

Взаимосвязь эмпирических закономерностей турбулентного горения аэровзвесей

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. Рассмотрен массив известных экспериментальных данных, полученных преимущественно в стандартной камере объемом 1 м³. Это позволило представить характер трех зависимостей турбулентного горения аэровзвесей: зависимости минимального взрывоопасного содержания кислорода (МВСК) и индекса взрывоопасности K_{st} от энергии источника зажигания E_{ig} (в логарифмическом масштабе) и зависимость K_{st} от начального содержания кислорода в воздухе C_{ox} .

Эмпирические зависимости. Анализ показал, что все рассматриваемые зависимости с относительной точностью около 20 % могут быть представлены в виде линейных функций аргумента, изменяющегося в следующих пределах: E_{ig} изменяется от минимальной энергии зажигания E_{min} до 10 кДж; C_{ox} изменяется от МВСК до 21 % об. По характеру зависимости K_{st} от E_{ig} все пыли делятся на два вида. Для пыли первого вида K_{st} не зависит от E_{ig} , для пыли второго вида $K_{st} \propto (E_{ig} - E_{min})$.

Взаимосвязь эмпирических зависимостей. Показано, что рассмотренные эмпирические зависимости должны быть взаимосвязаны для пыли второго рода, а именно, наклоны C_n ($n = 1, 2$ и 3 — номер зависимости) линейных функций, аппроксимирующих данные зависимости для конкретного образца пыли, удовлетворяют соотношению: $C_2(21\% \text{ об.}) = -C_1C_3(10 \text{ кДж})$. Из-за отсутствия образца пыли, для которого имеются данные по всем трем зависимостям, полученное соотношение подтвердили для средних значений параметров: $\langle C_2(21\% \text{ об.}) \rangle = -\langle C_1 \rangle \cdot \langle C_3(10 \text{ кДж}) \rangle$.

Обсуждение результата. Удовлетворительная точность выполнения соотношения между C_1 , C_2 и C_3 порождает уверенность в объективности и взаимосвязи рассматриваемых эмпирических зависимостей турбулентного горения аэровзвесей.

Выводы. Показано, что рассмотренные эмпирические зависимости турбулентного горения аэровзвесей в камере объемом 1 м³ взаимосвязаны, и установлен вид этой связи.

Ключевые слова: пылевой взрыв; камера объемом 1 м³; минимальное взрывоопасное содержание кислорода; индекс взрывоопасности; энергия зажигания

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Взаимосвязь эмпирических закономерностей турбулентного горения аэровзвесей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 7–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.7-12

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

Relationship between empirical laws of turbulent combustion of dust/air mixtures

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. An array of known experimental data, mainly obtained in a standard 1 m³ chamber, is considered in the article. It allowed to identify the nature of three dependences of the turbulent combustion of dust, including the dependences of limited oxygen concentration (LOC) and explosive index K_{st} on the energy of ignition source E_{ig} (on a logarithmic scale) and the dependence of K_{st} on the initial oxygen content in the air C_{ox} .

Empirical dependencies. The analysis showed that all considered dependences, having a relative accuracy of about 20 % can be represented as linear functions of an argument varying within the following limits: E_{ig} varies from minimum ignition energy E_{min} to 10 kJ; C_{ox} ranges from LOC to 21 % vol. According to the nature of dependence of K_{st} on E_{ig} , all dusts are divided into two types. For the first type of dust, K_{st} does not depend on E_{ig} . For the dust of the second type, $K_{st} \propto (E_{ig} - E_{min})$.

Relationship of empirical dependencies. It is shown that the considered empirical dependencies should be interrelated for the dust of the second kind. Namely, slopes C_n ($n = 1, 2$ or 3 as the number of the dependence) of linear functions, approximating the empirical dependencies for a particular dust sample, satisfy the relationship: $C_2(21 \text{ vol. \%}) = -C_1 \cdot C_3(10 \text{ kJ})$. Due to the absence of a dust sample, for which data on all three dependencies are available, the obtained relationship was confirmed for the average values of parameters: $\langle C_2(21 \text{ vol. \%}) \rangle = -\langle C_1 \rangle \cdot \langle C_3(10 \text{ kJ}) \rangle$.

Discussion of the result. The satisfactory accuracy of the relationship between C_1 , C_2 и C_3 gives rise to the confidence in the objectivity and relationship of the considered empirical dependencies of the turbulent combustion of dust.

Conclusions. It is shown that the considered empirical dependencies of the turbulent combustion of dust in a 1 m^3 chamber are interrelated and the form of this relationship is identified.

Keywords: dust explosion; 1 m^3 chamber; limiting oxygen concentration; explosion index; ignition energy

For citation: Poletaev N.L. Relationship between empirical laws of turbulent combustion of dust/air mixtures. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):7-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.7-12 (rus).

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

Введение

Турбулентное горение аэрозвеси в камерах стандартного тестирования объемом 20 л или 1 м^3 ^{1,2} представляет весьма сложный процесс, для особенностей которого можно предложить эмпирические закономерности, но не всегда удастся найти объяснение даже на качественном уровне [1, 2]. В частности, не получило объяснения существование дисперсных материалов, для которых в камере объемом 1 м^3 наблюдается ненасыщающееся линейное снижение минимального взрывоопасного содержания кислорода (LOC, от англ. limiting oxygen concentration) с ростом энергии источника зажигания E_{ig} в логарифмическом масштабе $\varepsilon_{ig} = \log_{10}(E_{ig})$ [3]. Отсутствует объяснение возможности разделения всех пылей на два типа в зависимости от отсутствия (1-й тип) или наличия (2-й тип) сильной зависимости индекса взрывоопасности K_{st} от ε_{ig} [4]. Нет объяснения линейной зависимости K_{st} от начального содержания кислорода C_{ox} в воздухе камеры, разбавленном инертным газом [2].

Доходчивое объяснение упомянутых особенностей представляется весьма трудной задачей, решение которой целесообразно разбить на несколько этапов, к начальному из которых относится настоящая работа. Хотя перечисленные выше особенности касаются различных аспектов турбулентного горения аэрозвесей, здесь предпринята попытка обнаружить количественную связь между параметрами эмпирических описаний этих особенностей на основе известных экспериментальных данных. Поскольку результаты исследований в камере объемом 1 м^3 считаются более надежными [5–11], именно такие результаты будут использованы в первую очередь при построении эмпирических закономерностей турбулентного горения аэрозвесей.

¹ EN 14034-3:2006+A1:2011 Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds.

² ASTM E1226-19. Standard Method Explosibility Dust Clouds. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019:1-15.

1. Эмпирические зависимости

1.1 Зависимость $\text{LOC}(E_{ig})$

Примеры зависимости $\text{LOC}(E_{ig})$ для некоторых дисперсных материалов приводятся на рис. 1 [3]. Существенной особенностью графиков на рис. 1 является линейное снижение LOC с увеличением ε_{ig} во всем диапазоне значений $E_{ig} > E_{\min}$:

$$\text{LOC}(E_{ig}) = 21 + C_1[\varepsilon_{ig} - \varepsilon_{\min}(21 \text{ \%})], \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\min}(21 \text{ \%}) = \log_{10}[E_{\min}(21 \text{ \%})]$;

$C_1 < 0$ — коэффициент, постоянный для каждого конкретного образца пыли, % об.;

$E_{\min}(C_{ox})$ — минимальная энергия зажигания аэрозвеси, в общем случае, зависящая от C_{ox} , Дж.

$E_{\min}(21 \text{ \%})$ совпадает с тем значением E_{ig} , которое на графике рассматриваемой зависимости соответствует $\text{LOC} = 21 \text{ \% об.}$

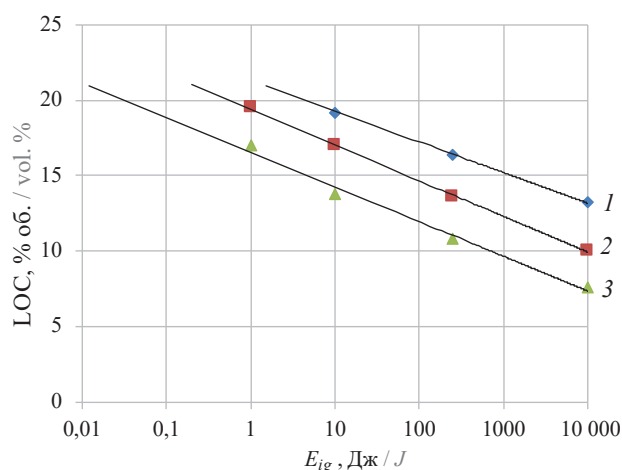


Рис. 1. Зависимость минимального взрывоопасного содержания кислорода в воздухе аэрозвеси LOC от энергии источника зажигания E_{ig} (Дж). Цветные символы — данные эксперимента в камере объемом 1 м^3 ; отрезки прямой — аппроксимации зависимостей соотношением (1); 1 — гороховая мука; 2 — ацетат целлюлозы; 3 — параформальдегид [3]

Fig. 1. Dependence of limited oxygen concentration LOC on the energy of ignition source E_{ig} (J). Symbols — experimental data (1 m^3 chamber); line segments — approximations of dependences (1); 1 — pea flour; 2 — cellulose acetate; 3 — paraformaldehyde [5]

Значения C_1 для всех трех исследованных пылей близки, что позволяет с относительной точностью $\pm 5\%$ сделать следующую оценку усредненно-го значения коэффициента $\langle C_1 \rangle \approx -2,33\%$ об.

1.2. Зависимость $K_{st}(C_{ox}, E_{ig})$

Ниже приводятся результаты раздельного исследования зависимости $K_{st}(C_{ox}, E_{ig})$ от одной из переменных при постоянстве (21 % об. и 10 кДж соответственно) другой.

1.2.1. Зависимость $K_{st}(21\%, E_{ig})$

Экспериментальными исследованиями установлено существование двух типов пыли с принципиально разными зависимостями $K_{st}(21\%, E_{ig})$ [4].

Для пыли 1-го типа K_{st} слабо зависит от E_{ig} в диапазоне $E_{ig} > E_{min}$ (рис. 2). Как правило, для такой пыли $E_{min} < 1$ Дж [4].

Для пыли 2-го типа K_{st} приблизительно пропорционален $(\varepsilon_{ig} - \varepsilon_{min})$ в диапазоне $10 \text{ кДж} > E_{ig} > E_{min}$. Примеры графиков такой зависимости для взвесей трех пылей в воздухе нормального начального (до воспламенения аэрозвеси) состава приводятся на рис. 3. Как правило, для такой пыли $E_{min} > 1$ Дж [6]. Величина E_{min} отвечает точке отрыва графика от оси E_{ig} на рис. 3.

$$K_{st}(C_{ox}, 10 \text{ кДж}) = \begin{cases} C_3(10 \text{ кДж})[C_{ox} - \text{LOC}(10 \text{ кДж})], & \text{если } C_{ox} > \text{LOC}, \\ 0, & \text{если } C_{ox} \leq \text{LOC}, \end{cases} \quad (3)$$

где C_3 и LOC — параметры, в общем случае зависящие от E_{ig} и выбора конкретного образца пыли;

$C_3(10 \text{ кДж})$, МПа·м/с (% об.), и LOC (10 кДж), % об., отвечают $E_{ig} = 10 \text{ кДж}$.

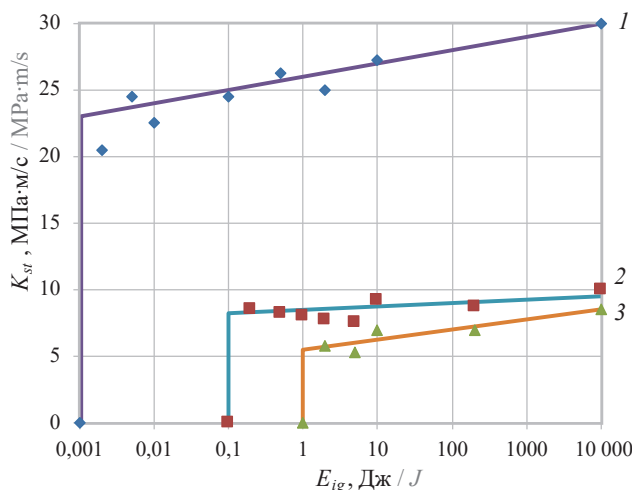


Рис. 2. Зависимость индекса взрыва K_{st} от энергии источника зажигания E_{ig} для 1-го типа пыли: цветные символы — экспериментальные данные ($C_{ox} = 21\%$ об.); отрезки ломаной прямой — аппроксимация зависимости; 1 — антиоксидант; 2 — гороховая мука; 3 — краситель [4]

