

Исследование взрывоопасности аэровзвеси свинца

Николай Львович Полетаев¹✉, Михаил Сергеевич Сазонов², Михаил Юрьевич Коптев²

¹ 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

² Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Кемеровская область — Кузбасс, г. Кемерово, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Пыль свинца в состоянии аэровзвеси имеет температуру самовоспламенения 710 °С и расчетное максимальное избыточное давление взрыва 400 кПа. В то же время аэровзвесь свинцовой пыли не взрывается при тестировании в 20-л камере с источником зажигания, имеющим энергию 2,5 кДж. Данные обстоятельства затрудняют ответ на вопрос о взрывоопасности свинцовой пыли в нормальных условиях обращения. В настоящей работе получены аргументы в пользу взрывобезопасности этой пыли при температуре 25 °С.

Свинцовая пыль и метод ее исследования. Пыль свинцового концентрата ($d_{50} = 8,5$ мкм, $d_{90} = 36,6$ мкм) с содержанием свинца не менее 99 % (масс.) исследована в 20-л взрывной камере Сивека с источником зажигания повышенной энергии (10 кДж).

Результаты. Взрывоопасность свинцовой пыли проявилась в диапазоне концентраций пыли от нижнего предела (500 г/м³) до верхнего предела (1500 г/м³). Во всем указанном диапазоне появление взрыва свинцовой пыли от опыта к опыту носило случайный характер. Максимальное избыточное давление взрыва составило ≈ 150 кПа, индекс взрыва $K_{st} \approx 2$ бар · м/с. В опытах со взрывом пыли восходящая ветвь зависимости давления в камере P от времени t имела две точки перегиба, в первой из которых достигался минимум, а во второй — максимум производной dP/dt .

Обсуждение и выводы. Результаты исследования свинцовой пыли имеют особенности, характерные для дисперсного материала, взрывобезопасного при нормальных условиях обращения: $K_{st} < 45$ бар · м/с (Proust, Accorsi, Dupont, 2007); случайный характер проявления взрывоопасности в широком диапазоне концентраций пыли и двухэтапный характер развития взрыва (Полетаев, Сазонов, Коптев, 2024). Таким образом, вероятнее всего, исследованная пыль свинца взрывобезопасна. Наблюдение случаев ее взрыва обусловлено эффектом «overdrive» — предварительным нагревом аэровзвеси в опытах с использованием энергоемкого источника зажигания.

Ключевые слова: пыль свинца; взрыв; 20-л камера Сивека; признаки перегрева; температура самовоспламенения

Для цитирования: Полетаев Н.Л., Сазонов М.С., Коптев М.Ю. Исследование взрывоопасности аэровзвеси свинца // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.5-12

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

Explosion hazard study of lead dust/air mixture

Nikolay L. Poletaev¹✉, Mikhail S. Sazonov², Mikhail Yu. Koptev²

¹ 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

² Joint-Stock Company “Scientific Center of VOSTNII on Industrial and Environmental Safety in the Mining Industry”, Kemerovo, Kemerovo Region — Kuzbass, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Lead dust/air mixture has an ignition temperature of 710 °C and an estimated maximum explosion pressure of 400 kPa. At the same time, the lead dust/air mixture does not explode in a 20-litre chamber with an ignition source having energy of 2.5 kJ. These circumstances make it difficult to answer the question about the explosiveness of lead dust under normal handling conditions. In this paper, arguments in favour of explosion safety of this dust at a temperature of 25 °C are obtained.

Lead dust and method of its study. Lead concentrate dust ($d_{50} = 8.5$ microns, $d_{90} = 36.6$ microns) with lead content of at least 99 % (wt.) was studied in a 20-liter Sivek explosion chamber with an ignition source of increased energy (10 kJ).

Results. The explosion hazard of lead dust was manifested in the range of dust concentrations from the lower limit (500 g/m^3) to the upper limit ($1,500 \text{ g/m}^3$). In the whole specified range, the occurrence of lead dust explosion from experiment to experiment was random. The maximum explosion pressure was 150 kPa, the explosion index K_{st} was $2 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$. The explosion pressure dependence on time $P(t)$ had two inflection points, in the first of which the minimum dP/dt was reached, and in the second point the maximum dP/dt was reached.

Discussion and conclusions. The results of the study of lead dust have features characteristic of a dispersed material that is explosion-proof under normal handling conditions: $K_{st} < 45 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ (Proust, Accorsi, Dupont, 2007); the random nature of the explosion in a wide range of dust concentrations and the two-stage explosion (Poletaev, Sazonov, Koptev, 2024). Thus, it is most likely that the investigated lead dust is explosion-proof. The cases of its explosion are due to the “overdrive” effect — airborne dust preheating in experiments using an energy-intensive ignition source.

Keywords: lead dust; explosion; 20-L Sivek chamber; overheating marks; ignition temperature

For citation: Poletaev N.L., Sazonov M.S., Koptev M.Yu. Explosion hazard study of lead dust/air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):5-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.5-12 (rus).

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

Введение

Первое исследование взрывоопасности аэровзвеси пыли свинца с размером частиц менее 74 мкм провели специалисты US Bureau of Mines (USBM) [1] на оборудовании, разработанном еще до 1960 г. [2]. В печи Годберта – Гринвальда определили температуру самовоспламенения аэровзвеси $T_{ai} = 710^\circ\text{C}$. Возможность распространения пламени по аэровзвеси при нормальных начальных условиях (температуре $T_0 \approx 25^\circ\text{C}$, давлении $P_0 \approx 100 \text{ кПа}$ и содержании кислорода в воздухе $\approx 21\%$ об.) исследовали в цилиндрической взрывной камере Хартмана объемом 1,23 л. Источником зажигания (ИЗ) в камере являлась высоковольтная искра в электрической цепи, замыкающей обкладки конденсатора с первоначально запасенной энергией около 10 Дж. Опыты в широком диапазоне концентраций свинцовой пыли от 100 до 2000 г/м³ не зафиксировали случаев взрыва: превышение максимального абсолютного давления в камере P_m над атмосферным давлением составило 20 кПа.

Результат определения P_m противоречил расчетной оценке параметра ($\approx 500 \text{ кПа}$), выполненной в предположении о полном выгорании частиц свинцовой пыли [3]. Полагая в качестве причины противоречия неэффективность искрового ИЗ, в начале 1990-х гг. исследование взрывоопасности свинцовой пыли повторили в квазисферической 20-л взрывной камере конструкции USBM [3]. В качестве ИЗ использовали мощный пиротехнический заряд с запасом химической энергии $E_{ig} = 2,5 \text{ кДж}$. Повторные опыты, однако, подтвердили взрывобезопасность свинцовой пыли.

Обстоятельства, подобные описанным выше, характерны для невзрывоопасных пылей горючих материалов [3, 4] и пылей с низким уровнем взрывоопасности [5, 6]. В таких случаях используются, как правило, три варианта решения вопроса о взрывоопасности исследованной пыли в нормальных условиях обращения [7]. В первом варианте рекомендуется называть пыль «взрывобезопасной в условиях проведенных

испытаний» (ASTM standard¹), что, как будет видно из дальнейшего изложения, не является корректным ответом на поставленный вопрос. Во втором более надежном варианте рекомендуется провести дополнительные дорогостоящие эксперименты в камере объемом 1 м³ с мощным ИЗ ($E_{ig} = 10 \text{ кДж}$) [8]. В третьем наиболее надежном, но еще более дорогостоящем варианте, рекомендуются натурные испытания пыли в масштабах, характерных для промышленных условий обращения данной пыли с использованием потенциально возможных ИЗ или их эквивалентной замены [9]. Мотивацией к увеличению масштабов эксперимента является более полный учет влияния излучения пламени на горение аэровзвеси² [10]. При отсутствии финансовых или технических возможностей ограничиваются первым вариантом решения, сочетая его с поиском аргументов в пользу расширения границ применения полученных в 20-л камере результатов. Настоящая работа является примером такого подхода.

Согласно ГОСТ³, для уточнения ответа на вопрос о взрывоопасности свинцовой пыли рекомендуется продолжить исследования пыли в маломасштабной 20-л камере, увеличив E_{ig} до 10 кДж и даже более. Для лучшего понимания рекомендации ГОСТ приводим следующее пояснение.

Срабатывание энергоемкого ИЗ в 20-л камере наряду с увеличением надежности зажигания вызывает подъем начальной температуры аэровзвеси, причем тем больший, чем больше E_{ig} [11–14]. Если невзрывоопасная (здесь и далее — в нормальных условиях) пыль обладает показателем T_{ai} , то зна-

¹ E1226–12A. Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds.

² Taveau J.R., Lemkowitz S.M., Hochgreb S., Roekaerts D. Scaling up metal dusts deflagrations severity // Proceedings of the Twelfth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions. Soesterberg, Netherlands, 2018. URL: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:186f151e-8fd9-4bca-90d0-d597901aa282>

³ ГОСТ 12.1.044–89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

чительное увеличение E_{ig} в 20-л камере приводит к взрыву этой пыли, «подогретой» в процессе тестирования (эффект «overdrive» [4]). Естественно, что такой взрыв имеет особенности (далее — признаки невзрывоопасности пыли), отличающие этот взрыв от взрыва пыли, которая взрывоопасна в нормальных условиях обращения. Описание признаков невзрывоопасности пыли получено из анализа результатов тестирования аэровзвеси заведомо невзрывоопасного антрацита, которая взрывалась в 20-л камере с энергоемким ИЗ [15]. Таким образом, в зависимости от наличия или отсутствия упомянутых признаков у взрыва пыли в 20-л камере, пыль сочтут невзрывоопасной или взрывоопасной соответственно, полагая возможным не проводить для этой пыли крупномасштабных огневых испытаний.

Следуя рекомендациям ГОСТ², в настоящей работе проведено исследование аэровзвеси свинцовой пыли, демонстрирующее ее взрывоопасность при тестировании в 20-л камере с целью обнаружить в результатах данного исследования признаки невзрывоопасности свинцовой пыли в нормальных условиях обращения.

Объект исследования и экспериментальная установка

Пыль свинцового концентрата с содержанием свинца не менее 99 % (масс.) исследована в 20-л взрывной камере Сивека [16]. Распределение частиц образца по размерам определялось с использованием Analysette 22 Microtec plus. Результаты данного исследования приводятся в табл. 1.

Автоматизированная процедура единичного опыта состояла из последовательности следующих основных операций: частичной откачки камеры (до абсолютного давления 40 кПа), распыления импульсом сжатого воздуха навески пыли в объеме камеры с одновременным восстановлением атмосферного давления (около 100 кПа), зажигания образовавшейся аэровзвеси пиротехническим зарядом с запасом химической энергии 10 кДж фирмы Simex [17] и регистрации зависимости развивающегося в камере давления P от времени t . Методика единичного опыта подробно описана в [16]

Таблица 1. Гранулометрический состав частиц свинца
Table 1. Granulometric composition of lead particles

Фракция, мкм Fraction, microns	< 57,5	< 44,1	< 36,6	< 23,3	< 8,5	< 2,7	< 1,2	< 0,7
Содержание, % (масс.) Content, % (by weight)	99	95	90	75	50	25	10	5

и соответствует европейским стандартам^{4,5} определения максимального давления взрыва аэровзвеси P_m и максимальной скорости его нарастания $(dP/dt)_m$.

Экспериментальные результаты

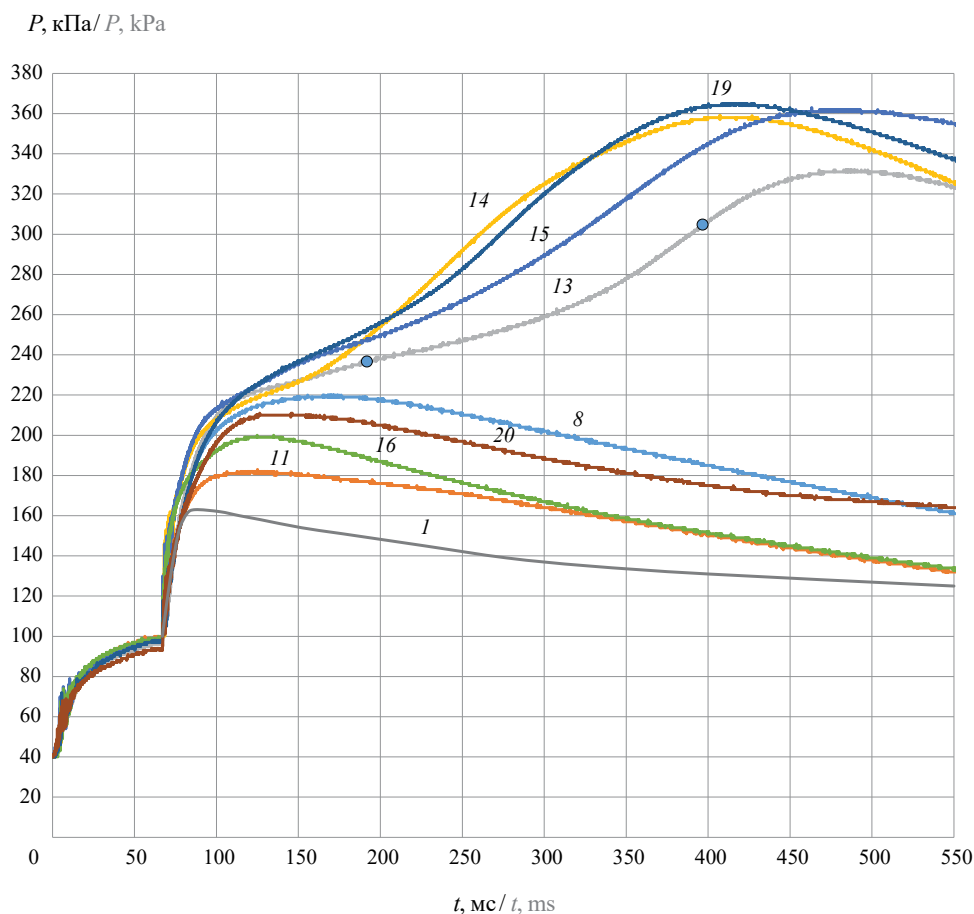
Результаты опытов, проведенных в рамках настоящей работы, представлены в табл. 2. В таблице приняты следующие обозначения: C_s — начальная концентрация пыли свинца в аэровзвеси; P_m — максимальное абсолютное давление, возникающее в камере на протяжении единичного опыта; $K_m = V^{1/3}(dP/dt)_m$ — нормированное значение максимальной скорости изменения давления в камере на протяжении единичного опыта; $V = 0,02 \text{ м}^3$ — объем камеры; φ — частота реализации взрыва аэровзвеси, представляющая отношение

⁴ EN 14034-1:2004+A1. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 1: Determination of the maximum explosion pressure p_{max} of dust clouds, January 2011.

⁵ EN 14034-2:2006+A1. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dp/dt)_{max}$ of dust clouds, January 2011.

Таблица 2. Результаты тестирования пыли свинца
Table 2. Lead dust test results

Номер опыта Experiment Number	C_s , г/м ³ C_s , g/m ³	P_m , кПа P_m , kPa	K_m , бар · м/с K_m , bar · m/s	Взрыв (+) / нет взрыва (-) / Explosion (+) / no explosion (-)	φ
1	0	163	...	...	...
2, 3, 4	250	От 180 до 210 From 180 to 210	...	—	0
5, 6, 7	500		...	—	0
8, 9, 10	750		...	—	0
11	1000	182	...	—	1/3
12	1000	196	...	—	
13	1000	335	1,44	+	
14	1250	360	2,01	+	2/3
15	1250	361	1,95	+	
16	1250	300	...	—	
17	1500	194	...	—	2/3
18	1500	357	1,17	+	
19	1500	365	1,33	+	
20, 21, 22	1750	От 190 до 210 From 190 to 210	...	—	0



Зависимости абсолютного давления P , кПа, в 20-л камере от времени t , с, для некоторых опытов из перечисленных в табл. 2. Номер зависимости совпадает с номером опыта. Жирными точками отмечены минимум и максимум производной dP/dt на графике 13

Dependences of absolute pressure P , kPa, in the 20-liter chamber on time t , s, for some experiments listed in the Table 2. The dependence number coincides with the number of the experiment. Bold dots mark the minimum and maximum of the dP/dt derivative in the graph 13

числа зарегистрированных взрывов к общему числу опытов для данной концентрации пыли; символ «...» означает отсутствие параметра; 1 бар = 100 кПа.

Характерные графики $P(t)$, полученные в опытах с пылью свинца, а также опыт № 1 с выгоранием ИЗ в отсутствие пыли приводятся на рисунке.

Обсуждение результатов

Представленные в табл. 2 результаты позволяют разделить все опыты со свинцовой пылью на две группы по величине P_m . В первую группу входят опыты со 2 по 12, 16, 17, 20, 21 и 22, для которых P_m принадлежит интервалу давлений от 80 до 120 кПа. Во второй группе, куда относятся опыты 13, 14, 15, 18 и 19, P_m принадлежит интервалу давлений от 230 до 265 кПа. Близость значений P_m внутри каждой из групп опытов и существенный разрыв между упомянутыми интервалами давлений демонстрируют качественное отличие процессов горения свинцовой пыли в опытах из разных групп, что отражено в пятой колонке (взрыв/нет взрыва) табл. 2. Опыты первой

группы выявляют локальное горение аэровзвеси вблизи пламени источника зажигания, т.е. отсутствие взрыва. Опыты второй группы выявляют взрыв пыли, охватывающий значительный объем аэровзвеси.

Отличие процессов горения для опытов из разных групп подтверждает различие восходящего участка зависимости $P(t)$. В опытах первой группы для этого участка $P(t)$ характерно монотонное снижение производной dP/dt , аналогичное тому, которое наблюдается в случае срабатывания ИЗ при отсутствии пыли (см. опыт 1). Для опытов второй группы на восходящем участке $P(t)$ присутствуют две точки перегиба (см. пример опыта 13 на рисунке), исключаящие монотонное изменение dP/dt и указывающие на двухэтапный характер горения свинцовой пыли. Нижний перегиб соответствует моменту достижения минимальной скорости изменения давления (dP/dt), что является особенностью проявления эффекта «overdrive» [15, 18]: завершается этап медленного развития горения, на котором происходит прогрев свежей аэровзвеси путем ее турбулентного перемеши-

вания с продуктами горения ИЗ [19]. Верхний перегиб относится к этапу быстрого развития взрыва и отвечает моменту достижения максимальной скорости изменения давления $(dP/dt)_m$, нормированное значение которой K_m весьма мало (не более $2,1 \text{ бар} \cdot \text{м/с}$; приводится в четвертой колонке табл. 2).

Диапазон взрывоопасных концентраций свинцовой пыли в использованных условиях тестирования (20-л камера, $E_{ig} = 10 \text{ кДж}$) составил от 1000 до 1500 г/м^3 (см. колонку 5 (взрыв/нет взрыва) табл. 2). Во всем диапазоне взрывоопасных концентраций имеет место случайный характер проявления взрывоопасности у свинцовой пыли (см. колонку 6 табл. 2), который объясняется, по-видимому, следующими обстоятельствами:

- наличием разброса ($\pm 10 \%$) реальной энергии, выделяющейся при горении ИЗ [18];
- двухэтапным характером взрыва, включающим конкуренцию процессов, один из которых способствует росту горючести свинцовой пыли (прогрев свежей аэровзвеси), а другой снижает зажигательную способность нагретой области среды из-за уменьшения ее максимальной температуры.

Проявление взрывоопасности свинцовой пыли в 20-л камере при увеличении энергии ИЗ с $2,5 \text{ кДж}$ в работе [3] до 10 кДж в настоящей работе вызвано эффектом повышения начальной температуры аэровзвеси из-за притока тепловой энергии от срабатывающего ИЗ. При $T_0 \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$ и $P_0 \approx 100 \text{ кПа}$ аэровзвесь свинцовой пыли не распространяет пламя, на что указывает присутствие в результатах проведенного исследования «подогретой» аэровзвеси следующих трех признаков взрывобезопасности аэровзвеси в нормальных условиях обращения [15]: $K_m < 45 \text{ бар} \cdot \text{м/с}$; неустойчивость возникновения взрыва во всем диапазоне взрывоопасных концентраций пыли; присутствие двух точек перегиба на восходящем участке зависимости $P(t)$.

В завершение раздела отметим, что диапазон взрывоопасных концентраций свинцовой пыли в «подогретой» аэровзвеси (от 1000 до 1500 г/м^3) расположен заметно ниже стехиометрической концентрации свинцовой пыли (3600 г/м^3 [3]). Для объяснения этого результата учтем эмпирическое правило: с увеличением T_0 снижается минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) в аэровзвеси [7]. Из этого правила следует, что у невзрывоопасной в нормальных условиях свинцовой пыли МВСК $> 21 \%$ об. и возникновение взрывоопасности с увеличением T_0 носит поро-

вый характер, а именно, происходит при $T_0 \geq T_{cr}$, где T_{cr} — пороговая температура. Из-за теплоотдачи энергии ИЗ в пыль величина T_0 в «подогретой» аэровзвеси должна уменьшаться с ростом концентрации пыли C_s . Особенно заметным уменьшение T_0 происходит при значениях C_s , сопоставимых с плотностью воздуха ($\approx 1200 \text{ г/м}^3$). Поэтому разумно ожидать, что на верхнем пределе горения «подогретой» аэровзвеси свинца (около 1750 г/м^3) выполняется условие $T_0 = T_{cr}$, которое скорее всего соответствует бедной взвеси, подтверждая правомерность рассмотренного результата.

Оценка T_{cr} для аэровзвеси свинцовой пыли выходит за рамки настоящей работы. Для такой оценки целесообразна постановка специального эксперимента с прибором, подобным печи Годберга – Гринвальда [2], в объем реакционного сосуда которого встроен малокалорийный ИЗ. В таком приборе за величину T_{cr} разумно принять минимальную температуру реакционного сосуда, при которой распыляемая в нем свинцовая пыль способна воспламеняться от срабатывания встроенного источника зажигания.

Выводы

Исследован образец свинцовой пыли со средним размером частиц около $8,5 \text{ мкм}$ в 20-л взрывной камере Сивека с пиротехническим источником зажигания, имеющим запас энергии 10 кДж . Максимальное избыточное давление взрыва составило $\approx 150 \text{ кПа}$, индекс взрывопожароопасности составил около 2 бар м/с . Диапазон взрывоопасных концентраций пыли (от 1000 до 1500 г/м^3) расположен заметно ниже стехиометрической концентрации (3600 г/м^3).

Результаты исследования пыли имеют особенности, характерные для дисперсного материала, взрывобезопасного при нормальных условиях обращения (температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$, давлении 100 кПа): индекс взрывопожароопасности менее 45 бар м/с ; случайный характер проявления взрывоопасности во всем диапазоне концентраций пыли в аэровзвеси; двухэтапный характер развития взрыва, определяемый по наличию двух точек перегиба на зависимости давления в камере от времени в единичном опыте.

Регистрация взрывов свинцовой пыли обусловлена эффектом «overdrive» — предварительным нагревом аэровзвеси в опытах с использованием энергоемкого источника зажигания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jacobson M., Cooper A.R., Nagy J. Explosibility of metal powders. US Bureau of Mines. Report of investigations 6516. 1962. 25 p.

2. Dorsett H.G., Jacobson M., Nagy J., Williams R.P. Laboratory equipment and test procedures for evaluating explosibility of dusts. US Bureau of Mines. Report of investigations 5624. 1960. 21 p.
3. Cashdollar K.L., Zlochower I.A. Explosion temperatures and pressures of metals and other elemental dust clouds // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2007. Vol. 20 (4–6). Pp. 337–348. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.018
4. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum explosible dust concentrations measured in 20-L and 1-m³ Chambers // Combustion Science and Technology. 1993. Vol. 87. Pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213
5. Addo A., Dastidar A.G., Taveau J.R., Morrison L.S., Khan F.I., Amyotte P.R. Niacin, lycopodium and polyethylene powder explosibility in 20-L and 1 m³ test chambers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
6. Taveau J.R., Lemkowitz S.M., Hochgreb S., Roekaerts D.J. E.M. Metal dusts explosion hazards and protection // Chemical Engineering Transactions. 2019. Vol. 77. Pp. 7–12. DOI: 10.3303/CET1977002
7. Eckhoff R.K. Dust explosions in the process industries: 3rd ed. Gulf Professional Publishing/Elsevier, Boston, 2003. 720 p.
8. 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. No. 65. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
9. Perera I.E., Harris M.L., Sapko M.L. Examination of classified rock dust (treated and untreated) performance in a 20-L explosion chamber // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. No. 62 (5). P. 103943. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103943
10. Portarapillo M., Trofa M., Sanchirico R., Di Benedetto A. CFD simulations of dust dispersion in the 1 m³ explosion vessel // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. No. 68. P. 104274. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104274
11. Mintz K.J. Problems in experimental measurements of dust explosions // Journal of Hazardous Materials. 1995. No. 42 (2). Pp. 177–186. DOI: 10.1016/0304-3894(95)00011-i
12. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I.A. Flammability limit measurements for dusts and gases : Ignition energy requirements and pressure dependences // Symposium (International) on Combustion. 1988. No. 21 (1). Pp. 303–313. DOI: 10.1016/s0082-0784(88)80258-3
13. Полетаев Н.Л. О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли в 20-л камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 6. С. 5–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20
14. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2007. Vol. 20. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
15. Полетаев Н.Л., Сазонов М.С., Контев М.Ю. Особенности взрыва антрацита в 20-л камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 23–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31
16. Cesana C., Siwek R. Operating instructions 20-l-Apparatus. Ver. 7.0. Birsfelden. Kühner AG. 2009.
17. Krietsch A., Scheid M. Test on suitability of a new pyrotechnical igniter for determination of explosion characteristics of dust clouds in 20-l-sphere and 1-m³-vessel // Sci. Tech/Energetic Materials. 2011. Vol. 72. No. 6. Pp.174–178.
18. Полетаев Н.Л. О взрывоопасности аэрозвеси меламина // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 9. С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28
19. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing. Comparison between 20 L and 1 m³ explosion vessels // Process Safety Progress. 2021. Vol. 40. Issue 4. Pp. 289–295. DOI: 10.1002/prs.12249

REFERENCES

1. Jacobson M., Cooper A.R., Nagy J. *Explosibility of Metal Powders. US Bureau of Mines. Report of investigations 6516.* 1962; 25.
2. Dorsett H.G., Jacobson M., Nagy J., Williams R.P. *Laboratory Equipment and Test Procedures for Evaluating Explosibility of Dusts. US Bureau of Mines. Report of investigations 5624.* 1960; 21.
3. Cashdollar K.L., Zlochower I.A. Explosion temperatures and pressures of metals and other elemental dust clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2007; 20(4-6):337-348. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.018
4. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum explosible dust concentrations measured in 20-l and 1-m³ chambers. *Combustion Science and Technology.* 1993; 87:157-171. DOI: 10.1080/00102209208947213

5. Addo A., Dastidar A.G., Taveau J.R., Morrison L.S., Khan F.I., Amyotte P.R. Niacin, lycopodium and polyethylene powder explosibility in 20-L and 1 m³ test chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
6. Taveau J.R., Lemkowitz S.M., Hochgreb S., Roekaerts D.J.E.M. Metal dusts explosion hazards and protection. *Chemical Engineering Transactions*. 2019; 77:7-12. DOI: 10.3303/CET1977002
7. Eckhoff R.K. Dust explosions in the process industries: 3rd ed. *Gulf Professional Publishing/Elsevier*. Boston, 2003; 720.
8. 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; 65:103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
9. Perera I.E., Harris M.L., Sapko M.L. Examination of classified rock dust (treated and untreated) performance in a 20-L explosion chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62(5):103943. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103943
10. Portarapillo M., Trofa M., Sanchirico R., Di Benedetto A. CFD simulations of dust dispersion in the 1 m³ explosion vessel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68:104274. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104274
11. Mintz K.J. Problems in experimental measurements of dust explosions. *Journal of Hazardous Materials*. 1995; 42(2):177-186. DOI: 10.1016/0304-3894(95)00011-i
12. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I.A. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences. *Symposium (International) on Combustion*. 1988; 21(1):303-313. DOI: 10.1016/s0082-0784(88)80258-3
13. Poletaev N.L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(6):5-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20 (rus).
14. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20:599-606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
15. Poletaev N.L., Sazonov M.S., Koptev M.U. Features of anthracite dust explosion in 20-l chamber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):23-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31 (rus).
16. Cesana C., Siwek R. *Operating Instructions 20-l-Apparatus. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden*. 2009.
17. Krietsch A., Scheid M. Test on suitability of a new pyrotechnical igniter for determination of explosion characteristics of dust clouds in 20-l-sphere and 1-m³-vessel. *Sci. Tech/Energetic Materials*. 2011; 72(6):174-178.
18. Poletaev N.L. On explosibility of melamine dust/air mixture. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(9):15-28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28 (rus).
19. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing: Comparison between 20 L and 1 m³ explosion vessels. *Process Safety Progress*. 2021; 40(4):289-295. DOI: 10.1002/prs.12249

Поступила 31.03.2024, после доработки 23.04.2024;

принята к публикации 05.06.2024

Received March 31, 2024; Received in revised form April 23, 2024;

Accepted June 5, 2024.

Информация об авторах

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

САЗОНОВ Михаил Сергеевич, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Науч-

Information about the authors

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

Mikhail S. SAZONOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Joint-Stock Company “Scientific Center of VOSTNII on Indus-

ный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Россия, 650002, Кемеровская область — Кузбасс, Кемеровский г.о.; г. Кемерово, ул. Институтская, 3, помещ. 1; РИНЦ ID: 543411; ORCID: 0000-0001-9000-7115; e-mail: m.sazonov@nc-vostnii.ru

КОПТЕВ Михаил Юрьевич, и.о. заведующего лабораторией борьбы с пылью и пылевзрывозащиты, Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Россия, 650002, Кемеровская область — Кузбасс, Кемеровский г.о.; г. Кемерово, ул. Институтская, 3, помещ. 1; РИНЦ ID: 893607; ORCID: 0009-0004-3812-9747; e-mail: m.koptev@nc-vostnii.ru

Вклад авторов:

Полетаев Н.Л. — научное руководство; обзор литературы; концепция исследования; написание текста; итоговые выводы.

Сазонов М.С. — проведение эксперимента.

Коптев М.Ю. — проведение эксперимента.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

trial and Environmental Safety in the Mining Industry”, Institutskaya, 3, room 1, Kemerovo, Kemerovo Region — Kuzbass, 650002, Russian Federation; ID RSCI: 543411; ORCID: 0000-0001-9000-7115; e-mail: m.sazonov@nc-vostnii.ru

Mikhail Yu. KOPTEV, Senior Researcher, Joint-Stock Company “Scientific Center of VOSTNII on Industrial and Environmental Safety in the Mining Industry”, Institutskaya, 3, room 1, Kemerovo, Kemerovo Region — Kuzbass, 650002, Russian Federation; ID RSCI: 893607; ORCID: 0009-0004-3812-9747; e-mail: m.koptev@nc-vostnii.ru

Contribution of the authors:

Poletaev N.L. — scientific guidance; literature review; research concept; writing the text; final conclusions.

Sazonov M.S. — conducting an experiment.

Koptev M.Yu. — conducting an experiment.

The authors declare that there is no conflict of interest