

Зависимость динамики горения полиэтилена в 1-м³ камере от дисперсности частиц

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 полиэтилена (АВП) показывают, как взвеси могут способствовать развитию теории турбулентного горения АВП. Например, анализ сведений о полидисперсности и значениях бедного предела горения АВП в кубометровой камере позволил определить для полиэтилена максимальный размер взрывоопасных частиц $d_{m,t}^* \approx 100$ мкм (Полетаев, 2014). В настоящей работе получена связь между динамикой горения АВП в 1-м³ камере и средним размером частиц взвеси, под которым понимается средний размер частиц ее взрывоопасной фракции d_{50}^* .

Исходные данные. Использовались известные результаты исследования взрыва 28 образцов полиэтилена в 1-м³ камере. Непрерывные функции распределения частиц образцов по размерам, необходимые для расчета d_{50}^* , представлялись распределениями Розина – Раммлера.

Динамика горения. Динамика турбулентного горения АВП в 1-м³ камере описывается 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 АВП.

Результат работы и его обсуждение. Приведен график зависимости комплекса $d_{50}^* U_b$ от d_{50}^* . Усредненное значение комплекса (≈ 45 мкм · (м/с)) постоянно в диапазоне 40 мкм $< d_{50}^* < 90$ мкм. Последнее свойственно для произведения размера частиц на нормальную скорость ламинарного пламени в жидких аэрозолях (Myers, 1986), что говорит о подобии влияния дисперсности частиц на динамику турбулентного и ламинарного горения упомянутых гетерогенных смесей.

Выводы. Дисперсность взрывоопасного полидисперсного образца полиэтилена определяется средним размером частиц взрывоопасной фракции образца d_{50}^* .

Подобие закономерностей горения указывает на близость механизмов распространения турбулентного пламени в АВП и ламинарного пламени в жидких аэрозолях.

Ключевые слова: пыль полиэтилена; взрывоопасная фракция; полидисперсность; турбулентность; механизм горения

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Зависимость динамики горения полиэтилена в 1-м³ камере от дисперсности частиц // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 6–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.6-12

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

Dependence of polyethylene combustion dynamics in a 1 m³ chamber on particle size

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 on the explosion hazard of polyethylene air suspensions (PES) can contribute to the theory of turbulent combustion. For example, analysis of polydispersity data and values of the PES lean combustion limit in a 1 m³ chamber helped to identify the maximum size of explosive particles $d_{m,t}^* \approx 100$ μm (Poletaev, 2014). In this work, a relationship was obtained between the dynamics of PES combustion in a 1 m³ chamber and the average particle size of the suspension, which is understood as the average particle size of its explosive fraction d_{50}^* .

Initial data. Well-known findings of a study on the explosion of 28 polyethylene specimens in a 1 m³ chamber were used. Continuous functions of specimen particles distribution by size, necessary for calculating d_{50}^* , were represented using the Rosin-Rammler distribution.

Combustion dynamics. The dynamics of PES turbulent combustion in a 1 m³ chamber is described by the maximum rate of air suspension burnout U_b . U_b was calculated according to the formula (Kumar, 1992) intended for gas-air mixtures by substituting PES explosion parameters into this formula.

Results and its discussion. The graph, describing the dependence of the complex $d_{50}^* U_b$ on d_{50}^* , is provided. The averaged value of the complex ($\approx 45 \mu\text{m} \cdot (\text{m/s})$) is constant in the range $40 \mu\text{m} < d_{50}^* < 90 \mu\text{m}$. The latter is typical for the product of the particle size and the normal velocity of laminar flame in liquid aerosols (Myers, 1986), which indicates similarity between the effect of particle dispersion and dynamics of turbulent and laminar combustion of the aforementioned heterogeneous mixtures.

Conclusions. The dispersive capacity of an explosive polydisperse polyethylene specimen is determined by the average particle size of the explosive fraction of the specimen d_{50}^* . The similarity of combustion patterns indicates the proximity of propagation mechanisms typical for turbulent flame, typical for PES, and laminar flame, typical for liquid aerosols.

Keywords: polyethylene dust; explosive fraction; polydispersity; turbulence; combustion mechanism

For citation: Poletaev N.L. Dependence of polyethylene combustion dynamics in a 1 m³ chamber on particle size. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):6-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.6-12 (rus).

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

Введение

Несмотря на то, что исследования горючести и взрывоопасности аэрозвеси полиэтилена (АВП) проводятся на протяжении более чем 50 лет [1, 2], взрывы АВП до сих пор представляют серьезную проблему для ряда отраслей промышленности. В частности, на заводах по производству полиолефинов в Китае каждые два года, начиная с 1986-го, происходило до 5 взрывов, которые приводили к серьезным жертвам и экономическим потерям [3]. Поскольку полиэтилен является важной разновидностью полиолефинов и его мировое производство занимает первое место среди пяти основных синтетических смол [4], совершенствование оценки взрывоопасности АВП и развитие представлений об особенностях взрыва АВП не теряют своей актуальности [5]. К одному из направлений этой работы относится анализ опубликованных результатов стандартного исследования взрывоопасности АВП в камере объемом $V \approx 1 \text{ м}^3$.

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

Пример анализа сведений о дисперсном составе и значениях НКПР в 1-м³ камере для нескольких полидисперсных образцов полиэтилена демонстри-

руется в работе [6]. В этой работе получена оценка максимального размера частиц (форму которых возможно аппроксимировать сферой), существенно влияющих на распространение турбулентного пламени по АВП. Данный размер частиц, обозначаемый в дальнейшем символами $d_{m,t}^*$, составил величину 100 мкм. Этот размер отделяет взрывоопасную фракцию образца пыли «частицы с размером не более $d_{m,t}^*$ » от частиц с размером более $d_{m,t}^*$, неспособных к распространению пламени по АВП. Оценка [6] уточняет результаты работы [7], в которой предлагалось характеризовать частицы аэрозвеси полиэтилена двумя критическими размерами: с превышением размера 100 мкм происходит резкое снижение взрывоопасности аэрозвеси; с превышением размера 200 мкм аэрозвесь становится негорючей.

Разумно предположить, что анализ сведений о дисперсном составе образцов полиэтилена и показателей $P_{\max}$ и K_{st} для этих образцов может привести к установлению количественной связи между размером частиц и динамикой турбулентного горения полиэтилена. Следуя методике [8], в данной работе для характеристики дисперсности образца полиэтилена будет использован среднемассовый размер частиц только его взрывоопасной фракции d_{50} в отличие от работ других исследователей (см., например, [9–12]), где используют среднемассовый размер всех частиц d_{50} .

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

Исходные данные

Для решения поставленной задачи в настоящей работе использовали известные результаты (табл. 1) стандартного исследования взрывоопасности турбу-

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.

лентной АВП различного дисперсного состава в камере объемом 1 м³ [13]. 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 – Раммлера [14]:

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

где $B = (d/d_1)^{G_k}$;

G_k — крутизна функции распределения;

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

индекс k принимает значение от 1 до 4, 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, от 125 до 500 мкм;

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

На каждый из двух оставшихся участков оси d (область больших и область малых размеров частиц)

Таблица 1. Исходные сведения о взрывоопасности АВП в 1-м³ камере [13]

Table 1. Input data on PAS explosive hazard in a 1 m³ chamber [13]

Номер образца Specimen number	Значение F (% масс.) по данным ситового анализа F value (% mass) according to sieve analysis					d_{50} , мкм d_{50} , μm	$P_{\max}$, бар $P_{\max}$, bar	$(dP/dt)_{\max}$, бар/с $(dP/dt)_{\max}$, bar/s
	20 мкм 20 μm	32 мкм 32 μm	71 мкм 71 μm	125 мкм 125 μm	500 мкм 500 μm			
1	86	95	—	—	—	6,5	8	156
2	0,8	0,94	—	—	—	10	7,6	82
3	0,37	0,7	—	—	—	24	7,6	74
4	21	94	—	—	—	24	7,6	54
5	0,39	0,65	—	—	—	25	7,4	62
6	—	—	73	97	—	52	8,8	122
7	—	0,06	0,7	—	—	61	8,5	131
8	—	0,16	0,56	—	—	65	7,4	62
9	14	22	47	79	—	76	8,2	110
10	14	21	42	62	—	90	8,4	157
11	—	—	0,28	0,7	—	98	8,7	109
12	—	—	30,7	56	—	111	8,5	80
13	—	—	0,21	0,5	—	125	7,8	65
14	—	—	21	44	—	135	7,8	58
15	—	—	0,1	0,36	—	149	7,4	54
16	—	—	7	28	—	160	6,8	36
17	—	—	6	27	—	162	7,4	58
18	—	—	7	24	—	163	5,5	13
19	—	—	0,06	0,25	—	173	7,3	49
20	—	—	0,02	0,18	—	173	7,1	38
21	—	—	0,09	0,25	—	195	6,9	48
22	—	—	0,09	0,2	0,9	245	7,5	46
23	—	—	0,11	0,19	0,9	249	7,4	56
24	—	—	0,04	0,13	0,91	270	6,9	39
25	—	—	—	0,14	0,90	295	5,9	18
26	—	—	0,01	0,04	0,96	300	7,2	76

распространяется функция распределения, построенная на смежном с ним отрезке. Расчетные значения параметра G_k приводятся в табл. 2.

Значения d_{50}^* удовлетворяют соотношению

$$F(d_{50}^*) = 0,5 F(d_{m,t}^*),$$

где F — функция распределения размеров частиц рассматриваемого образца;

$d_{m,t}^* = 100$ мкм. С примером геометрического построения оценки d_{50}^* можно ознакомиться в [8].

Таблица 2. Результаты обработки данных табл. 1

Table 2. Table 1 data processing results

Номер образца Specimen number	Значение G_k на k -диапазоне d , мкм G_k value in the k -range d , μm				d_{50}^* , мкм d_{50}^* , μm	U_b , м/с U_b , m/s
	$20 < d \leq 32$	$32 < d \leq 71$	$71 < d \leq 125$	$125 < d \leq 500$		
1	0,9	—	—	—	6,5	1,6
2	1,19	—	—	—	10	0,93
3	2,04	—	—	—	24	0,84
4	5,28	—	—	—	23,5	0,61
5	1,52	—	—	—	25	0,74
6	—	—	1,74	—	45	1,04
7	—	3,75	—	—	61	1,19
8	—	1,95	—	—	54	0,74
9	1,06	1,18	1,59	—	47	1,07
10	0,95	1,05	1,02	—	43	1,46
11	—	—	2,32	—	67	0,95
12	—	—	1,42	—	56	0,73
13	—	—	1,91	—	66	0,7
14	—	—	1,59	—	63	0,62
15	—	—	2,55	—	73	0,64
16	—	—	2,67	—	76	0,51
17	—	—	2,91	—	76	0,69
18	—	—	2,35	—	71	0,28
19	—	—	2,72	—	78	0,6
20	—	—	3,84	—	87	0,49
21	—	—	1,97	—	71	0,65
22	—	—	1,52	1,68	62	0,53
23	—	—	1,05	1,73	50	0,67
24	—	—	2,17	2,06	71	0,53
25	—	—	—	1,97	73	0,34
26	—	—	2,48	3,15	71	0,95

Динамика горения пыли в 1-м³ камере

Следуя методике, изложенной в [8], динамику турбулентного горения исследованного образца пыли в 1-м³ камере будем отождествлять с максимальным значением скорости выгорания, которую обозначим символами U_b . Физически U_b представляет скорость расширения радиуса сферы с объемом, равным текущему объему продуктов горения взрывов, относительно свежей смеси и определяется выражением [15].

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

Здесь используется осциллограмма зависимости давления продуктов горения от времени $P(t)$, 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, $\gamma = 1,4$; $P/P_{\max}$ принадлежит интервалу значений $0,6 \pm 0,1$.

Отметим, что U_b характеризует динамику горения АВП к моменту времени, отвечающему повышенным параметрам состояния свежей взрывов, подвергнутой сжатию продуктами горения (избыточному давлению $\approx (500 \pm 100)$ кПа и температуре ≈ 180 °C).

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

Результат работы и его обсуждение

Для последующего изложения результата работы целесообразно учесть сходство горения пылей и топливных туманов, отмеченное в [16]. В дополнение к этому важно отметить, что полиэтилен имеет низкую температуру плавления (≈ 120 °C) и частицы его горячей взрывов уже на стадии предпламенного прогрева представляют жидкий аэрозоль, горение отдельных капель которого подчиняется классическому закону d -квадрата с постоянной $1,3 \pm 0,1$ мм²/с [17]. В то же время известно, что скорость ламинарного пламени в жидких аэрозолях обратно пропорциональна диаметру капель, начиная с их некоторого размера [18, 19]. В связи с этим разумно предположить, что зависимость динамики турбулентного горения от дисперсности полиэтилена может оказаться схожей с описанной выше для случая ламинарного горения жидких аэрозолей. То есть целесообразно проверить существование диапазона размеров частиц, для которого произведение $d_{50}^* U_b(d_{50}^*)$ имеет постоянное значение.

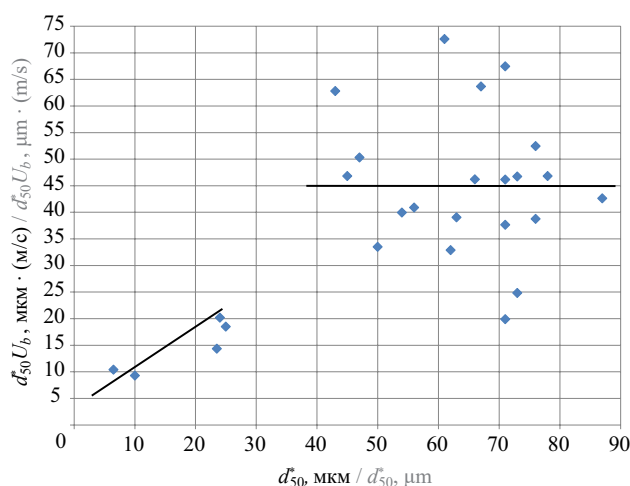
На рисунке приводится график зависимости комплекса $d_{50}^* U_b(d_{50}^*)$ от d_{50}^* и его аппроксимация отрезками прямой. Несмотря на заметный разброс экспериментальных данных разумно предположить справедливость соотношения

$$d_{50}^* U_b(d_{50}^*) \approx 45 \text{ мкм} \cdot (\text{м/с}) \quad (3)$$

для диапазона размеров частиц от 40 до 90 мкм.

Для диапазона размеров частиц от 10 до 25 мкм аппроксимация предполагает пропорциональность $d_{50}^* U_b(d_{50}^*) \propto d_{50}^*$, из которой следует независимость скорости турбулентного выгорания АВП от среднего размера частиц: $U_b \approx 0,8 \text{ м/с}$. Из-за малочисленности экспериментальных данных не представляется возможным упомянутую независимость считать надежно установленной. В то же время предположение о существенном различии механизмов турбулентного горения АВП для рассмотренных двух диапазонов размеров частиц является вполне правомерным. В частности, разумно предполагать слабую зависимость U_b от d_{50}^* в диапазоне $10 \text{ мкм} < d_{50}^* < 25 \text{ мкм}$.

Для диапазона размеров частиц менее 10 мкм, представленного единственным экспериментом, разумно ожидать резкого увеличения скорости пламени, отвечающего турбулентному горению однородной смеси продуктов газификации полиэтилена с воздухом. В реальности, однако, этому может препятствовать склонность частиц полиэтилена к агломерации [9] или неоднородность газовой смеси, по аналогии с той, которая наблюдается в жидких аэрозолях с размером капель от 1 до 4 мкм [20].



Зависимость комплекса $d_{50}^* U_b$ от среднего размера взрывоопасных частиц d_{50}^* аэрозвеси полиэтилена. Отрезки прямых — аппроксимация результата обработки дискретных экспериментальных данных [13]

Dependence of the complex $d_{50}^* U_b$ on the average size of explosive particles d_{50}^* of the polyethylene air suspension. Line segments represent the approximation of the processed result of discrete experimental data [13]

Выводы

Исследовано влияние дисперсности частиц на динамику турбулентного горения полиэтилена в 1-м³ камере. Показано, что максимальная скорость турбулентного выгорания аэрозвеси полиэтилена U_b в 1-м³ камере обратно пропорциональна среднему размеру d_{50}^* той фракции материала, которая содержит взрывоопасные частицы: $d_{50}^* U_b \approx 45 \text{ мкм} \cdot (\text{м/с})$ для значений d_{50}^* от 40 до 90 мкм.

В диапазоне значений d_{50}^* от 10 мкм до 25 мкм отмечена слабая зависимость U_b от d_{50}^* .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Eckhoff R.K.* Dust explosions in the process industries 3rd ed. Boston : Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003. 720 p.
2. *Butlin R.N.* Polyethylene dust-air flames // *Combustion and Flame*. 1971. Vol. 17. Issue 3. Pp. 446–448. DOI: 10.1016/s0010-2180(71)80071-8
3. *Pang L., Cao J., Ma R., Zhao Y., Yang K.* Risk assessment method of polyethylene dust explosion based on explosion parameters // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. Vol. 69. P. 104397. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104397
4. *Wang Y., Lin C., Qi Y., Pei B., Wang L., Ji W.* Suppression of polyethylene dust explosion by sodium bicarbonate // *Powder Technology*. 2020. Vol. 367. Pp. 206–212. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.03.049
5. *Kazmi M.Z.* Experimental study of polyethylene and sulfur dust explosion characteristics // Submitted to the Office of Graduate and Professional Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. 2018. 153 p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/187126901.pdf>
6. *Полетаев Н.Л.* Расчетно-экспериментальная оценка максимального размера частиц взрывоопасной монодисперсной аэрозвеси // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. Т. 23. № 9. С. 15–26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15-26
7. *Hertzberg M., Cashdollar K.L., Ng D.L., Conti R.S.* Domains of flammability and thermal ignitability for pulverized coals and other dusts: Particle size dependences and microscopic residue analyses // *Symposium (International) on Combustion*. 1982. Vol. 19. Issue 1. Pp. 1169–1180. DOI: 10.1016/s0082-0784(82)80293-2
8. *Полетаев Н.Л.* Влияние дисперсности частиц на динамику горения алюминия в 1-м³ камере // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. Т. 31. № 5. С. 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.5-12
9. *Gan B., Gao W., Jiang H., Li Y., Zhang Q., Bi M.* Flame propagation behaviors and temperature characteristics

- in polyethylene dust explosions // *Powder Technology*. 2018. Vol. 328. Pp. 345–357. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.061
10. Pang L., Zhao Y., Yang K., Zhai H., Lv P., Sun S. Law of variation for low density polyethylene dust explosion with different inert gases // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 58. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.01.009
 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. 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
 13. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Staube // SFTReport. No. 2. Pp. 2–79. 100 S.
 14. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд. Л. : Химия, 1987. 264 с.
 15. 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
 16. Ballal D.R. Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity // *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1983. Vol. 385. Issue 1788. Pp. 21–51. DOI: 10.1098/rspa.1983.0003
 17. Sun P., Wu C., Zhu F., Wang S., Huang X. Microgravity combustion of polyethylene droplet in drop tower // *Combustion and Flame*. 2020. Vol. 222. Pp. 18–26. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.08.032
 18. Myers G.D., Lefebvre A.H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel drops and air // *Combustion and Flame*. 1986. Vol. 66. Issue 2. Pp. 193–210. DOI: 10.1016/0010-2180(86)90091-x
 19. Ballal D.R., Lefebvre A.H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel droplets, fuel vapor and air // *Symposium (International) on Combustion*. 1981. Vol. 18. Issue 1. Pp. 321–328. DOI: 10.1016/S0082-0784(81)80037-9
 20. Fan L., Tian B., Chong C.T., Jaafar M.N.M., Tanno K., McGrath D. et al. The effect of fine droplets on laminar propagation speed of a strained acetone-methane flame: experiment and simulations // *Combustion and Flame*. 2021. Vol. 229. P. 111377. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.02.023

REFERENCES

1. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd ed. Boston, Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003; 720.
2. Butlin R.N. Polyethylene dust-air flames. *Combustion and Flame*. 1971; 17(3):446–448. DOI: 10.1016/s0010-2180(71)80071-8
3. Pang L., Cao J., Ma R., Zhao Y., Yang K. Risk assessment method of polyethylene dust explosion based on explosion parameters. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 69:104397. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104397
4. Wang Y., Lin C., Qi Y., Pei B., Wang L., Ji W. Suppression of polyethylene dust explosion by sodium bicarbonate. *Powder Technology*. 2020; 367:206–212. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.03.049
5. Kazmi M.Z. Experimental study of polyethylene and sulfur dust explosion characteristics. *Submitted to the Office of Graduate and Professional Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science*. 2018; 153. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/187126901.pdf>
6. Poletaev N.L. Experiment-calculated estimating of the maximum particle size of explosive mono-disperse dust-air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(9):15–26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15–26 (rus).
7. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Ng D.L., Conti R.S. Domains of flammability and thermal ignitability for pulverized coals and other dusts: Particle size dependences and microscopic residue analyses. *Symposium (International) on Combustion*. 1982; 19(1):1169–1180. DOI: 10.1016/s0082-0784(82)80293-2
8. Poletaev N.L. Particle size influence on the aluminum combustion dynamics in 1-m³ chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(5): 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.5–12 (rus).
9. Gan B., Gao W., Jiang H., Li Y., Zhang Q., Bi M. Flame propagation behaviors and temperature characteristics in polyethylene dust explosions. *Powder Technology*. 2018; 328:345–357. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.061
10. Pang L., Zhao Y., Yang K., Zhai H., Lv P., Sun S. Law of variation for low density polyethylene dust explosion with different inert gases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 58:42–50. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.01.009
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. Tascon A. Influence of particle size distribution skewness on dust explosibility. *Powder Technology*. 2018; 338:438–445. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.044

13. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn – und Explosions – Kenngrößen von Stäuben. *SFT-Report*. 2; 279:100. (ger).
14. Kouzov P.A. *Fundamentals of the analysis of the disperse composition of industrial dusts and crushed materials*. 3th ed. Leningrad, Himiya Publ., 1987; 264. (rus).
15. 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
16. Ballal D.R. Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1983; 385(1788):21-51. DOI: 10.1098/rspa.1983.0003
17. Sun P., Wu C., Zhu F., Wang S., Huang X. Micro-gravity combustion of polyethylene droplet in drop tower. *Combustion and Flame*. 2020; 222:18-26. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.08.032
18. Myers G.D., Lefebvre A.H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel drops and air. *Combustion and Flame*. 1986; 66(2):193-210. DOI: 10.1016/0010-2180(86)90091-x
19. Ballal D.R., Lefebvre A.H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel droplets, fuel vapor and air. *Symposium (International) on Combustion*. 1981; 18(1):321-328. DOI: 10.1016/S0082-0784(81)80037-9
20. Fan L., Tian B., Chong C.T., Jaafar M.N.M., Tanno K., McGrath D. et al. The effect of fine droplets on laminar propagation speed of a strained acetone-methane flame: experiment and simulations. *Combustion and Flame*. 2021; 229:111377. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.02.023

Поступила 28.10.2022, после доработки 15.11.2022;
принята к публикации 25.11.2022

Received October 28, 2022; Received in revised form November 15, 2022;
Accepted November 25, 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