Fig. 2. Dependence of explosion index K_{st} on the energy of ignition source E_{ig} for the 1st type of dust. Symbols — experimental data ($C_{ox} = 21\%$ vol.); broken line segments — dependence approximation. 1 — antioxidant; 2 — pea flour, 3 — dye [6]

Поскольку эксперименты проводились при единственном значении $C_{ox} = 21\%$ об., графики на рис. 3 аппроксимируются соотношением

$$K_{st}(21\%, E_{ig}) = \begin{cases} C_2(21\%)(\varepsilon_{ig} - \varepsilon_{min}), & \text{если } \varepsilon_{ig} > \varepsilon_{min}, \\ 0, & \text{если } \varepsilon_{ig} < \varepsilon_{min}, \end{cases} \quad (2)$$

где C_2 — коэффициент, в общем случае зависящий от C_{ox} ;

$C_2(21\%)$ является постоянным для каждого конкретного образца пыли, МПа·м/с.

Для трех образцов пыли, представленных на рис. 3, значения $C_2(21\%)$ составляют соответственно 4, 5,4 и 7,5 МПа·м/с, что позволяет с относительной точностью $\pm 30\%$ сделать следующую оценку усредненного значения коэффициента: $\langle C_2(21\%) \rangle \approx 5,6$ МПа·м/с.

1.2.2. Зависимость $K_{st}(C_{ox}, 10 \text{ кДж})$

Зависимость $K_{st}(C_{ox}, 10 \text{ кДж})$ иллюстрируется графиками (рис. 4), заимствованными из [1, 12, 13], и описывается известным эмпирическим соотношением [2]:

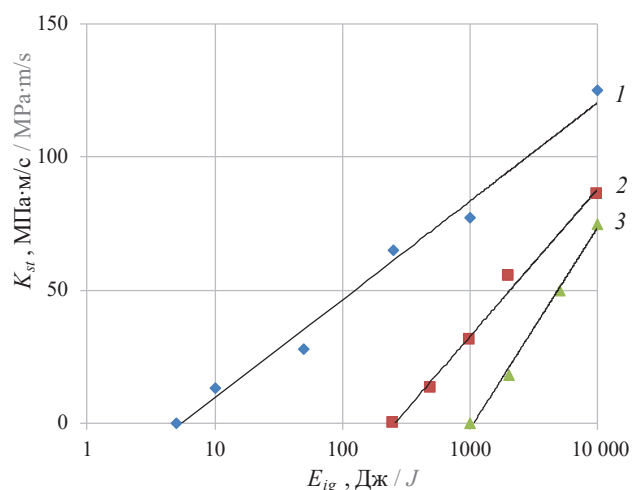


Рис. 3. Зависимость индекса взрыва K_{st} от энергии источника зажигания E_{ig} для 2-го типа пыли: цветные символы — экспериментальные данные ($C_{ox} = 21\%$ об.); отрезок прямой — аппроксимация зависимости соотношением (2); 1 — пигмент; 2, 3 — красители [4]

Fig. 3. Dependence of the explosion index K_{st} on the energy of the ignition source E_{ig} for the 2nd type of dust. Symbols — experimental data ($C_{ox} = 21\%$ vol.); segment of a straight line — approximation of dependence by relation (2); 1 — pigment; 2, 3 — dyes [4]

Для восьми образцов пыли, представленных на рис. 4, значения C_3 относятся к диапазону от 1 МПа·м/с·(% об.) до 3 МПа·м/с·(% об.). С относительной точностью $\pm 50\%$ сделать следующую оценку усредненного значения коэффициента $\langle C_3(10 \text{ кДж}) \rangle \approx 2 \text{ МПа·м/с·(% об.)}$.

Взаимосвязь эмпирических зависимостей

Эмпирические зависимости (1)–(3), построенные для случая конкретной пыли 2-го типа, являются взаимосвязанными. Несложно показать, что входящие в (1)–(3) коэффициенты связаны соотношением

$$C_2(21\%) = -C_1 C_3(10 \text{ кДж}). \quad (4)$$

Отсутствие совпадений в перечнях образцов пыли, использованных при построении графиков на рис. 1–3, не позволяет напрямую проверить справедливость (4). Для проверки (4) на качественном уровне воспользуемся усредненными значениями упомянутых коэффициентов. Пренебрегая корреляцией между значениями C_1 и C_3 для различных пылей, получим соотношение для усредненных значений коэффициентов, аналогичное соотношению (4):

$$\langle C_2(21\%) \rangle = -\langle C_1 \rangle \cdot \langle C_3(10 \text{ кДж}) \rangle. \quad (5)$$

Подставляя в (5) усредненные значения коэффициентов, несложно убедиться в выполнении этого соотношения с относительной точностью около 20 % ($5,6 \approx 2,33 \cdot 2$).

