

Влияние дисперсности частиц на динамику горения алюминия в 1-м³ камере

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. Результаты стандартного исследования взрывоопасности аэрозвесей алюминия (АВА) могут способствовать развитию физики горения АВА. В частности, комплекс сведений о полидисперсности и значениях бедного предела турбулентного горения АВА в камере объемом $V = 1 \text{ м}^3$ позволил определить максимальный размер частиц взрывоопасной фракции полидисперсного образца $d_{m,t}^* \approx 40\text{--}50 \text{ мкм}$ (Полетаев, 2014). В настоящей работе устанавливается связь между динамикой горения АВА в 1-м³ камере и дисперсностью частиц. Дисперсность частиц образца описывается среднemasсовым размером частиц его взрывоопасной фракции (d_{50}^*) в отличие от работ других исследователей, которые используют среднemasсовый размер всех частиц (d_{50}).

Исходные данные. Использовались известные сведения о дисперсности и параметрах взрыва 15 образцов алюминия, исследованных в 1-м³ камере. Необходимые для расчета d_{50}^* , непрерывные функции распределения частиц по размерам представлялись распределениями Розина – Раммлера, заполняющими промежутки между дискретными данными ситового анализа образцов.

Динамика горения. Динамика турбулентного горения АВА в 1-м³ камере представлена максимальной скоростью выгорания аэрозвесей U_b . Расчет U_b производили по формуле (Китар, 1992), предназначенной для газовоздушных смесей, путем подстановки в эту формулу параметров взрыва АВА.

Результат работы и его обсуждение. Приведен график зависимости комплекса $d_{50}^* U_b$ от d_{50}^* . Усредненное значение комплекса ($\approx 33 \text{ мкм-м/с}$) постоянно в диапазоне $10 \leq d_{50}^* \leq 35 \text{ мкм}$. Последнее свойственно для произведения размера частиц на нормальную скорость ламинарного пламени в АВА (Ben Moussa, 2017) и говорит о подобии влияния дисперсности частиц на динамику турбулентного и ламинарного горения АВА.

Выводы. Дисперсность взрывоопасного полидисперсного образца алюминия определяется средним размером частиц взрывоопасной фракции образца d_{50}^* . Подobie закономерностей горения указывает на связь механизмов распространения ламинарного и турбулентного пламени в АВА.

Ключевые слова: пыль алюминия; взрывоопасная фракция; полидисперсность; турбулентность; ламинарное горение

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Влияние дисперсности частиц на динамику горения алюминия в 1-м³ камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 5. С. 6–13. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.6-13

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

Particle size influence on the aluminum combustion dynamics in 1-m³ chamber

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. The results of a standard study of the explosibility of aluminum air suspensions (AAS) can contribute to the development of AAS combustion physics. In particular, a complex of information about the polydispersity and of the AAS low explosion limit values in a 1-m³ chamber made it possible to determine the maximum particle size of the explosive fraction of a polydisperse sample $d_{m,t}^* \approx 40\text{--}50 \text{ }\mu\text{m}$ (Poletaev, 2014). In the present work, a relationship is established between the AAS combustion dynamics in a 1-m³ chamber and particle dis-

person. The dispersity of sample particles is described by the mass-average particle size of its explosive fraction (d_{50}^*), in contrast to the works of other researchers who use the mass-average size of all particles (d_{50}).

Initial data. Known information about the dispersity and explosion parameters of 15 aluminum samples studied in a 1-m³ chamber was used. The continuous particle size distribution functions necessary for calculating d_{50}^* were represented by the Rosin – Rammler distributions filling the gaps between the discrete data of the sieve analysis of the samples.

Combustion dynamics. The dynamics of AAS turbulent combustion in a 1-m³ chamber is represented by the maximum air suspension burn-up rate U_b . U_b was calculated using the formula (Kumar, 1992) intended for gas-air mixtures by substituting the AAS explosion parameters into this formula.

Results and its discussion. A plot of the $d_{50}^* U_b$ complex versus d_{50}^* is shown. The average value of the complex ($\approx 33 \mu\text{m}\cdot\text{m/s}$) is constant in the range $10 \leq d_{50}^* \leq 35 \mu\text{m}$. The latter is typical for the product of the particle size and the normal velocity of the laminar flame in AAS (Ben Moussa, 2017) and indicates the similarity of the effect of particle dispersion on the dynamics of turbulent and laminar combustion of AAS.

Conclusions. The dispersion of an explosive polydisperse aluminum sample is determined by the average particle size of the explosive fraction of the sample d_{50}^* . The similarity of the combustion patterns indicates a relationship between the mechanisms of laminar and turbulent flame propagation in AAS.

Keywords: aluminum dust; explosive fraction; polydispersity; turbulence; laminar combustion

For citation: Poletaev N.L. Particle size influence on the aluminum combustion dynamics in 1-m³ chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5):6-13. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.6-13 (rus).

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

Введение

Среди отраслей промышленности, подверженных воздействию пылевых взрывов, металлообрабатывающая отрасль является одной из наиболее часто поражаемых [1], что в значительной степени обусловлено взрывоопасными свойствами металлической пыли [2, 3]. К числу наиболее взрывоопасных металлических пылей справедливо относят мелкодисперсный алюминий.

Распространение турбулентного пламени по взрывополю алюминия (далее АВА) исследуется на протяжении многих десятилетий [3–6], что, однако, не привело ни к радикальному сокращению частоты возникновения взрывов АВА на производстве [7, 8], ни к ясному пониманию механизма горения АВА [4, 9]. Таким образом, дальнейшее изучение взрывоопасности АВА следует считать актуальным. К одному из направлений этой работы относится анализ опубликованных результатов стандартного исследования взрывоопасности АВА в камере объемом V , равным ≈ 20 л или, что предпочтительней ввиду более высокой надежности результатов, равным ≈ 1 м³.

Опубликованные результаты, как правило, содержат по каждой из исследованных АВА информацию о распределении частиц взвеси по размеру и трех показателях взрыва [3], имеющих практически значимость^{1, 2}. Это — нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР), максимальное избыточное давление взрыва P_{\max} и индекс взрывоопасности K_{st} [3]. Последний представляет нормированную максимальную скорость нарастания давления взрыва $K_{st} = V^{1/3}(dP/dt)_{\max}$.

Пример успешного анализа сведений о дисперсном составе и значениях НКПР в 1-м³ камере для нескольких полидисперсных образцов алюминия демонстрируется в [10], где получена оценка максимального размера частиц, существенно влияющих на распространение турбулентного пламени по АВА. Этот размер частиц, который обозначим символами $d_{m,t}^*$, составил величину 40...50 мкм [10]. Данный размер частиц отделяет взрывоопасную фракцию пыли «частицы с размером не более $d_{m,t}^*$ » от фракции частиц с размером более $d_{m,t}^*$, неспособных к распространению пламени по АВА.

Разумно предположить, что анализ сведений о дисперсном составе и показателях P_{\max} и K_{st} может привести к установлению количественной связи дисперсности частиц с динамикой турбулентного горения полидисперсного алюминия. Попытки подобных исследований встречались и ранее (см., например, [11–15]), но заканчивались неудачей, поскольку либо не обнаруживали упомянутой связи в явном виде, либо сводились к известному качественному результату [3]: P_{\max} и K_{st} , как правило, снижаются с ростом среднемассового размера частиц d_{50} .

Неудачи упомянутых попыток связываем с некорректным использованием величины d_{50} в качестве эффективного размера частиц исследуемого полидисперсного образца горючего материала, даже в случаях учета индекса полидисперсности [14] и индекса асимметрии [15] этого распределения. Такой вывод основан на том, что на формирование величины d_{50} могут оказывать сильное влияние крупные частицы образца, не способные к актив-

¹ NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, Current Edition: 2018.

² ГОСТ Р 12.3.047–2012 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

ному участию в горении взрывовзвеси. Естественно предполагать, что усредненный показатель дисперсности образца относится к взрывоопасной фракции образца и, в первом приближении, представляет среднемассовый размер частиц этой фракции, который обозначим символами d_{50}^* .

В настоящей работе оценивается влияние дисперсности частиц, выраженной параметром d_{50}^* , на динамику горения алюминия в 1-м³ камере.

Исходные данные

Для решения поставленной задачи в настоящей работе использовали известные результаты (табл. 1) стандартного исследования взрывоопасности турбулентной АВА различного дисперсного состава в камере объемом 1 м³ [3, 16, 17]. Здесь 1 бар = 10⁵ кПа.

Моделирование используемых в дальнейшем непрерывных функций распределения частиц образцов по размерам $F(d)$ производили следующим образом. На отрезке оси d между соседними аргументами, для которых величина F известна по результатам ситового анализа, $F(d)$ представляется распределением Розина – Рамллера [18]:

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

где $B = (d/d_1)^{G_k}$;

G_k — крутизна функции распределения;

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

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

индекс k принимает значение от 1 до 3, отвечающее порядковому номеру рассматриваемого отрезка оси d в следующем перечне отрезков: от 20 до 45 мкм, от 45 до 75 мкм, от 75 до 125 мкм.

На каждый из двух оставшихся участков оси d (область больших и область малых размеров частиц) распространяется функция распределения, построенная на смежном с ним отрезке. Расчетные значения параметра G_k приводятся в табл. 2.

На рис. 1 приводится геометрическое построение оценки d_{50}^* на примере образца АВА № 8. Значения d_{50}^* удовлетворяют соотношению $F(d_{50}^*) = 0,5F(d_{m,t}^*)$, где F — функция распределения размеров частиц рассматриваемого образца; $d_{m,t}^* = 50$ мкм.

Для демонстрации различия упоминавшихся выше средних размеров частиц полидисперсного образца на том же рисунке приводится геометричес-

Таблица 1. Исходные сведения о взрывоопасности АВА в 1-м³ камере

Table 1. Initial information about the explosiveness of АВА in a 1-m³ chamber

Номер образца Number sample	Значение F , % масс., по данным ситового анализа <i>F value, % wt., according to sieve analysis</i>				d_{50} , мкм d_{50} , μm	P_{max} , бар P_{max} , bar	$(dP/dt)_{max}$, бар/с $(dP/dt)_{max}$, bar/s	Источник сведений Data source
	20 мкм / 20 μm	32 мкм / 32 μm	71 мкм / 71 μm	125 мкм / 125 μm				
1	0,96	0,99	–	–	4,6	10	500	[17]
2	0,79	0,88	0,94	–	6	11,2	515	[3]
3	45	70	98	–	22	12,5	400	[3]
4	30	96	–	–	23	11	320	[3]
5	0,33	0,60	0,93	–	27	12,4	342	[16]
6	–	0,60	0,82	–	27	13	600	[16]
7	0,17	0,60	0,94	–	29	12,4	415	[16]
8	–	0,50	0,95	–	32	12,9	430	[16]
9	0,16	0,40	0,94	–	35	10	300	[17]
10	0,37	0,47	0,65	–	37	12,0	750	[16]
11	2	16	99	–	41	10,2	100	[3]
12	0,16	0,29	0,67	–	52	9,0	121	[16]
13	–	–	0,60	0,99	67	10	29	[16]
14	–	0,23	0,51	–	70	8,9	104	[16]
15	–	–	0,50	0,99	71	10,0	37	[16]

Таблица 2. Результаты обработки данных табл. 1

Table 2. Results of table 1 data processing

Номер образца Number sample	Значение G_k на k -диапазоне d , мкм G_k value on the k -range d , μm			d_{50}^* , мкм d_{50}^* , μm	U_b , м/с U_b , m/s
	$20 < d \leq 32$	$32 < d \leq 71$	$71 < d \leq 125$		
1	4,65	–	–	4,6	2,67
2	0,65	0,35	–	6	2,28
3	1,49	1,48	–	22	1,48
4	4,65	–	–	23	1,46
5	1,76	1,34	–	23	1,28
6	–	0,786	–	13	2,07
7	3,39	1,41	–	28	1,55
8	–	1,84	–	27	1,5
9	4,60	4,11	–	28	1,6
10	0,68	0,63	–	13	2,96
11	4,59	4,11	–	41	0,52
12	1,44	1,47	–	28	0,77
13	–	–	2,85	37	0,16
14	–	1,26	–	27	0,67
15	–	–	3,35	40	0,2

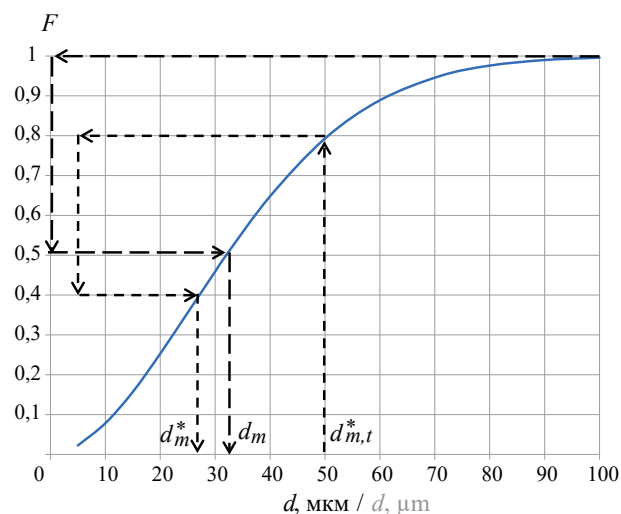


Рис. 1. Схемы оценки (пунктирные ломанные с длинным и коротким штрихом) медианного размера всех частиц ($d_{50} = 32$ мкм) и медианного размера частиц взрывоопасной фракции ($d_{50}^* = 27$ мкм) соответственно для образца алюминия № 8. Гладкая кривая — функция распределения частиц образца № 8 по размерам $F(d)$

Fig. 1. Estimation schemes (dashed broken lines with long and short dashes) of the median size of all particles ($d_{50} = 32$ μm) and the median size of explosive fraction particles ($d_{50}^* = 27$ μm), respectively, for aluminum sample No. 8. The smooth curve is the particle distribution function $F(d)$ for sample No. 8

кое построение параметра d_{50} , который, очевидно, должен превышать d_{50}^* .

Динамика горения пыли в 1-м³ камере

Методика проведения опыта с конкретным образцом пыли в сферической 1-м³ камере предусматривает следующие основные процедуры: создание турбулентной аэрозвеси при распылении навески исследуемой пыли в объеме камеры; воспламенение аэрозвеси в геометрическом центре камеры пиротехническим зарядом с энергией 10 кДж и регистрация изменения давления продуктов горения аэрозвеси P со временем t . Первичная информация о горении исследованного образца пыли складывается из набора осциллограмм $P(t)$, полученных для различных концентраций пыли (отношений массы навески пыли к объему камеры).

Динамику турбулентного горения исследованного образца пыли, по нашему мнению, разумно оценивать максимальным значением скорости выгорания, которую обозначим символами U_b . Физически U_b представляет скорость расширения радиуса сферы с объемом, равным текущему объему продуктов горения аэрозвеси, относи-

тельно свежей смеси. По аналогии с методами анализа горения газозвудушных смесей в сферических камерах U_b определяется выражением (см., например, [19]):

$$U_b = \frac{K_{st}}{\left\{ 4,84 P_{\max} (1 + P/P_0)^{1/\gamma} \left[1 - \frac{(1 - P/P_{\max})}{(1 + P/P_0)^{1/\gamma}} \right]^{2/3} \right\}}. \quad (1)$$

Здесь используется осциллограмма $P(t)$, отвечающая максимальному значению производной $(dP/dt)_{\max}$; P — значение избыточного давления продуктов горения (кПа) к моменту достижения производной dP/dt значения $(dP/dt)_{\max}$; $P_0 = 100$ кПа — начальное абсолютное давление воздуха во взрывной камере; γ — постоянная адиабаты для воздуха, $\gamma = 1,4$.

Согласно имеющимся немногочисленным сведениям об исследовании аэровзвесей в 1-м³ камере отношение P/P_{\max} принадлежит интервалу значений $0,6 \pm 0,1$. В дальнейшем для АВА будем полагать $P/P_{\max} = 0,6$. Отклонение P/P_{\max} от среднего значения в упомянутом интервале меняет оценку U_b не более чем на 10 %.

Отметим, что U_b характеризует динамику горения АВА к моменту времени, отвечающему повышенным параметрам состояния свежей аэровзвеси, подвергнутой сжатию продуктами горения (избыточному давлению ≈ 600 кПа и температуре ≈ 200 °С).

Представленные в табл. 1 результаты позволяют в соответствии с (1) получить значения U_b , которые приводятся в табл. 2.

Результат работы и его обсуждение

Для последующего изложения результата работы важно отметить, что $d_{m,t}^*$ близок к максимальному размеру частиц АВА, способных распространять ламинарное пламя. Действительно, нормальная скорость горения алюминия U_n , измеренная в маломасштабных опытах с узкими фракциями порошка, при размере частиц d порядка и более 10 мкм обратно пропорциональна d [9]:

$$d \cdot U_n(d) \approx 2,5 \text{ мкм} \cdot \text{м/с}. \quad (2)$$

По аналогии с горючими газозвудушными смесями разумно полагать, что U_n не опускается ниже 0,05 м/с [20]. Отсюда следует, что максимальный размер частиц АВА, способных распространять ламинарное пламя, равен $d_{m,t}^* \approx 50$ мкм.

Близость параметров $d_{m,t}^* \approx d_{m,l}^*$ порождает предположение о возможном сходстве других закономерностей турбулентного и ламинарного горения АВА, в частности о сходстве динамических характеристик

горения. Последнее означает возможность существования аналога соотношения (2) для зависимости динамики турбулентного горения АВА в 1-м³ камере от d_{50}^* .

В подтверждение реального существования такого аналога на рис. 2 приводится дискретный график зависимости комплекса $d_{50}^* U_b(d_{50}^*)$ от d_{50}^* . Несмотря на малочисленность и заметный разброс экспериментальных данных разумно предположить справедливость соотношения

$$d_{50}^* \cdot U_b(d_{50}^*) \approx 33 \text{ мкм} \cdot \text{м/с} \quad (3)$$

для диапазона размеров частиц от 10 до 30...35 мкм.

Подобие соотношений (2) и (3) может свидетельствовать об общности механизма распространения ламинарного и турбулентного пламени по аэровзвеси алюминия в отмеченном диапазоне размеров частиц.

Из-за малочисленности экспериментальных данных для $d < 10$ мкм не представляется возможным распространить упомянутое подобие на этот диапазон размеров частиц, для которого предложенная на рис. 2 линейная аппроксимация предполагает постоянство скорости U_c . Косвенным подтверждением разумности такой аппроксимации является слабая зависимость времени горения частиц алюминия от их размера в диапазоне $d < 10$ мкм [9], которая с необходимостью должна приводить к слабой зависимости скорости горения АВА от размера частиц.

Повышенный фактор турбулизации аэровзвеси алюминия в 1-м³ камере ($U_b/U_n \approx 13$), который

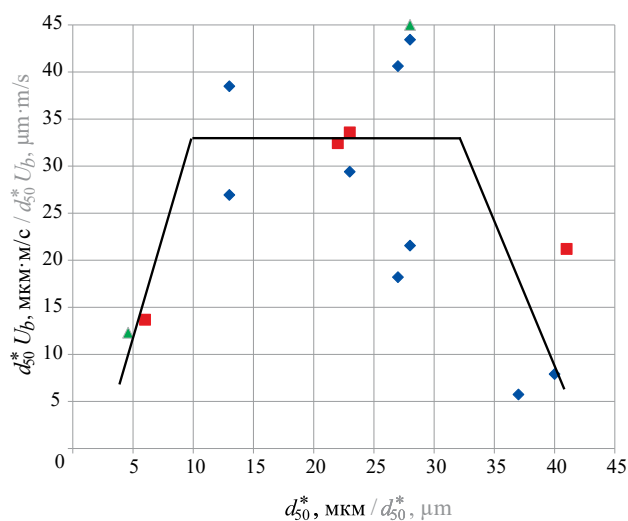


Рис. 2. Зависимость комплекса $d_{50}^* U_b$ от среднего размера взрывоопасных частиц d_{50}^* аэровзвеси алюминия. Ломаная линия — аппроксимация результата обработки дискретных экспериментальных данных: ■ — [3]; ◆ — [16]; ▲ — [17]

Fig. 2. Dependence of the complex $d_{50}^* U_b$ on the average size of aluminum air suspension explosive particles d_{50}^* . Broken line — approximation of the result of processing discrete experimental data: ■ — [3]; ◆ — [16]; ▲ — [17]

следует из указанных соотношений, объясняется, по-видимому, существенным увеличением U_b с ростом давления и температуры аэровзвеси.

Выводы

Исследовано влияние дисперсности частиц на динамику турбулентного горения алюминия в 1-м³ камере. Показано, что максимальная скорость

турбулентного выгорания аэровзвеси алюминия U_b в 1-м³ камере обратно пропорциональна среднему размеру d_{50}^* той фракции материала, которая содержит взрывоопасные частицы: $d_{50}^* U_b \approx 33$ мкм·м/с для значений d_{50}^* от 10...15 до 30...35 мкм.

Отмечено подобие этого влияния и зависимости скорости ламинарного горения аэровзвеси алюминия от размера частиц.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yuan Z., Khakzad N., Khan F., Amyotte P. Dust explosions: A threat to the process industries // Process Safety and Environmental Protection. 2015. Vol. 98. Pp. 57–71. DOI: 10.1016/j.psep.2015.06.008
2. Marmo L., Riccio D., Danzi E. Explosibility of metallic waste dusts // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 107. Pp. 69–80. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.011
3. Eckhoff R.K. Dust explosions in process the industries. 3rd ed. Gulf Professional Publishing/Elsevier, Boston, 2003. 720 p.
4. Julien P., Vickery J., Whiteley S., Wright A., Goroshin S., Berghorson J.M., Frost D.L. Effect of scale on freely propagating flames in aluminum dust clouds // Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015. Vol. 36. Pp. 230–236. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.12.022
5. Krietsch A., Reyes R.M., Kristen A., Kadoke D., Abbas Z., Krause U. Ignition temperatures and flame velocities of metallic nanomaterials // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. P. 104482. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104482
6. Zhang S., Bi M., Jiang H., Gao W. Synergistic inhibition of aluminum dust explosion by gas–solid inhibitors // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. P. 104511. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104511
7. Li G., Yang H.-X., Yuan C.-M., Eckhoff R.K. A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 39. Pp. 121–130. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.11.013
8. Taveau J., Hochgreb S., Lemkowitz S., Roekaerts D. Explosion hazards of aluminum finishing operations // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 51. Pp. 84–93. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.11.011
9. Ben Moussa R., Proust C., Guessasma M., Saleh K., Fortin J. Physical mechanisms involved into the flame propagation process through aluminum dust-air clouds: A review // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. Vol. 45. Pp. 9–28. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.010
10. Полетаев Н.Л. Расчетно-экспериментальная оценка максимального размера частиц взрывоопасной монодисперсной аэровзвеси // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 9. С. 15–26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22678225>
11. Santandrea A., Pacault S., Perrin L., Vignes A., Dufaud O. Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103942. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103942
12. Wang Q., Fang X., Shu C.-M., Wang Q., Sheng Y., Jiang J., Sheng Z. Minimum ignition temperatures and explosion characteristics of micron-sized aluminium powder // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 64. P. 104076. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104076
13. Zhang J., Sun L., Sun T., Zhou H. Study on explosion risk of aluminum powder under different dispersions // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 64. P. 104042. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.104042
14. Castellanos D., Carreto-Vazquez V.H., Mashuga C.V., Trottier R., Mejia A.F., Mannan M.S. The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminium dust // Powder Technology. 2014. Vol. 254. Pp. 331–337. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.11.028
15. Tascon A. Influence of particle size distribution skewness on dust explosibility // Powder Technology. 2018. Vol. 338. Pp. 438–445. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.044
16. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Stauben // SFT-Report. No. 2. Pp. 2–79. 100 S.
17. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C. et al. Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1-m³ chambers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
18. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд. Л. : Химия, 1987. 264 с.
19. Kumar R.K., Bowles E.M., Mintz K.J. Large-scale dust explosions experiments to determine the effects of scaling on explosion parameters // Combustion and Flame. 1992. Vol. 89. Pp. 320–332. DOI: 10.1016/0010-2180(92)90018-K
20. Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. The mathematical theory of combustion and explosions // Consultants Bureau. New York, 1985. 600 p. DOI: 10.1007/978-1-4613-2349-5

REFERENCES

1. Yuan Z., Khakzad N., Khan F., Amyotte P. Dust explosions: A threat to the process industries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2015; 98:57-71. DOI: 10.1016/j.psep.2015.06.008
2. Marmo L., Riccio D., Danzi E. Explosibility of metallic waste dusts. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 107:69-80. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.011
3. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd ed. Gulf Professional Publishing/Elsevier, Boston, 2003; 720.
4. Julien P., Vickery J., Whiteley S., Wright A., Goroshin S., Berghthorson J.M., Frost D.L. Effect of scale on freely propagating flames in aluminum dust clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 36:230-236. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.12.022
5. Krietsch A., Reyes R.M., Kristen A., Kadoke D., Abbas Z., Krause U. Ignition temperatures and flame velocities of metallic nanomaterials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104482. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104482
6. Zhang S., Bi M., Jiang H., Gao W. Synergistic inhibition of aluminum dust explosion by gas–solid inhibitors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104511. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104511
7. Li G., Yang H.-X., Yuan C.-M., Eckhoff R.K. A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 39:121-130. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.11.013
8. Taveau J., Hochgreb S., Lemkowitz S., Roekaerts D. Explosion hazards of aluminum finishing operations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 51:84-93. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.11.011
9. Ben Moussa R., Proust C., Guessasma M., Saleh K., Fortin J. Physical mechanisms involved into the flame propagation process through aluminum dust-air clouds: A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; 45:9-28. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.010
10. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22678225> (rus).
11. Santandrea A., Pacault S., Perrin L., Vignes A., Dufaud O. Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103942. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103942
12. Wang Q., Fang X., Shu C.-M., Wang Q., Sheng Y., Jiang J., Sheng Z. Minimum ignition temperatures and explosion characteristics of micron-sized aluminium powder. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 64:104076. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104076
13. Zhang J., Sun L., Sun T., Zhou H. Study on explosion risk of aluminum powder under different dispersions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 64:104042. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.104042
14. Castellanos D., Carreto-Vazquez V.H., Mashuga C.V., Trottier R., Mejia A.F., Mannan M.S. The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminium dust. *Powder Technol.* 2014; 254:331-337. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.11.028
15. Tascon A. Influence of particle size distribution skewness on dust explosibility. *Powder Technol.* 2018; 338:438-445. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.044
16. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Stauben. *SFT-Report*. 2. 2-79:100. (ger).
17. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C. et al. Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1-m³ chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
18. Kouzov P.A. *Fundamentals of the analysis of the disperse composition of industrial dusts and crushed materials*. 3th ed. Leningrad, Himiya Publ, 1987; 264.
19. Kumar R.K., Bowles E.M., Mintz K.J. Large-scale dust explosions experiments to determine the effects of scaling on explosion parameters. *Combustion and Flame*. 1992; 89:320-332. DOI: 10.1016/0010-2180(92)90018-K
20. Zeldovich Ia.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *The mathematical theory of combustion and explosions*. Consultants Bureau. New York, 1985:600. DOI: 10.1007/978-1-4613-2349-5

Поступила 31.08.2022, после доработки 20.09.2022;

принята к публикации 29.09.2022

Received August 31, 2022; Received in revised form September 20, 2022;

Accepted September 29, 2022

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, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC:1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru