде:  $Z = 1$ , если  $d \leq d_{cr}$ ;  $Z = 0$ , если  $d > d_{cr}$ . Для оценки НКПР полидисперсной пыли, рассматриваемой в виде смеси пылей, представляющих монодисперсные фракции, можно использовать правило Ле Шателье [12].

В рамках используемых предположений  $d_{cr}$  для сыворотки находят из геометрически наглядного решения уравнения:

$$F_1(d_{cr})/F_3(d_{cr}) = \text{НКПР}_3/\text{НКПР}_1 = 2.$$

Согласно представленной на рисунке графической информации, имеем для сыворотки  $d_{cr} = 750$  мкм. К аналогичному результату приводит использование информации о втором и третьем образцах сыворотки.

### Обсуждение результатов

Полученная оценка  $d_{cr} = 750$  мкм намного превышает предельное значение параметра, предлагаемое в нормах (до 500 мкм). Тем не менее отметим, что в научной литературе можно встретить результаты исследования дисперсных материалов, для которых зафиксированы еще большие значения рассматриваемого параметра [9].

При этом не все высокие значения  $d_{cr} > 500$  мкм подтверждаются средствами объективного контроля. Основной причиной несоответствия измеряемых и фактических значений  $d_{cr}$  является изменение тестируемого дисперсного материала в процессе распыления во взрывной камере, что отмечается многими исследователями [13–19]. Например,

в работе [13] при исследовании порошка серы в 20-литровой камере регистрировалась взрывоопасность фракций серы с размером частиц, достигающим 2000 мкм. Авторы [13] отметили слабое влияние дисперсности порошка серы на величину НКПР аэровзвеси. Вследствие этого возникло предположение об измельчении крупных частиц серы в процессе распыления порошка серы во взрывной камере, которое подтвердилось прямыми измерениями дисперсности распыленного образца (в отсутствие зажигания).

При исследовании сыворотки в настоящей работе можно исключить существенное измельчение образца, поскольку в отличие от описанного выше случая с серой наблюдается резкое снижение взрывоопасности аэровзвеси (скорости нарастания давления взрыва  $(dP/dt)_{\max}$ ) с ростом среднего размера взрывоопасной фракции частиц  $d_{50}^*$ . Значения

последнего приводятся в последнем столбце табл. 2. В отличие от среднемассового размера частиц  $d_{50}$  величина  $d_{50}^*$  характеризует средний размер частиц взрывоопасной фракции полидисперсного материала и, как показали расчеты [3, 4, 20], в большей степени соответствует использованию в качестве средней характеристики дисперсности. Метод ее определения приводится в [20].

## Выводы

Рассмотрены известные данные о дисперсном составе и бедном пределе взываемости трех полидисперсных образцов сухой молочной сыворотки. Данные обработаны согласно методике [3], выполнена оценка максимального размера частиц взрывоопасной фракции сыворотки, который составил 750 мкм.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Di Benedetto A., Russo P., Amyotte P., Marchand N.* Modelling the effect of particle size on dust explosions // Chemical Engineering Science. 2010. Vol. 65. Issue 2. Pp. 772–779. DOI: 10.1016/j.ces.2009.09.029
2. *Ichinose K., Mogi T., Dobashi R.* Effects of the particle size and agglomeration on the minimum explosive concentration and flame propagation velocity in dust clouds // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2020. Vol. 56. Issue 4. Pp. 421–426. DOI: 10.1134/s001050822004005x
3. Полетаев Н.Л. Расчетно-экспериментальная оценка максимального размера частиц взрывоопасной монодисперсной аэровзвеси // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 9. С. 15–26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15-26
4. Полетаев Н.Л. Оценка максимального размера взрывоопасных частиц сульфида железа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 5–11. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.5-11
5. Soundararajan R., Amyotte P.R., Pegg M.J. Explosibility hazard of iron sulphide dusts as a function of particle size // Journal of Hazardous Materials. 1996. Vol. 51. Issue 1–3. Pp. 225–239. DOI: 10.1016/s0304-3894(96)01825-0
6. Полетаев Н.Л. Оценка взрывоопасности ядерного графита в 1-м<sup>3</sup> камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 15–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21
7. Graphite dust deflagration: A review of international data with particular reference to the decommissioning of graphite moderated reactors. EPRI, Palo Alto, CA, 2007. P. 1014797.
8. Poletaev N.L., Korolchenko A.Y. A now on the relationship between the lower explosibility limit of dust and particle size // Proceedings of the Joint Meeting of the Russian and Japanese Sections of the Combustion Institute. Chernogolovka, Moscow Region, 1993. Pp. 116–117.
9. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Stauben // SFT-Report. No. 2. Pp. 2–79. 100 S.
10. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд. Л. : Химия, 1987. 264 с.
11. Selle H., Zehr J. Beurteilung der experimente werte für die untere zündgrenze von staub // Luft-Gemischen mit Hilfe Thermochemischer Berechnungen. Staub und Reinhalt Luft, 1954. Bd. 38. 583 S.
12. Hertzberg M., Cashdollar K.L. Introduction to dust explosions. The industrial dust explosions / ed. K.L. Cashdollar, M. Hertzberg. ASTM Special Technical Publication 958. Philadelphia : ASTM, 1987. Pp. 5–32.
13. Altwal J.M., Véchot L.N. Experimental study of the influence of particle size on Minimum Explosible Concentration of sulfur dust // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. P. 104507. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104507
14. Bagaria P., Zhang J., Mashuga C. Effect of dust dispersion on particle breakage and size distribution in the minimum ignition energy apparatus // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.001
15. Sanchirico R., Di Sarli V., Russo P., Di Benedetto A. Effect of the nozzle type on the integrity of dust particles in standard explosion tests //