Обсуждение результата

Удовлетворительная точность выполнения (5) порождает уверенность в объективности и взаимосвязи рассматриваемых эмпирических закономерностей турбулентного горения аэровзвесей.

Необходимость в такой уверенности связана, в первую очередь, с данными, представленными на рис. 1. Согласно рис. 1 линейная зависимость $\text{LOC}(\varepsilon_{ig})$ не насыщается при $E_{ig} = 10 \text{ кДж}$. Это означает, что представленные на рис. 1 данные вызывают сомнение в возможности определить реальное значение LOC для пыли 2-го типа в камере объемом 1 м^3 и, следовательно, нуждаются в проверке. Дополнительно удивляет линейность $\text{LOC}(\varepsilon_{ig})$ во всем диапазоне значений ε_{ig} , поскольку использовались источники зажигания с различной эффективностью использования запасенной энергии [14]: для энергий, не превышающих 100 Дж, — конденсированный разряд, а в остальных случаях — факел горящего пиротехнического заряда.

Кроме того, данные исследований в камере объемом 1 м^3 (см. табл. 1–9 в [1]) не согласуются с утверждением о границе $E_{\min} \approx 1 \text{ Дж}$, разделяющей пыли двух видов.

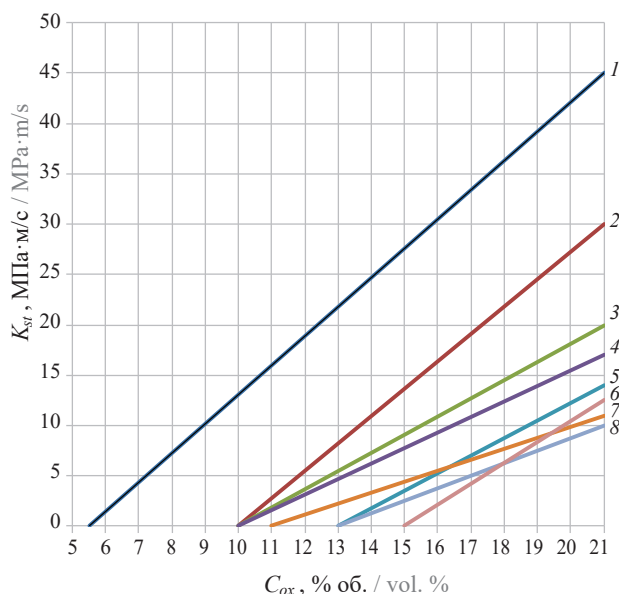


Рис. 4. Примеры сглаженных зависимостей индекса взрывоопасности K_{st} от содержания кислорода C_{ox} в воздухе, разбавленном азотом: 1 — алюминий [1]; 2 — пероксид А [1]; 3 — метилцеллюлоза [1]; 4 — пероксид В [1]; 5 — немецкий лигнит [13]; 6 — испанский лигнит [13]; 7 — бурый уголь [12]; 8 — стеарат бария [1]

Fig. 4. Examples of smoothed dependences of explosion hazard index K_{st} on oxygen content C_{ox} in the air diluted with nitrogen: 1 — aluminum [3]; 2 — peroxide A [3]; 3 — methylcellulose [3]; 4 — peroxide B [3]; 5 — German lignite [15]; 6 — Spanish lignite [15]; 7 — brown coal [14]; 8 — barium stearate [3]

Разумно полагать, что среди пылей с пониженной взрывоопасностью, которым в последние годы уделяется повышенное внимание [15–18], значительную долю будут составлять пыли 2-го вида.

Выводы

Рассмотрены известные экспериментальные данные о зависимости минимального взрывоопасного содержания кислорода в аэровзвеси от энергии зажигания и зависимости индекса взрывоопасности аэровзвесей от энергии зажигания и содержания кислорода в воздухе. Для каждой из трех зависимостей предложена эмпирическая линейная аппроксимация.

Показано, что для пыли, индекс взрывоопасности которой зависит от энергии источника зажигания, параметры аппроксимации всех трех зависимостей должны быть связаны определенным соотношением. Выполнение данного соотношения с удовлетворительной точностью подтверждается анализом использованных экспериментальных данных.

Удовлетворительная точность выполнения упомянутого соотношения порождает уверенность в объективности и взаимосвязи рассматриваемых эмпирических закономерностей турбулентного горения аэровзвесей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bartknecht W. *Explosionen, Ablauf und Schutzmaßnahmen*. Berlin, Springer-Verlag, 1980. 259 s.
2. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries* 3rd edition. Boston : Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003. 720 p.
3. Siwek R., Cesana Ch. Ignition behavior of Dusts: Meaning and interpretation // *Process Safety Progress*. 1995. Vol. 14. Issue 2. Pp. 107–119. DOI: 10.1002/PRS.680140205
4. Cesana C., Siwek R. *Operating instructions 20-l-apparatus*. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden, 2009.
5. Bagaria P., Li Q., Dastidar A., Mashuga C. Classification of particle breakage due to dust dispersion // *Powder technology*. 2019. Vol. 342. Pp. 204–213. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.089
6. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. Effect of turbulence spatial distribution on the deflagration index: Comparison between 20 L and 1 m³ // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. Vol. 71. P. 104484. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104484
7. Medina C.H., MacCoitir B., Sattar H., Slatter D.J.F., Phylaktou H.N., Andrews G.E., Gibbs B.M. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m³ dust explosion equipment // *Fuel*. 2015. Vol. 151. Pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.009
8. 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
9. 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. No. 4. Pp. 289–295. DOI: 10.1002/prs.12249
10. 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. Vol. 49. Pp. 348–356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
11. 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
12. Wiemann W. Influence of temperature and pressure on the explosion characteristics of dust/air/inert gas mixture. *Industrial Dust Explosions*, ASTM STP 958, Kenneth L. Cashdollar and Martin Hertzberg, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987. Pp. 33–44.
13. Wilén C., Moilanen A., Rautalin A., Torrent J., Conde E., Lödel R. *et al.* Safe handling of renewable fuels and fuel mixtures // VTT Technical Research Centre of Finland. ESPOO 1999 Publications 394. 125 p. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P394.pdf>
14. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences // *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1986. Pp. 303–313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3
15. Полетаев Н.Л. О взрывоопасности взрывов меламина // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 9. С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28
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. 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
18. 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

REFERENCES

1. Bartknecht W. *Explosionen, Ablauf und Schutzmaßnahmen*. Berlin, Springer-Verlag, 1980; 259. (ger).
2. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd ed. Boston, Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003; 720.
3. Siwek R., Cesana Ch. Ignition behavior of Dusts: Meaning and Interpretation. *Process Safety Progress*. 1995; 14(2):107-119. DOI: 10.1002/PRS.680140205
4. Cesana C., Siwek R. *Operating Instructions 20-l-Apparatus*. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden, 2009.

5. Bagaria P., Li Q., Dastidar A., Mashuga C. Classification of particle breakage due to dust dispersion. *Powder technology*. 2019; 342:204-213. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.089
6. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. Effect of turbulence spatial distribution on the deflagration index: Comparison between 20 L and 1 m³. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104484. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104484
7. Medina C.H., MacCoitir B., Sattar H., Slatter D.J.F., Phylaktou H.N., Andrews G.E., Gibbs B.M. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m³ dust explosion equipment. *Fuel*. 2015; 151:91-101. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.009
8. 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
9. 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
10. 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
11. 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).
12. Wiemann W. Influence of temperature and pressure on the explosion characteristics of dust/air/inert gas mixture. *Industrial Dust Explosions*, ASTM STP 958, Kenneth L. Cashdollar and Martin Hertzberg, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987; 33-44.
13. Wilén C., Moilanen A., Rautalin A., Torrent J., Conde E., Lödel R. et al. Safe handling of renewable fuels and fuel mixtures. *VTT Technical Research Centre of Finland*. ESPOO 1999 Publications 394; 125. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P394.pdf>
14. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences. *Twenty-first Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*. 1986; 303-313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3
15. 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).
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. 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
18. 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

Поступила 30.08.2021, после доработки 13.09.2021;

принята к публикации 04.10.2021

Received August 30, 2021; Received in revised form September 13, 2021;

Accepted October 4, 2021

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