



Оценка максимального размера взрывоопасных частиц сульфида железа

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. Известны оценки максимального размера d_{cr} взрывоопасных частиц для двух видов сульфидной руды, выполненные на основе качественного подхода к анализу дисперсности горючих образцов руды (Soundararajan, Amyotte & Pegg, 1996): $49 \text{ мкм} < d_{cr, PO} < 63 \text{ мкм}$ для пирротина (PO); $85 \text{ мкм} < d_{cr, PY} < 145 \text{ мкм}$ для пирита (PY). Поставлена задача уточнить эти оценки, используя количественный метод упомянутого анализа и учитывая нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) по взвеси руды.

Метод обработки экспериментальных данных. Для двух полидисперсных образцов пирротина (НКПР_{PO,1} = 475 г/м³ и НКПР_{PO,2} = 1375 г/м³) и двух полидисперсных образцов пирита (НКПР_{PY,1} = 375 г/м³ и НКПР_{PY,2} = 500 г/м³) построены непрерывные функции F распределения частиц по размерам d . Полученные функции $F_{PO,1}(d)$, $F_{PO,2}(d)$, $F_{PY,1}(d)$ и $F_{PY,2}(d)$ представлялись распределениями Розина – Раммлера, заполняющими промежутки между дискретными данными ситового анализа образцов.

Оценка d_{cr} . Следуя процедуре оценки d_{cr} (Полетаев, 2014), находили значения $d_{cr, PO}$ и $d_{cr, PY}$ из уравнений $F_{PO,1}(d_{cr, PO})/F_{PO,2}(d_{cr, PO}) = \text{НКПР}_{PO,2}/\text{НКПР}_{PO,1}$ и $F_{PY,1}(d_{cr, PY})/F_{PY,2}(d_{cr, PY}) = \text{НКПР}_{PY,2}/\text{НКПР}_{PY,1}$, решение которых представлялось в наглядной графической форме.

Обсуждение результатов. Из-за низких значений показателей взрыва пирротина и пирита в 20-литровой камере (максимальное давление взрыва $P_{\max} \leq 350 \text{ кПа}$, индекс $K_{st} \leq 2 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$) обсуждалась правомерность отнесения руд к взрывоопасным пылям. Низкие показатели взрыва подтверждают, что основным горючим в аэрозвеси выступает сера. Эмпирическое обоснование взрывоопасности руд (Selle & Zehr, 1954) получено путем оценки температуры горения, которая превышает 1000 °С.

Выводы. Уточнены значения d_{cr} сульфидных руд: для пирротина $d_{cr} = 40 \text{ мкм}$, для пирита $d_{cr} = 107 \text{ мкм}$. В аэрозвесах руд выгорает, в основном, только сера, что заметно ослабляет взрывоопасность руд.

Ключевые слова: пирит; пирротин; взрыв пыли; 20-литровая камера; низкая взрывоопасность

Для цитирования: 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

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

Estimating the maximum size of explosive iron sulfide particles

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. There are estimates of the maximum size d_{cr} of explosive particles of the two types of sulfide ores. The estimates are based on a qualitative approach to the dispersion analysis of combustible ore specimens (Soundararajan, Amyotte & Pegg, 1996): $49 \text{ }\mu\text{m} < d_{cr, PO} < 63 \text{ }\mu\text{m}$ for pyrrhotite (PO) and $85 \text{ }\mu\text{m} < d_{cr, PY} < 145 \text{ }\mu\text{m}$ for pyrite (PY). The task was to refine these estimates using the quantitative method of the mentioned analysis, taking into account the lower explosive limit (LEL) of flame propagation in terms of ore suspensions.

Experimental data processing method. Continuous functions F of particle size distribution d were constructed for the two polydisperse specimens of pyrrhotite (LEL_{PO,1} = 475 g/m³ and LEL_{PO,2} = 1,375 g/m³) and two polydisperse specimens of pyrite (LEL_{PY,1} = 375 g/m³ and LEL_{PY,2} = 500 g/m³). The obtained functions $F_{PO,1}(d)$, $F_{PO,2}(d)$, $F_{PY,1}(d)$ and $F_{PY,2}(d)$ were converted using Rosin – Rammler distributions, filling the gaps between the discrete data of the grain-size analysis of the specimens.





d_{cr} rating. The procedure for estimating d_{cr} (Poletaev, 2014) was employed to find the values of $d_{cr, PO}$ and $d_{cr, PY}$ using the following equations: $F_{PO,1}(d_{cr, PO})/F_{PO,2}(d_{cr, PO}) = LEL_{PO,2}/LEL_{PO,1}$ and $F_{PY,1}(d_{cr, PY})/F_{PY,2}(d_{cr, PY}) = LEL_{PY,2}/LEL_{PY,1}$. The solutions were presented in the visual graphic format.

Discussion of the results. Due to the low values of explosion parameters of pyrrhotite and pyrite in a 20-liter chamber (maximum explosion pressure $P_{max} \leq 350$ kPa, index $K_{st} \leq 2$ MPa·m/s), the validity of classifying ores as explosive dusts was discussed. Low explosion values have proven that sulfur is the main fuel in the air suspension. The explosiveness of ores is proven empirically (Selle & Zehr, 1954) by estimating the combustion temperature, which exceeds 1,000 °C.

Conclusions. The values of d_{cr} for sulfide ores have been refined: for pyrrhotite, $d_{cr} = 40$ μm; for pyrite $d_{cr} = 107$ μm. In the air suspensions of ores, only sulfur is burnt out, which substantially reduces the explosiveness of ores.

Keywords: pyrite; pyrrhotite; dust explosion; 20-liter chamber; low explosiveness

For citation: 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).

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

Введение

Промышленная добыча железной руды, представляющей сульфиды железа, сопряжена с опасностью взрывов мелкодисперсной пыли, которые регулярно возникают на рудниках различных стран (Австралии, Канады, Китая, США и других), принося как материальные убытки, так и потери среди работников данной отрасли [1–3]. Исследованию взрывоопасности сульфидов железа посвящено немало научных работ¹ [2, 4–7], однако, ряд опасных характеристик данных соединений, важных для профилактики аварий, остается недостаточно изученным. В частности, это касается предельного размера частиц, способных сформировать взрывоопасную взрывозвесь. Например, в Австралии размеры таких частиц ограничены величиной 150 мкм, в то время как по российским нормам допускаются частицы размером до 300 мкм [6]. Опыт показывает, что нормативные ограничения могут иметь значительный запас надежности [8] из-за влияния различных факторов, к числу важнейших из которых относится содержание серы в руде. Поэтому в решении задачи о предельном размере взрывоопасных частиц, которому посвящена данная работа, следует оговаривать химический состав дисперсного материала.

В настоящей работе будут уточняться результаты, полученные в работе [1], где выполнены качественные оценки максимального среднего размера d_{max} взрывоопасных фракций двух видов сульфидной руды — пирротина и пирита. Для обозначения параметров этих веществ в дальнейшем используются индексы «РО» и «PY» соответственно. Согласно [1]: $49 \text{ мкм} < d_{max, PO} < 63 \text{ мкм}$ и $85 \text{ мкм} < d_{max, PY} < 145 \text{ мкм}$. Содержание железа и серы в пирротине составляло 38,6 и 34,2 % масс., в пирите соответственно 32,7 и 46,4 % масс. Из-за отсутствия (благодаря словам

«среднего размера») математической строгости определения параметра d_{max} , в настоящей работе уточняется смысл искомого параметра и решается задача определения значения обновленного параметра для рассмотренных в [1] образцов руды.

Следуя терминологии ГОСТ Р 12.3.047–2012 «ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» будем использовать параметр «максимальный размер d_{cr} взрывоопасных частиц взрывозвеси» и оценим d_{cr} для упомянутых выше двух видов сульфидной руды. Оценка d_{cr} будет основана на разработанном ранее методе расчета [8], использующем значения нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) для нескольких полидисперсных образцов пыли одного вида.

Метод обработки экспериментальных данных

Использование методики [8] предполагает наличие, по крайней мере, двух полидисперсных образцов исследуемой пыли с известными значениями нижнего концентрационного предела распространения пламени НКПР и известным непрерывным распределением частиц по размерам $F(d)$. Под $F(d)$ понимается массовая доля частиц, имеющих размер менее d .

Согласно [1] для двух полидисперсных образцов пирротина, имеющих НКПР_{PO,1} = 475 г/м³ и НКПР_{PO,2} = 1375 г/м³, и двух полидисперсных образцов пирита, имеющих НКПР_{PY,1} = 375 г/м³ и НКПР_{PY,2} = 500 г/м³, известны данные дискретного ситового анализа, представленные в табл. 1.

Непрерывные функции распределения частиц данных 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 [9]:

$$F(d_s) = 1 - [1 - F(d_{s1})]^B,$$

¹ USBM, RI 9632. Report of investigations secondary explosion hazards during blasting in oil shale and sulfide ore mines. 1995.



Таблица 1. Данные, % масс., ситового анализа образцов пирротина и пирита [1]

Table 1. Data, in wt %, of the grain-size analysis of pyrrhotite and pyrite specimens [1]

Материал Material	< 200 мкм < 200 μm	< 125 мкм < 125 μm	< 75 мкм < 75 μm	< 45 мкм < 45 μm	< 20 мкм < 20 μm
Пирротин (1) Pyrrhotite (1)	100	100	90	39	14
Пирротин (2) Pyrrhotite (2)	100	100	100	99,58*	66
Пирит (1) Pyrite (1)	99	92	29	3	2
Пирит (2) Pyrite (2)	100	100	85	27	6

*Уточнение параметра с учетом сведений о среднем размере частиц (50 мкм).

*Parameter value refinement with account taken of the information on the average particle size (50 μm).

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

$$B = (d_s/d_{s1})^{G_k};$$

G_k — крутизна функции распределения;

$$G_k = \text{Ln} \frac{\left\{ \frac{\text{Ln}[1 - F(d_{s2})]}{\text{Ln}[1 - F(d_1)]} \right\}}{\text{Ln}(d_2 / d_1)};$$

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 200 мкм.

В табл. 2 приводятся значения параметра G_k .

Полученные кусочно гладкие и непрерывные функции распределения $F_{\text{PO},1}(d)$, $F_{\text{PO},2}(d)$, $F_{\text{PY},1}(d)$ и $F_{\text{PY},2}(d)$ представлены на рисунке.

Оценка d_{cr}

Согласно методике [8], 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 [10]. Зависимость полноты выгорания Z монодисперсной фракции пыли от размера частиц d вблизи НКПР близка к одноступенчатой функции (см., например, [11]) и может быть представлена в виде: $Z = 1$, если $d \leq d_{cr}$, и $Z = 0$, если $d > d_{cr}$. Для оценки НКПР полидисперсной пыли, рассматриваемой в виде смеси пылей, представляющих монодисперсные фракции, можно использовать правило Ле Шателье [11].

В рамках используемых предположений $d_{cr, \text{PO}}$ и $d_{cr, \text{PY}}$ для пирротина и пирита соответственно находят из геометрически наглядного решения уравнений

$$F_{\text{PY},1}(d_{cr, \text{PY}})/F_{\text{PY},2}(d_{cr, \text{PY}}) = \text{НКПР}_{\text{PY},2}/\text{НКПР}_{\text{PY},1},$$

$$F_{\text{PO},2}(d_{cr, \text{PO}})/F_{\text{PO},1}(d_{cr, \text{PO}}) = \text{НКПР}_{\text{PO},2}/\text{НКПР}_{\text{PO},1}.$$

Согласно представленной на рисунке графической информации, имеем для пирротина $d_{cr, \text{PO}} = 40$ мкм, для пирита $d_{cr, \text{PY}} = 107$ мкм.

Обсуждение результатов

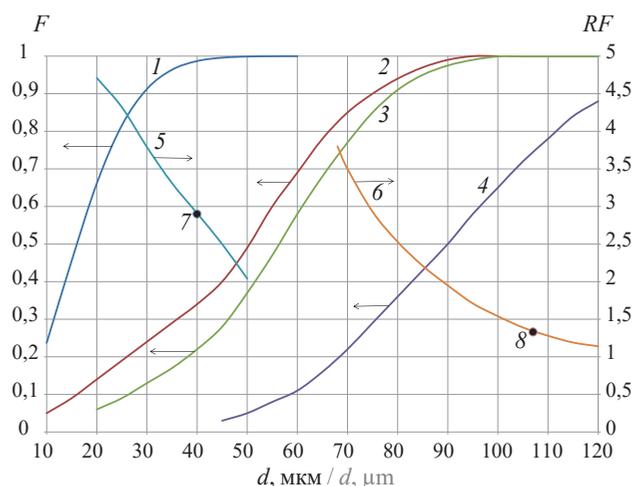
Расчет $d_{cr, \text{PY}}$ для пирита не противоречит результатам качественных оценок [1], но уточняет положение границы взрывоопасной фракции пирита. Расчетная величина $d_{cr, \text{PO}}$ для пирротина заметно ниже качественного прогноза [1], что указывает на возможность сокращения масштаба взрывоопасной фракции пирротина и подтверждает полезность количественного подхода к оценке d_{cr} , заимствованного из [8].

В то же время следует отметить, что объективность результатов настоящей работы зависит от надежности использованных исходных данных о сульфидах железа, которая, как будет видно из нижеизложенного, нуждается в дополнительном анализе. Действительно, расчет по [8] предполагает использование показателей взрывоопасности пылевоздушных смесей, исследованных в крупно-

Таблица 2. Крутизна функции распределения

Table 2. The steepness of the distribution function

Материал Material	G_k			
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
Пирротин (1) Pyrrhotite (1)	1,464	3,01		
Пирротин (2) Pyrrhotite (2)	2,0			
Пирит (1) Pyrite (1)	0,506	4,74	3,91	1,28
Пирит (2) Pyrite (2)	2,0	3,517		



Функции распределения $F_{PY,1}$ (1), $F_{PY,2}$ (2), $F_{PO,1}$ (3), $F_{PO,2}$ (4) частиц сульфидов железа по размерам d и их отношения $RF_{PY} = F_{PY,1}/F_{PY,2}$ (5) и $RF_{PO} = F_{PO,1}/F_{PO,2}$ (6). Жирными точками 7 и 8 отмечены случаи $RF_{PY} = НКПР_{PY,2}/НКПР_{PY,1} = 2,9$ и $RF_{PO} = НКПР_{PO,2}/НКПР_{PO,1} = 1,33$ соответственно

Distribution functions $F_{PY,1}$ (1), $F_{PY,2}$ (2), $F_{PO,1}$ (3), $F_{PO,2}$ (4) of iron sulfide particles by size d and their ratios $RF_{PY} = F_{PY,1}/F_{PY,2}$ (5) and $RF_{PO} = F_{PO,1}/F_{PO,2}$ (6). Bullet points 7 and 8 mark the cases $RF_{PY} = LEL_{PY,2}/LEL_{PY,1} = 2.9$ and $RF_{PO} = LEL_{PO,2}/LEL_{PO,1} = 1.33$, respectively

масштабной взрывной камере объемом порядка 1 м^3 с энергоемким источником зажигания (10 кДж). Использование такой камеры позволяет не сомневаться в наличии или в отсутствии взрывоопасности исследуемой пыли, особенно в тех случаях, когда пыль близка к границе между взрывоопасными и взрывобезопасными дисперсными материалами [12]. Поскольку автору не удалось обнаружить информацию о стандартных исследованиях показателей взрывоопасности рассматриваемых пылей в крупномасштабной камере, включая поиск в международном банке данных², в настоящей работе использованы результаты исследований в камере объемом 20 л с учетом описанных ниже предосторожностей.

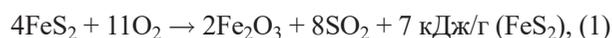
Согласно классификации [12], аэровзвеси сульфидов железа демонстрируют принадлежность к аэровзвесям с низкой взрывоопасностью, которым в последнее время стали уделять повышенное внимание [13–17]. Как показано в [12], наиболее распространенная в мировой практике 20-литровая камера Р. Сивека способствует завышению оценки взрывоопасности пыли, допуская для упомянутых пылей случаи отнесения невзрывоопасной пыли к числу взрывоопасных пылей.

Правила «недоверия» результатам исследования взрывоопасности пыли в 20-литровой камере перечислены в [12]. Согласно одному из таких

правил, пыль по результатам испытаний в камере объемом 1 м^3 будет, вероятнее всего, отнесена к невзрывоопасным, если в 20-литровой камере Р. Сивека при использовании источника зажигания с энергией 10 кДж для этой пыли получено $K_{st} < 4,5 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$. Здесь $K_{st} = V^{1/3}(dP/dt)_{\text{max}}$ — нормированное на объем взрывной камеры V значение максимальной скорости нарастания давления взрыва $(dP/dt)_{\text{max}}$.

Для использованных в настоящей работе образцов пирита и пирротина получены в 20-литровой камере значения $K_{st} \leq 2,0 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$ [1]. Хотя при исследовании образцов пирита и пирротина в [1] применяли менее энергоемкий источник зажигания (5 кДж), из-за наличия сформулированного выше правила «недоверия» возникают сомнения во взрывоопасности упомянутых образцов. Для устранения сомнений ниже приводится описание механизма горения аэровзвеси сульфидов железа, производится оценка минимально возможных значений параметров взрыва и сравнение этих параметров с параметрами горения сульфидов железа, использованных в данной работе.

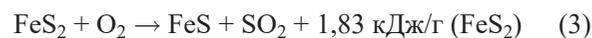
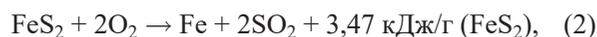
Специфика горения аэровзвесей сульфидов железа в замкнутом объеме состоит как в низком значении скорости нарастания давления продуктов горения, о чем говорилось выше, так и в низком значении максимального давления продуктов горения ($\approx 360 \text{ кПа}$ [1, 2, 4]). Последнее указывает на неравноправное участие железа и серы, входящих в состав пирита, в реакции окисления кислородом воздуха. Действительно, при равноправном участии, описываемом реакцией:



и стехиометрическом содержании пирита в аэровзвеси максимальное давление продуктов горения P_{max} составит величину около 720 кПа, которая в два раза превышает экспериментальное значение параметра. Здесь и далее используются термодинамические характеристики участвующих в реакциях веществ, приведенные в [18].

Альтернативой реакции (1) является предположение о том, что основным горючим в аэровзвеси сульфидов железа выступает сера [1].

Термодинамическим расчетом несложно показать, что для двух вариантов реакции серы, входящей в состав пирита, с кислородом воздуха

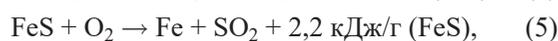


оценки P_{max} и максимальной адиабатической температуры горения T_b дают значения порядка 350...400 кПа (которые отвечают как результатам тестирования пирита в 20-литровой камере, так

² GESTIS-DUST-EX: compiled by IFA (Institut fuer Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung), as of 2021. URL: <http://staubex.ifa.dguv.de/explosuche.aspx>

и результатам нестандартных исследований пирита в крупномасштабной камере¹) и 1000...1200 °С соответственно.

Выполнить подобные расчеты и получить аналогичные выводы можно и для случая окисления пирротина кислородом воздуха



где реакция (4) отвечает равноправному выгоранию железа и серы (расчет: $P_{\max} = 700$ кПа), а в реакции (5) горючим является только сера (расчет: $P_{\max} = 330$ кПа, $T_b = 1000$ °С).

Общность полученных оценок поддерживает уверенность в объективности описания механизма проявления взрывоопасности сульфидов железа через реакции (2), (3) и (5). Расчетная величина $T_b \geq 1000$ °С отвечает эмпирическому определению взрывоопасной аэровзвеси [19], устраняя высказанные в начале данного раздела сомнения по вопросу о взрывоопасности данных веществ.

Выводы

Рассмотрены известные качественные оценки максимального среднего размера частиц взрыво-

опасных аэровзвесей пирротина (от 49 до 63 мкм) и пирита (от 85 до 145 мкм), полученные на основе результатов тестирования взрывоопасности упомянутых материалов в сферической камере объемом 20 л.

Данные оценки уточнены на основе количественного метода, в котором используются сведения о нижнем концентрационном пределе распространения пламени для нескольких (двух и более) полидисперсных образцов каждого из анализируемых материалов. Уточненные значения критического параметра составили 40 мкм для пирротина и 107 мкм для пирита.

Из-за низких значений показателей взрыва пирротина и пирита в камере объемом 20 л (максимальное давление взрыва $P_{\max} \leq 350$ кПа, индекс $K_{st} \leq 2$ МПа·м/с) обсуждалась правомерность отнесения анализируемых материалов к взрывоопасным пылям. Низкие значения показателей взрыва обусловлены механизмом горения аэровзвеси сульфидов железа, при котором в качестве основного горючего выступает сера. Одновременно показано, что расчетная величина максимальной адиабатической температуры горения рассматриваемых аэровзвесей $T_b \geq 1000$ °С, что отвечает эмпирическому определению взрывоопасной пыли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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
2. Rao Yun-zhang, Tian Chang-shun, Xu Wei, Xiao Chun-yu, Yuan Bo-yun, Yu Yao. Explosion pressure and minimum explosible concentration properties of metal sulfide ore dust clouds // *Journal of Chemistry*. 2020. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2020/7980403
3. Тетерев Н.А., Ермолаев А.И., Кузнецов А.М. Взрывы сульфидной пыли // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. Спец. вып. 63. № 12. 20 с.
4. Liu Q., Katsabanis P.D. Hazard evaluation of sulphide dust explosions // *Journal of Hazardous Materials*. 1993. Vol. 33. Issue 1. Pp. 35–49. DOI: 10.1016/0304-3894(93)85062-j
5. Ермолаев А.И., Тетерев Н.А. Анализ исследований в области взрывов пыли и их предупреждения на подземных рудниках // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2015. № 8. С. 75–80. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24993420>
6. Rylnikova M., Fedotenko V., Mitishova N. Influence of structural and textural features of ores and rocks on mine dust explosion hazard during development of pyrite deposits // *E3S Web of Conferen-*
7. Горин С.А., Маслов И.Ю. Возгорание пылевоздушных смесей под действием ударных воздушных волн при подземной добыче колчеданных руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 33. С. 13–22. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-33-13-22
8. 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
9. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд. Л.: Химия, 1987. 264 с.
10. 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. S. 583.
11. 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.
12. Полетаев Н.Л. О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей



- пыли в 20-литровой камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 6. С. 5–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20
13. Поletaев Н.Л. О взрывоопасности взрывов меламина // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 9. С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.1528
14. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C., Amyotte P.R. 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
15. 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
16. 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
17. Поletaев Н.Л. Об оценке взрывоопасности ядерного графита в 1-м³ камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 15–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21
18. Термические константы веществ / под ред. В.П. Глушко. М.: ВИНТИ, 1965–1981. Вып. I–X.
19. 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. S. 583.

REFERENCES

1. 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
2. Rao Yun-zhang, Tian Chang-shun, Xu Wei, Xiao Chun-yu, Yuan Bo-yun, Yu Yao. Explosion pressure and minimum explosible concentration properties of metal sulfide ore dust clouds. *Journal of Chemistry*. 2020; 1-12. DOI: 10.1155/2020/7980403
3. Teterev N.A., Ermolaev A.I., Kuznetsov A.M. Explosions of sulfide dust. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'/Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; Special edition 63:1-29. (rus).
4. Liu Q., Katsabanis P.D. Hazard evaluation of sulphide dust explosions. *Journal of Hazardous Materials*. 1993; 33(1):35-49. DOI: 10.1016/0304-3894(93)85062-j
5. Ermolaev A.I., Teterev N.A. Analysis of investigations in the sphere of dust explosions and its prevention at underground mines. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal/Minerals and Mining Engineering*. 2015; 8:75-80. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24993420> (rus).
6. Rylnikova M., Fedotenko V., Mitishova N. Influence of structural and textural features of ores and rocks on mine dust explosion hazard during development of pyrite deposits. *E3S Web of Conferences*. 2020; 192:03017. DOI: 10.1051/e3sconf/202019203017
7. Gorinov S.A., Maslov I.Yu. Ignition of dust-air mixtures under the action of air shock waves in underground mining of massive sulfide ores. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'/Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; Special edition 33:13-22. (rus).
8. 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).
9. Kouzov P.A. *Fundamentals of the analysis of the disperse composition of industrial dusts and crushed materials*. 3th ed. Leningrad, Himiya Publ., 1987; 264.
10. 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).
11. Hertzberg M., Cashdollar K.L. Introduction to dust explosions. *The Industrial Dust Explosions*. K.L. Cashdollar, M. Henzberg (ed.). ASTM Special Technical Publication 958. Philadelphia, ASTM, 1987; 5-32.
12. Poletaev N.L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(6):5-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20 (rus).
13. Poletaev N.L. On explosibility of melamine dust/air mixture. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26 (9):15-28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28 (rus).
14. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C., Amyotte P.R. 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
15. 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
16. 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
17. Poletaev N.L. On the assessment of the explosion hazard of nuclear graphite in a 1-m³ chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):15-21. DOI: 10.18322/PVB.2022.31.02.15-21
18. *Thermal constants of substances*. V.P. Glushko (ed.). Moscow, VINITI, 1965-1981; I-X.
19. 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).

*Поступила 12.04.2022, после доработки 5.05.2022;
принята к публикации 20.05.2022*

*Received April 12, 2022; Received in revised form May 5, 2022;
Accepted May 20, 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, VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC:1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