- Powder Technology. 2015. Vol. 279. Pp. 203–208. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.04.003
16. Bagaria P., Zhang J., Yang E., Dastidar A., Mashuga C. Effect of dust dispersion on particle integrity and explosion hazards // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 44. Pp. 424–432. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.001
  17. Bagaria P., Li Q., Dastidar A., Mashuga C. Classification of particle breakage due to dust dispersion // Powder Technology. 2018. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.089
  18. Bagaria P., Hall B., Dastidar A., Mashuga C. Effect of particle size reduction due to dust disper-
  - sion on minimum ignition energy (MIE) // Powder Technology. 2019. Vol. 356. Pp. 304–309. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.030
  19. Miller J., Mulligan P., Johnson C.E. Commutation of pulverized Pittsburgh coal during ASTM E1226-12a dust combustibility testing // Powder Technology. 2020. Vol. 375. Pp. 28–32. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.07.059
  20. Полетаев Н.Л. Влияние дисперсности частиц на динамику горения алюминия в 1-м<sup>3</sup> камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 6–13. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.6-13

## REFERENCES

1. Di Benedetto A., Russo P., Amyotte P., Marchand N. Modelling the effect of particle size on dust explosions. *Chemical Engineering Science*. 2010; 65(2):772-779. DOI: 10.1016/j.ces.2009.09.029
2. Ichinose K., Mogi T., Dobashi R. Effects of the particle size and agglomeration on the minimum explosive concentration and flame propagation velocity in dust clouds. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2020; 56(4):421-426. DOI: 10.1134/s001050822004005x
3. Poletaev N.L. Experiment-calculated estimating of the maximum particle size of explosive monodisperse dust-air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(9): 15-26 (rus).
4. Poletaev N.L. Estimating the maximum size of explosive iron sulfide particles. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3): 5-11. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.5-11 (rus).
5. Soundararajan R., Amyotte P.R., Pegg M.J. Explosibility hazard of iron sulphide dusts as a function of particle size. *Journal of Hazardous Materials*. 1996; 51(1-3): 225-239. DOI: 10.1016/s0304-3894(96)01825-0
6. Poletaev N.L. Explosibility of nuclear graphite measured in a 1 m<sup>3</sup> chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):15-21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21 (rus).
7. Graphite dust deflagration: A review of international data with particular reference to the decommissioning of graphite moderated reactors. EPRI, Palo Alto, CA, 2007; 1014797.
8. Poletaev N.L., Korolchenko A.Y. A now on the relationship between the lower explosibility limit of dust and particle size. *Proceedings of the Joint Meeting of the Russian and Japanese Sections of the Combustion Institute*. Chernogolovka, Moscow Region, October 1993. Pp. 116–117.
9. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. *Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Stäuben. SFT-Report*. 2; 2-79:100. (ger).
10. Kouzov P.A. *Fundamentals of the analysis of the disperse composition of industrial dusts and crushed materials*. 3th ed. Leningrad, Himiya Publ., 1987; 264.
11. Selle H., Zehr J. Beurteilung der Experimente Werte für die untere Zündgrenze von Staub. Luft-Gemischen mit Hilfe Thermochemischer Berechnungen. *Staub und Reinhalt Luft*. 1954; 38:583. (ger).
12. Hertzberg M., Cashdollar K.L. Introduction to dust explosions. The Industrial dust explosions / ed. K.L. Cashdollar, M. Henzberg. *ASTM Special Technical Publication 958*. Philadelphia, ASTM, 1987; 5-32.
13. Altwal J.M., Véchot L.N. Experimental study of the influence of particle size on Minimum Explosible Concentration of sulfur dust. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104507. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104507
14. Bagaria P., Zhang J., Mashuga C. Effect of dust dispersion on particle breakage and size distribution in the minimum ignition energy apparatus. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.001
15. Sanchirico R., Di Sarli V., Russo P., Di Benedetto A. Effect of the nozzle type on the integrity of dust particles in standard explosion tests. *Powder Technology*. 2015; 279:203-208. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.04.003
16. Bagaria P., Zhang J., Yang E., Dastidar A., Mashuga C. Effect of dust dispersion on particle integrity and explosion hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 44:42-432. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.001
17. Bagaria P., Li Q., Dastidar A., Mashuga C. Classification of particle breakage due to dust dispersion. *Powder Technology*. 2018. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.089

18. Bagaria P., Hall B., Dastidar A., Mashuga C. Effect of particle size reduction due to dust dispersion on minimum ignition energy (MIE). *Powder Technology*. 2019; 356:304-309. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.030
19. Miller J., Mulligan P., Johnson C.E. Communition of pulverized Pittsburgh coal during ASTM E1226-12a dust combustibility testing. *Powder Technology*. 2020; 375:2-32. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.07.059
20. Poletaev N.L. Particle size influence on the aluminum combustion dynamics in 1-m<sup>3</sup> chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):6-13. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.6-13 (rus).

Поступила 14.01.2023, после доработки 26.01.2023;  
принята к публикации 31.01.2023

Received January 14, 2023; Received in revised form January 26, 2023;  
Accepted January 31, 2023

### Информация об авторе

**ПОЛЕТАЕВ Николай Львович**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

### Information about the author

**Nikolay L. POLETAEV**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPo, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru