

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 3. С. 5–10
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(3):5-10

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.4

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.03.5-10>

Максимальный размер взрывоопасных частиц аэровзвеси 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. Рассматриваются известные результаты экспериментального исследования нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) по аэровзвесям полидисперсных образцов пыли железа в 1-м³ камере (Clouthier, Taveau, Dastidar et al., 2019) и 20-л камере (Cashdollar, 1994). Анализ этих результатов на качественном уровне, выполненный авторами данных исследований, показал, что максимальный размер d_{cr} частиц железа, определяющих взрывоопасность аэровзвеси железной пыли, принадлежит интервалу от 30 до 75 мкм. Поставлена задача уточнить оценку d_{cr} на основе количественного анализа результатов исследования в 1-м³ камере известным методом (Полетаев, 2014).

Выбор и обработка исходных данных. Для двух полидисперсных образцов железа с различными пределами горения в 1-м³ камере (НКПР₁ = 250 г/м³ для тонкодисперсного образца и НКПР₂ = 1250 ... 1500 г/м³ для грубодисперсного образца) построены непрерывные функции распределения частиц по размерам: $F_1(d)$ и $F_2(d)$ соответственно. Здесь $F(d)$ — массовая доля фракции частиц полидисперсного образца, имеющих размер менее d .

Оценка d_{cr} и обсуждение результата. Следуя процедуре количественного метода оценки d_{cr} , решали уравнение $F_1(d_{cr})/F_2(d_{cr}) = \text{НКПР}_2/\text{НКПР}_1$ в наглядной графической форме. Результат решения: $d_{cr} = 36 \pm 3$ мкм. Полученный количественный результат существенно уточнил известную качественную оценку d_{cr} .

Выводы. Способность полидисперсной аэровзвеси железной пыли распространять пламя (т.е. ее взрывоопасность) определяется содержанием мелкодисперсной фракции «менее d_{cr} », минимальное количество которой должно превышать величину порядка 150 г/м³.

Ключевые слова: порошок железа; мелкая фракция; взрыв пыли; 1-м³ камера; нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР)

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Максимальный размер взрывоопасных частиц аэровзвеси железа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 5–10. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.5-10

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

Maximum explosive particles size of iron air suspension

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 well-known results of experimental study of the minimum explosive concentration (MEC) polydisperse iron dust air suspension in a 1-m³ chamber (Clouthier, Taveau, Dastidar et al., 2019) and a 20-L chamber (Cashdollar, 1994) are considered. An analysis of these results at a qualitative level, carried out by the authors of these studies, showed that the maximum size of iron particles d_{cr} responsible for the explosion hazard belongs to the range from 30 microns to 75 microns. The task is to clarify the d_{cr} based on a quantitative analysis of the results of the study in a 1-m³ chamber by the known method (Poletaev, 2014).

Selection and processing of initial data. For two polydisperse iron specimens with different MEC in a 1-m³ chamber (MEC₁ = 250 g/m³ for a fine specimen and MEC₂ = 1,250 ... 1,500 g/m³ for a coarse specimen), continuous particle size distribution functions are constructed: $F_1(d)$ and $F_2(d)$, respectively. Here, $F(d)$ is the mass fraction specimen particles having size less than d .

Estimation of d_{cr} and discussion of the result. Following the procedure of the quantitative d_{cr} estimation method, the equation $F_1(d_{cr})/F_2(d_{cr}) = \text{MEC}_2/\text{MEC}_1$ was solved in a visual graphical form. The result of the solution: $d_{cr} = 36 \pm 3$ microns. The obtained quantitative result significantly clarified the known qualitative assessment of the d_{cr} .

Conclusions. The ability of polydisperse air suspension of iron dust to spread the flame (i.e. its explosiveness) is determined by the content of fine fraction “less than d_{cr} ”. The minimum amount of this fraction should exceed the value of about 150 g/m³.

Keywords: iron powder; fine fraction; dust explosion; 1-m³ chamber; minimum explosive concentration (MEC)

For citation: Poletaev N.L. Maximum explosive particles size of iron air suspension. *Pozharovzryvobezопасnost/ Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):5-10. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.5-10 (rus).

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

Введение

Ожидается, что металлическое топливо как пригодный для вторичной переработки носитель энергии ввиду обилия и высокой плотности энергии заменит в будущем ископаемое топливо в экономике с нулевым выбросом углерода [1]. Одним из наиболее перспективных видов металлического топлива считается мелкодисперсное железо, поскольку его оксиды могут быть легко собраны и затем восстановлены с помощью солнечной энергии или энергии ветра [2–4]. Перспективы широкого использования мелкодисперсного железа в энергетической отрасли промышленности с необходимостью сопряжены с опасностью взрывов железной пыли, которые регулярно возникают в различных странах, принося как материальные убытки, так и людские потери¹.

Профилактика взрывов железной пыли основывается на результатах разнообразных исследований горючести дисперсного железа, которым посвящено немало научных работ. Например, проводились исследования горения как отдельных частиц железа [5–7], так и аэрозвесей железной пыли, включая ламинарное горение [8], турбулентное горение в маломасштабной 20-л камере [9–14] и крупномасштабной 1-м³ камере [11, 15, 16], температуру самовоспламенения [17].

В то же время ряд характеристик взрывоопасности железной пыли остается недостаточно изученным. Это, в частности, касается предельного размера частиц железа d_{cr} , способных образовать взрывоопасную взвесь в воздухе нормального состава. Результаты исследований нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) по аэрозвесей железной пыли предлагают весьма широкий интервал размеров, к которому принадлежит упомянутый параметр: 30 мкм $\leq d_{cr} \leq 75$ мкм. Нижняя граница интервала обусловлена независимостью НКПР железной пыли от дисперсного состава при размере частиц менее 30 мкм [9]. Верхняя граница интервала обусловлена взрывобезопасностью железной пыли при размере частиц более 75 мкм [16].

¹ CSB. CSB Continues Investigation of Fatal Fire at Hoeganaes Corporation Located Outside of Nashville, Tennessee, 2011. URL: <https://www.csb.gov/csb-continuesinvestigation-of-fatal-fire-at-hoeganaes-corporation-located-outside-of-nashville-tennessee/>

В настоящей работе поставлена задача уточнить оценку d_{cr} на основе анализа полученных в [16] результатов с помощью метода расчета d_{cr} , предложенного в работе [18].

Выбор экспериментальных данных

Применение метода [18] для оценки d_{cr} предполагает наличие нескольких (по крайней мере двух) полидисперсных образцов исследуемой пыли, для каждого из которых известны НКПР и распределение частиц по размерам $F(d)$. Под $F(d)$ понимается массовая доля частиц дисперсного образца, имеющих размер менее d . Последнее, в частности, предполагает, что форма отдельной частицы образца позволяет с приемлемой точностью характеризовать эту частицу единственным (габаритным) размером. Для оценки d_{cr} предпочтительно использовать значения НКПР, полученные при тестировании образцов пыли в крупномасштабной камере, и иметь существенное отличие значений НКПР и/или $F(d)$ для различных образцов.

Для настоящего исследования выбраны два образца железной пыли, исследованной в 1-м³ камере Fike Corporation, USA [16].

НКПР выбранных образцов можно оценить по графикам зависимости избыточного давления взрыва от концентрации аэрозвесей в 1-м³ камере, приведенным на рис. 1. В качестве критерия взрыва аэрозвесей в камере полагаем скачок давления в 1 бар

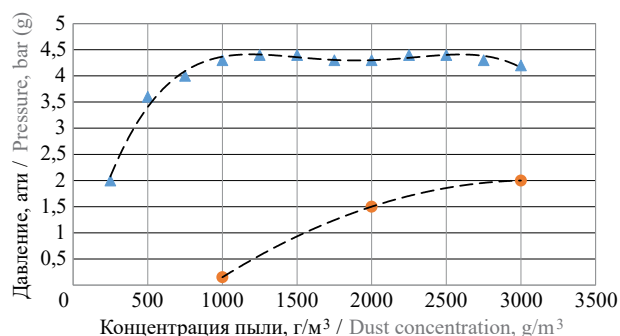


Рис. 1. Зависимость избыточного давления взрыва тонкодисперсного (▲) и грубодисперсного (●) образцов железной пыли от концентрации пыли в воздухе [16]; 1 бар = 10⁵ кПа
Fig. 1. Dependence of explosion overpressure of fine (▲) and coarse (●) iron dust specimens on the dust concentration in the air [16]; 1 bar = 10⁵ kPa

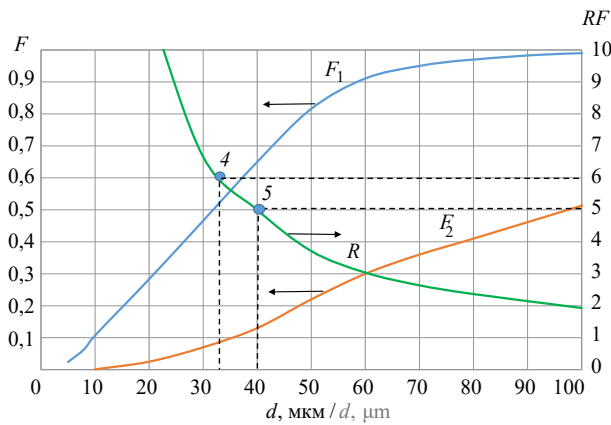


Рис. 2. Зависимости массовой доли F фракции частиц «менее d_{cr} » от размера d для тонкодисперсного (F_1) и грубодисперсного (F_2) образцов железа [16] и их отношение $RF = F_1/F_2$. Жирная точка 4 имеет координаты $d = 33$ мкм, $RF = 6$. Жирная точка 5 имеет координаты $d = 39$ мкм, $RF = 5$

Fig. 2. Dependences of the mass fraction F of the particle fraction «less than d_{cr} » on the size d for fine (F_1) and coarse (F_2) iron specimens [16] and their ratio $RF = F_1/F_2$. Bold point 4 has coordinates $d = 33$ microns, $RF = 6$. Bold point 5 has coordinates $d = 39$ microns, $RF = 5$

(100 кПа) в соответствии с нормами США². Отсюда следует существенное различие бедных пределов для выбранных образцов: НКПР₁ ≈ 250 г/м³; НКПР₂ = 1250 ... 1500 г/м³. Разброс последнего значения вызван скудностью экспериментальных данных. Здесь и далее нижние индексы «1» и «2» относятся к тонкодисперсному и грубодисперсному образцу соответственно.

Функции распределения частиц выбранных образцов по размерам F_1 и F_2 также существенно различаются, что видно из графиков, приведенных на рис. 2. Анализ частиц с использованием электронного микроскопа показал, что форма частиц удовлетворительно аппроксимируется сферой.

Оценка d_{cr}

Согласно методике [18], оценка d_{cr} основана на трех эмпирических правилах (П) горения взвешенной в воздухе пыли однородного твердого горючего вещества конкретного химического состава.

П1: существует размер d_{cr} , разделяющий монодисперсные аэрозвеси на взрывоопасные (с размером частиц менее d_{cr}) и невзрывоопасные (с размером частиц более d_{cr}).

П2: НКПР взрывоопасной монодисперсной аэрозвеси не зависит от размера частиц и далее будет обозначаться символами НКПР₀.

П3: для аэрозвеси полидисперсной пыли НКПР = НКПР₀/ η_{cr} , где η_{cr} — массовая доля фракции «менее d_{cr} », т.е. $\eta_{cr} = F(d_{cr})$.

² ASTM E1515–14. Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts. 2014.

Следуя правилу П3, находят d_{cr} для железа путем геометрически наглядного решения уравнения:

$$F_1(d_{cr})/F_2(d_{cr}) = \text{НКПР}_2/\text{НКПР}_1 = 5 \dots 6.$$

Согласно представленной на рис. 2 графической информации, имеем для пыли железа $d_{cr} = 36 \pm 3$ мкм, откуда, в частности, следует оценка НКПР₀ ≈ 150 г/м³.

Обсуждение результата

Полученная в данной работе оценка d_{cr} для пыли железа ($d_{cr} = 36 \pm 3$ мкм) по методу из [18] не противоречит известным качественным характеристикам данного параметра: $30 \text{ мкм} \leq d_{cr} \leq 75 \text{ мкм}$ [9, 16]. Одновременно следует заметить, что объективность выполненной оценки зависит от надежности использованных исходных данных о дисперсности и горючести образцов железной пыли, которая требует дополнительного обсуждения.

Известной причиной неконтролируемого изменения дисперсности пыли является процедура распыления исходного дисперсного материала во взрывных камерах, которая для некоторых видов материалов приводит к измельчению частиц [19, 20]. Поскольку частицы железа не относятся к хрупким материалам, разумно предполагать отсутствие такого эффекта в экспериментах [16] и считать дисперсность железной пыли неизменной.

Надежность использованных в настоящей работе значений НКПР для образцов железной пыли можно формально подтвердить надежностью метода получения этих значений во взрывной камере объемом 1 м³ по стандарту EN 14034³. Известно [21, 22], что тестирование пыли в 1-м³ камере дает наибольшую (включая сравнение с 20-л камерой) уверенность в наличии взрывоопасности у исследуемого образца пыли, особенно в тех случаях, когда образец близок к границе между взрывоопасными и взрывобезопасными дисперсными материалами.

Тем не менее сомнение в надежности использованных значений НКПР из [16] все же имеется. Поводом для сомнения является заметное отличие максимального давления взрыва мелкодисперсного образца $P_{1 \text{ max}} = 4,4$ бар (см. рис. 1) от величины 6,5 бар, полученной в 1-м³ камере другими исследователями для образца железной пыли похожего дисперсного состава [15]. Возможно предположить, что это отличие вызвано использованием разных распылителей: «Semicircular spray pipe» в [15] и «Rebound nozzle» в [16]. Первый распылитель является оригинальным (соответствует ISO 6184-1⁴) и обеспечивает равномерное распыление железной

³ EN 14034-1:2004+A1:2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds.

⁴ ISO 6184-1:1985 (en). Explosion protection systems — Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air.

пыли по объему камеры, поскольку параметр $P_{\max}$ в [15] близок к своему адиабатическому значению 6,55 бар [9].

В то же время следует отметить, что для оценки d_{cr} используется не абсолютное значение НКПР, а отношение пределов разных полидисперсных пылей. Поэтому для получения искомого результата достаточно иметь пространственное подобие распределения пыли по объему взрывной камеры при различных среднеобъемных концентрациях дисперсного материала, которое, скорее всего, в опытах [16] присутствует.

Выводы

Рассмотрена известная качественная оценка максимального размера взрывоопасных частиц d_{cr} аэрозвесей железа (более 30 мкм, но менее 75 мкм), полученная на основе результатов тестиро-

вания взрывоопасности различных полидисперсных пылей железа в камерах объемом 20 л и 1 м³.

Данная оценка уточнена на основе разработанного автором количественного метода, в котором используются сведения о нижнем концентрационном пределе распространения пламени для двух существенно различных полидисперсных образцов в 1-м³ камере. Уточненное значение критического параметра для железной пыли составило 36 ± 3 мкм.

Согласно идеологии построения оценки d_{cr} , способность полидисперсной аэрозвесей железной пыли распространять пламя определяется содержанием фракции «менее d_{cr} », которое должно превышать величину порядка 150 г/м³. Горение частиц большего размера возникает при наличии остатков кислорода в продуктах горения указанной мелкой фракции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bergthorson J.M. Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power // Progress in Energy and Combustion Science. 2018. No. 68. Pp. 169–196. DOI: 10.1016/j.pecs.2018.05.001
2. Bergthorson J.M., Goroshin S., Soo M.J., Julien P., Palecka J., Frost D.L. et al. Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power // Applied Energy. 2015. No. 160. Pp. 368–382. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.09.037
3. Wiinikka H., Vikström T., Wennebro J., Toth P., Sepman A. Pulverized sponge iron, a zero carbon and clean substitute for fossil coal in energy applications // Energy & Fuels. 2018. No. 32 (9). DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02270
4. Tóth P., Ögren Y., Sepman A., Gren P., Wiinikka H. Combustion behavior of pulverized sponge iron as a recyclable electrofuel // Powder Technology. 2020. No. 373. Pp. 210–219. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.05.078
5. Sun J.-H., Dobashi R., Hirano T. Combustion behavior of iron particles suspended in air // Combustion Science and Technology. 2000. No. 150 (1). Pp. 99–114. DOI: 10.1080/00102200008952119
6. Ning D., Shoshin Y., van Oijen J.A., Finotello G., de Goey L.P.H. Burn time and combustion regime of laser-ignited single iron particle // Combust Flame. 2021. No. 230. P. 111424. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111424
7. Ning D., Shoshin Y., van Stiphout M., van Oijen J., Finotello G., de Goey P. Temperature and phase transitions of laser-ignited single iron particle // Combust Flame. 2022. No. 236. P. 111801. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111801
8. Tang F.-D., Goroshin S., Higgins A.J. Modes of particle combustion in iron dust flames // Proceedings of the Combustion Institute. 2011. No. 33 (2). Pp. 1975–1982. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.088
9. Cashdollar K.L. Flammability of metals and other elemental dust clouds // Process Safety Progress. 1994. No. 13 (3). Pp. 139–145. DOI: 10.1002/prs.680130306
10. Cashdollar K.L. Overview of dust explosibility characteristics // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2000. No. 13 (3–5). Pp. 183–199. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00039-X
11. Going J.E., Chatrathi K., Cashdollar K.L. Flammability limit measurements for dusts in 20-l and 1-m³ vessels // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2000. No. 13. Pp. 209–219. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00043-1
12. Taveau J.R., Going J.E., Hochgreb S., Lemkowitz S.M., Roekaerts D.J.E.M. Igniter-induced hybrids in the 20-l sphere // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. No. 49. Pp. 348–356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
13. Danzi E., Pio G., Marmo L., Salzano E. The explosion of non-nano iron dust suspension in the 20-l spherical bomb // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. No. 71. P. 104447. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104447
14. Guo Y., Ren K., Wei A., Tao C., Huang W., Zhao P. et al. Iron dust explosion characteristics with small amount of nano-sized Fe₂O₃ and Fe₃O₄ particles // Manuscript FUEL. 2022. P. 124786. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124786
15. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben // SFT-Report. 1979. No. 2.2. 100 p. URL: <http://staubex.ifa.dguv.de/explosuche.aspx>

16. 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. 62. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
17. Mi X., Fujinawa A., Bergthorson J.M. A quantitative analysis of the ignition characteristics of fine iron particles // *Combust Flame*. 2022. No. 240. P. 112011. DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112011
18. Полежаев 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
19. Kalejaiye O., Amyotte P.R., Pegg M.J., Cashdollar K.L. Effectiveness of dust dispersion in the 20-L Siwek chamber // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2010. No. 23 (1). Pp. 46–59. DOI: 10.1016/j.jlp.2009.05.008
20. Altwal J.M., Véhot L.N. Experimental study of the influence of particle size on Minimum Explosible Concentration of sulfur dust // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. No. 71. P. 104507. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104507
21. 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. No. 20. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
22. Полежаев 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

REFERENCES

1. Bergthorson J.M. Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2018; 68:169-196. DOI: 10.1016/j.pecs.2018.05.001
2. Bergthorson J.M., Goroshin S., Soo M.J., Julien P., Palecka J., Frost D.L. et al. Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power. *Applied Energy*. 2015; 160:368-382. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.09.037
3. Wiinikka H., Vikström T., Wennebro J., Toth P., Sepman A. Pulverized Sponge Iron, a Zero Carbon and Clean Substitute for Fossil Coal in Energy Applications. *Energy & Fuels*. 2018; 32(9). DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02270
4. Tóth P., Ögren Y., Sepman A., Gren P., Wiinikka H. Combustion behavior of pulverized sponge iron as a recyclable electrofuel. *Powder Technology*. 2020; 373:210-219. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.05.078
5. Sun J.-H., Dobashi R., Hirano T. Combustion behavior of iron particles suspended in air. *Combustion Science and Technology*. 2000; 150(1):99-114. DOI: 10.1080/00102200008952119
6. Ning D., Shoshin Y., van Oijen J.A., Finotello G., de Goey L.P. H. Burn time and combustion regime of laser-ignited single iron particle. *Combust Flame*. 2021; 230:111424. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111424
7. Ning D., Shoshin Y., van Stiphout M., van Oijen J., Finotello G., de Goey P. Temperature and phase transitions of laser-ignited single iron particle. *Combust Flame*. 2022; 236:111801. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111801
8. Tang F.-D., Goroshin S., Higgins A.J. Modes of particle combustion in iron dust flames. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011; 33(2):1975-1982. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.088
9. Cashdollar K.L. Flammability of metals and other elemental dust clouds. *Process Safety Progress*. 1994; 13(3):139-145. DOI: 10.1002/prs.680130306
10. Cashdollar K.L. Overview of dust explosibility characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2000; 13(3-5):183-199. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00039-X
11. Going J.E., Chatrathi K., Cashdollar K.L. Flammability limit measurements for dusts in 20-l and 1-m³ vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2000; 13:209-219. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00043-1
12. Taveau J.R., Going J.E., Hochgreb S., Lemkowitz S.M., Roekaerts D.J.E.M. Igniter-induced hybrids in the 20-l sphere. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; 49:348-356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
13. Danzi E., Pio G., Marmo L., Salzano E. The explosion of non-nano iron dust suspension in the 20-l spherical bomb. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104447. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104447
14. Guo Y., Ren K., Wei A., Tao C., Huang W., Zhao P. et al. Iron dust explosion characteristics with small amount of nano-sized Fe₂O₃ and Fe₃O₄ particles. *Manuscript FUEL*. 2022; 124786. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124786
15. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn-und Explosions — Kenngrößen von Stauben. *SFT-Report*. 1979; 2.2:100. URL: <http://staubex.ifa.dguv.de/explosuche.aspx>
16. 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
17. Mi X., Fujinawa A., Bergthorson J.M. A quantitative analysis of the ignition characteristics of fine iron particles. *Combust Flame*. 2022; 240:112011. DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112011

18. Poletaev N.L. Experiment-calculated estimating of the maximum particle size of explosive monodisperse dust-air mixture. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(9):15-26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15-26 (rus).
19. Kalejaiye O., Amyotte P.R., Pegg M.J., Cashdollar K.L. Effectiveness of dust dispersion in the 20-L Siwek chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2010; 23(1):46-59. DOI: 10.1016/j.jlp.2009.05.008
20. Altwal J.M., Véhot L.N. Experimental study of the influence of particle size on Minimum Explosible Concentration of sulfur dust. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104507. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104507
21. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “209-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
22. 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).

Поступила 12.02.2024, после доработки 22.02.2024;

принята к публикации 06.03.2024

Received February 12, 2024; Received in revised form February 22, 2024;

Accepted March 6, 2024

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