

## Исследование способности жесткого пенополиуретана противостоять зажиганию искрой дуговой электросварки

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.** Производство пожарно-технической экспертизы предполагает, что искры дуговой электросварки (далее — искры) являются эффективными источниками зажигания. Однако вероятность зажигания искрой горючего материала зависит от времени контакта между ними. В данной работе экспериментально показано отсутствие зажигания искрами вертикальной гладкой стенки из горючего жесткого пенополиуретана (ППУ). Для объяснения данного факта рассчитали время контакта искры и стенки  $\tau_{int}$ , которое сравнили с оценкой минимального времени контакта  $\tau_{min}$ , необходимого для зажигания стенки.

**Образец и методика испытаний.** Воздействию искр (мощность дуги до 6 кВт, ток до 160 А) подвергался участок стенки из ППУ, расположенной на расстоянии от 0,1 до 0,15 м от дуги. Отдельный опыт продолжался до выгорания электрода.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Ни в одном из опытов воспламенить образец ППУ искрами не удалось. Искры отскакивали от образца ППУ и падали вниз. Характерные размеры застывших капель железа принадлежали диапазону от 0,2 до 3 мм.

**Оценка  $\tau_{int}$ .** Использовали модель упругого взаимодействия капли расплавленного железа с жесткой стенкой в предположении сохранения суммы потенциальной энергии капли, связанной с ее поверхностью, и кинетической энергии растекания капли при сплющивании. Наибольшее время контакта достигается для капель максимального диаметра (3 мм):  $\tau_{int} \approx 0,004$  с.

**Оценка  $\tau_{min}$ .** Использовали экспериментальное моделирование процесса, при котором воздействие капли железа на ППУ заменяли регулируемым по времени воздействием пламени деревянного цилиндра диаметром 6 мм, горящего с торца. Получили  $\tau_{min} \approx 0,3$  с. Соотношение  $\tau_{int} \ll \tau_{min}$  объясняет отсутствие воспламенения стенки из ППУ искрами дуговой электросварки.

**Выводы.** Искры дуговой электросварки диаметром до 3 мм не воспламеняют вертикальную стенку из жесткого горючего пенополиуретана при боковом соударении. Отсутствие воспламенения объясняется малым временем контакта искры со стенкой.

**Ключевые слова:** дуговой разряд; капля железа; горючий утеплитель; вероятность воспламенения; задержка зажигания

**Для цитирования:** Полетаев Н.Л. Исследование способности жесткого пенополиуретана противостоять зажиганию искрой дуговой электросварки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 14–20. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.14-20

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

## A research on rigid polyurethane foam resistibility to ignition from an electric arc welding spark

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.** A fire investigation assumes that electric arc welding sparks (hereinafter referred to as “sparks”) are effective sources of ignition. However, the spark ignition of a combustible material depends on the contact time. This work has experimentally proven that a smooth vertical wall, made of combustible rigid polyurethane

foam (PUF), is not subjected to spark ignition. To explain this fact, the author calculated the time of contact between the spark and the wall  $\tau_{int}$ , and compared it with the minimal estimated contact time  $\tau_{min}$  required to ignite the wall.

**The sample and the testing procedure.** Sparks (the arc power up to 6 kW, the current up to 160 A) reached the PUF wall located at a distance of 0.1–0.15 m from the arc. An everyone experiment was continued until the electrode was burned down.

**Research results and discussion.** Neither attempt to inflame the PUF sample by a spark was successful. Sparks bounced off the PUF sample and fell down. The characteristic dimensions of cooled iron droplets ranged from 0.2 to 3 mm.

**An evaluation of  $\tau_{int}$ .** The authors applied a model of elastic interaction between a drop of molten iron and a rigid wall, assuming that the sum of the potential energy of the drop, associated with its surface, and the kinetic energy of a spreading drop, if flattened, is conserved. The longest contact time is achieved for drops, featuring the maximum diameter of 3 mm:  $\tau_{int} \approx 0.004$  s.

**Estimation  $\tau_{min}$ .** The authors applied the experimental modeling of the process, whereby the effect of an iron drop on PUF was replaced by the time-controlled effect, produced by a wooden cylinder (6 mm in diameter), inflamed at one edge.  $\tau_{min} \approx 0.3$  s. The ratio  $\tau_{int} \ll \tau_{min}$  explains the inability of electric arc welding sparks to ignite the PUF wall.

**Conclusions.** Electric arc welding sparks, having a diameter of up to 3 mm, cannot ignite a vertical wall, made of rigid combustible polyurethane foam, in case of a side impact. The lack of ignition is explained by the short-term contact between the spark and the surface of the polyurethane foam.

**Keywords:** arc discharge; drop of iron; combustible insulation; combustion probability; ignition delay

**For citation:** Poletaev N.L. A research on rigid polyurethane foam resistibility to ignition from an electric arc welding spark. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):14-20. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.14-20 (rus).

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

## Введение

Осенью 2019 года на складе пестицидов в промышленной зоне г. Рязани произошел пожар, который привел к уничтожению имущества в крупном размере. Среди причин возникновения пожара наиболее вероятной считалось зажигание искрами дуговой электросварки горючего утеплителя — жесткого пенополиуретана, нанесенного с внутренней стороны на потолок и стены склада. Основаниями для повышенного внимания к этой причине пожара являлись, в частности, наличие внутри склада сварочного аппарата, предназначенного для проведения цикла профилактических сварочных работ вблизи стен склада на уровне около 1 м от пола, и высокая зажигающая способность искр дуговой электросварки [1]. Последняя особенность позволяла специалистам, расследовавшим упомянутый выше пожар, полагать, что зажигание стенки искрами дуговой электросварки является самым вероятным событием, что, вообще говоря, не очевидно [2], даже в рассматриваемом здесь случае горючего пенополиуретана (который нередко ингибируют для перевода в группу трудногорючих материалов [3–5]).

Следует отметить, что стандарт для определения зажигающей способности искр дуговой электросварки, представляющих капли металла с температурой, превышающей температуру плавления металла (для железа 1538 °C [6]), отсутствует. А в научных работах данная способность определяется для условий наи-

более вероятного проявления, независимо от агрегатного состояния горючего материала: твердого [7–11], гелеобразного [12, 13], жидкого [14], порошкообразного [15]. А именно небольшая проба нагретого или расплавленного (капля) металла размещается сверху слоя горючего материала, что обеспечивает максимальное время взаимодействия источника зажигания с горючим материалом.

Для рассмотренной выше причины пожара на складе взаимодействие искры с вертикальной стенкой из жесткого пенополиуретана происходит в режиме соударения с последующим рассеянием назад. В этом случае времени взаимодействия искры с горючим материалом может не хватить для обеспечения воспламенения стенки и самостоятельного распространения пламени по стенке [16].

В настоящей работе экспериментально исследована возможность зажигания вертикальной стенки из жесткого пенополиуретана искрами дуговой электросварки, а также произведена расчетная оценка времени взаимодействия искры со стенкой и экспериментальная оценка минимального времени, необходимого для зажигания стенки.

## Характеристика объекта испытаний

Исследовался образец пенополиуретана «Владипур ППУ-3017/Н30» (далее — ППУ), представляющий собой твердый материал белого цвета. ППУ имел форму параллелепипеда с размерами около 600 ×

× 600 × 100 мм. Наружная поверхность образца (сторона, с которой производится напыление утеплителя на поверхность склада) слегка волнистая. Плотность ППУ соответствует жестким пенополиуретанам (от 30 до 86 кг/м<sup>3</sup>) [17]. Согласно сопроводительной документации, образец относится к группе горючести ГЗ (нормальногорючий) и к группе воспламеняемости ВЗ (легковоспламеняемый). Образец характеризуется следующими показателями горючести [6, 17]: температура начала разложения с выделением горючих газов 230 °С; теплота сгорания 26 МДж/кг; температура самовоспламенения 440 °С.

### Процедура выполнения исследования

Техника эксперимента состояла в организации периодического дугового разряда (на расстоянии 10–15 см от геометрического центра поверхности (600 × 600 мм) образца ППУ, расположенного вертикально, при котором искры сварки воздействовали на центральную часть этой поверхности).

Для производства искр использовался сварочный аппарат инвертор Ресанта САИ-160 К мощностью 6 кВт с электродами Ресанта МР-3 диаметром от 2 до 4 мм и длиной от 350 до 450 мм. Ток дуги составлял до 150 А.

### Результаты исследований и их обсуждение

Разумно предположить, что отсутствие зажигания вызвано тем обстоятельством, что время контакта капли с образцом ППУ оказывается недостаточным для воспламенения горючего материала. Для проверки этого предположения теоретически оценили время  $\tau_{\text{int}}$  взаимодействия капли с образцом ППУ и экспериментально оценили минимальное время  $\tau_{\text{min}}$

такого взаимодействия, приводящего к устойчивому горению образца ППУ. Ниже приводятся оценки  $\tau_{\text{int}}$  и  $\tau_{\text{min}}$  и их сравнение.

### Оценка $\tau_{\text{int}}$

Рассмотрим столкновение капли расплавленного железа, движущейся горизонтально, с гладкой вертикальной стенкой из ППУ. С учетом данных стандарта ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования» скорость капель  $u$  не превышает 4 м/с, радиус капель  $r$  не превышает 1,5 мм. Как показал опыт, капли после соударения с такой стенкой отскакивают в обратную сторону без дробления на фрагменты и без заметного снижения скорости по сравнению с  $u$ .

Для оценки  $\tau_{\text{int}}$  по порядку величины рассматривается следующая упрощенная математическая модель процесса. Поверхность стенки считается недеформируемой. Форма летящей капли — сферическая, что обусловлено стремлением к минимуму площади поверхности капли и связанной с этой площадью потенциальной энергии

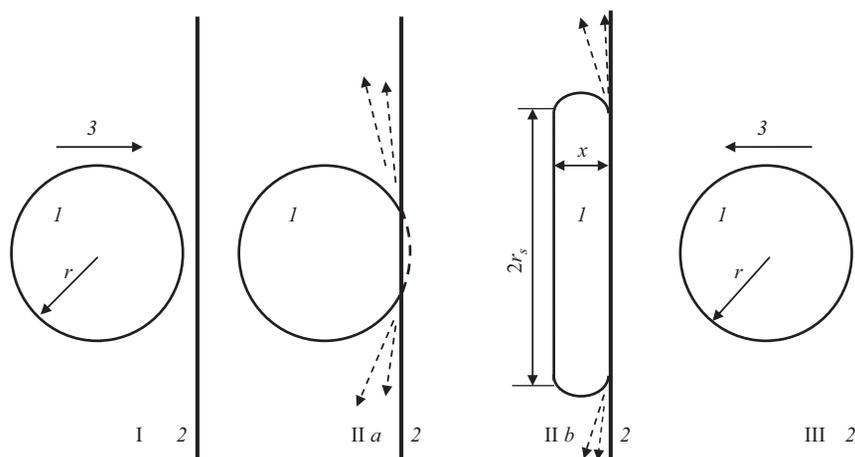
$$E_{\sigma} = s\sigma,$$

где  $s$  — площадь поверхности капли, м<sup>2</sup>; для сферической капли  $s = 4\pi r^2$ ;

$\sigma = 1,87$  Н/м — коэффициент поверхностного натяжения жидкого железа, численное значение параметра приводится для температуры плавления железа [18]. Кинетическая энергия капли составляет

$$E_u = \rho v u^2 / 2,$$

где  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup> — удельная масса капли [18];  
 $v = 4\pi r^3 / 3$  — объем капли.



**Рис. 1.** Геометрия капли  $I$  до I, во время II и после III взаимодействия со стенкой из ППУ 2; 3 — направление движения капли. I — движение капли к стенке; II — остановка капли:  $a$  — слабая деформация,  $b$  — сильная деформация; III — движение капли от стенки. Пунктирные стрелки — направления потока продуктов газификации ППУ

**Fig. 1.** The shape of the drop  $I$  before I, during II and after III interaction with the PPU wall 2; 3 — the drop direction. I — the drop travels towards the wall; II — the drop stops:  $a$  — slight deformation,  $b$  — strong deformation; III — the drop travels away from the wall. Dotted arrows indicate directions of the flow of the PPU gasification products

Будем полагать, что соударение капли со стенкой (см. рис. 1) представляет процесс перехода кинетической энергии капли в потенциальную до полной остановки капли и последующий переход потенциальной энергии в кинетическую (отскок капли от стенки). В процессе соударения капля сплющивается вплоть до фигуры, по форме, подобной плоскому диску с округлым торцом. Трением внутреннего движения жидкости в капле пренебрегается.

Величина максимальной деформации капли зависит от отношения  $E_u/E_\sigma$ , которое по порядку величины совпадает с числом Вебера [19]

$$We = \rho u^2 r / \sigma.$$

При  $We < 1$  максимальное искажение формы капли незначительно и схематично представлено на рис. 1 фрагментом II а. Пунктиром изображен сферический сегмент капли, выдавленный стенкой в объем капли. В случае  $We \gg 1$  искажение формы капли значительное и представлено на рис. 1 фрагментом II б. Паровая прослойка между поверхностью капли и стенкой не показана.

Согласно исходным данным: скорость капель от 0 до 4 м/с; радиус капель от 0,2 до 1,5 мм. В последующих численных примерах будет использоваться средняя скорость капель  $u = 2$  м/с и максимальное значение радиуса капель  $r = 1,5$  мм, как отвечающее наибольшему запасу тепловой энергии. Отсюда имеем  $We = 25 \gg 1$ , то есть реализуется случай II б на схеме рис. 1.

Для оценки  $\tau_{int}$  построим уравнение изменения параметра  $r_s$  со временем в процессе столкновения капли со стенкой. Сохранение объема капли дает условие  $\pi r_s^2 x = v$ , дифференцируя которое по времени получим соотношение

$$r'_s = (-x')(r_s/2x), \quad (1)$$

где штрих (') при переменной означает дифференцирование переменной по времени;  $r'_s$  — максимальная

скорость растекания капли-диска (на периферии);  $(-x')$  — скорость убыли толщины капли-диска.

С учетом линейной зависимости скорости растекания по стенке капли-диска от расстояния до оси диска (ввиду неразрывности радиального течения внутри капли) несложно оценить текущее значение кинетической энергии растекания капли по стенке:  $E_u = \rho v (r'_s)^2 / 4$ . Потенциальная энергия, связанная с наличием поверхности у капли, составит  $E_s = 2\pi (r_s)^2 \sigma$ . Сумма энергий постоянна

$$\rho v (r'_s)^2 / 4 + 2\pi (r_s)^2 \sigma = \text{const.}$$

Дифференцируя это соотношение по времени с учетом (1), получим уравнение, описывающее гармоническое колебание  $r''_s + 3\sigma r'_s / \rho r^3 = 0$ . Время взаимодействия капли со стенкой составляет половину периода такого колебания

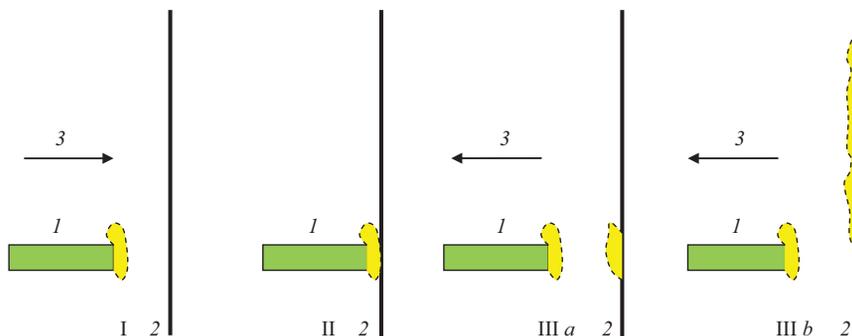
$$\tau_{int} = \pi \sqrt{\frac{\rho r^3}{6\sigma}}. \quad (2)$$

Подставляя в (2) численные значения параметров ( $r = 1,5$  мм), получим оценку  $\tau_{int} = 4 \cdot 10^{-3}$  с. Отметим, что время взаимодействия не зависит от начальной скорости капли  $u$ .

### Оценка $\tau_{min}$

Оценка  $\tau_{min}$  основывалась на предположении, что процесс зажигания стенки каплей металла (если бы он состоялся) содержит следующие последовательные этапы:

- импульсный нагрев каплей поверхности стенки с расчетной площадью порядка  $0,3 \text{ см}^2$ , тормозящийся появлением между каплей и стенкой прослойки из горючих газообразных продуктов разложения ППУ (далее — паров) [20];
- образование и зажигание (поверхностью капли) паровоздушной смеси с возникновением вспышки



**Рис. 2.** Схема взаимодействия пробного пламени деревянного цилиндра 1 со стенкой из ППУ 2; 3 — направление движения цилиндра. I — движение к стенке; II — остановка цилиндра; III — движение от стенки: а — вспышка, б — воспламенение. Цилиндр выделен светло-зеленой заливкой. Пламя выделено желтой заливкой и имеет контур, изображенный пунктиром

**Fig. 2.** The pattern of interaction between the flame of a wooden cylinder 1 with a PPU wall 2; 3 — the direction of the cylinder. I — the cylinder travels towards the wall; II — the cylinder stops; III — the cylinder travels away from the wall: a — a flash, b — ignition. The cylinder is highlighted in the light green colour. The flame is highlighted in yellow and has a dotted outline

ки, прогревающей прилегающие участки поверхности ППУ;

- эстафета распространения пламени (вспышка → свежий пар → паровоздушная смесь → вспышка смеси → свежий пар → ...) на поверхности стенки.

С учетом предложенной схемы зажигания стенки различающееся по времени воздействие капли железа на стенку экспериментально моделировалось воздействием пламени горящего с торца деревянного цилиндра диаметром 6 мм, который сначала подносили к поверхности стенки (зазор составлял около 1 мм), а затем через определенный промежуток времени удаляли (см. рис. 2).

Время воздействия пламени источника зажигания менялось с точностью около 0,1 с. Визуально регистрировалось возникновение на поверхности стенки дополнительного (к порождаемому источником зажигания) пламени и способность этого пламени распространяться вдоль стенки на расстояние, заметно превышающее поперечный масштаб источника зажигания. Отмечены два варианта результата единичного опыта: кратковременное горение без существенного распространения пламени по поверхности стенки (вспышка), горение, распространяющееся вверх по стенке на значительное расстояние (воспламенение). Переход от первого варианта ко второму осуществлялся с превышением длительностью воз-

действия пламени источника зажигания величины 0,3 с. Отсюда следует, что  $\tau_{\min} \approx 0,3$  с.

Таким образом, вышеприведенные оценки показали, что  $\tau_{\text{int}} \ll \tau_{\min}$ , чем и объясняется отсутствие воспламенения стенки из ППУ искрами дуговой электросварки.

## Выводы

Искры дуговой электросварки диаметром до 3 мм не воспламеняют вертикальную стенку из жесткого горючего пенополиуретана марки «Владипур ППУ-3017/Н30» при боковом соударении. Отсутствие воспламенения объясняется малым временем контакта искры с поверхностью пенополиуретана.

Расчетная оценка времени  $\tau_{\text{int}}$  контакта искры с поверхностью пенополиуретана при соударении дает  $4 \cdot 10^{-3}$  с. Экспериментальная оценка минимального времени контакта искры с поверхностью пенополиуретана, приводящего к возникновению пламени, распространяющегося по стенке, дает величину порядка 0,3 с, недостижимую при соударении.

Высокая зажигающая способность искр дуговой электросварки не является безусловным основанием для утверждения о высокой вероятности воспламенения такими искрами утеплителя из пенополиуретана марки «Владипур ППУ-3017/Н30», покрывавшего стены помещения склада в промышленной зоне г. Рязани, в котором осенью 2019 произошел пожар.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Статистика пожаров за 2020 год. Статистический сборник: Пожары и пожарная безопасность в 2020 году / под общ. ред. Гордиенко Д.М. М. : ВНИИПО, 2021.
2. Song Jiayun, Wang Supan, Chen Haixiang. Safety distance for preventing hot particle ignition of building insulation materials // Theoretical and Applied Mechanics Letters. 2014. Vol. 4. Issue 3. P. 034005. DOI: 10.1063/2.1403405
3. Tang Gang, Zhou Lin, Zhang Ping, Han Zhongqiang, Chen Depeng, Liu Xiuyu et al. Effect of aluminum diethylphosphinate on flame retardant and thermal properties of rigid polyurethane foam composites // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. Vol. 140. Pp. 625–636. DOI: 10.1007/s10973-019-08897-z
4. Pang Xiu-Yan, Xin Ya-Ping, Shi Xiu-Zhu, Xu Jian-Zhong. Effect of different size-modified expandable graphite and ammonium polyphosphate on the flame retardancy, thermal stability, physical, and mechanical properties of rigid polyurethane foam // Polymer Engineering & Science. 2019. Vol. 59. Issue 7. Pp. 1381–1394. DOI: 10.1002/pen.25123
5. Zheng Xiaorui, Wang Guojian, Xu Wei. Roles of organically-modified montmorillonite and phosphorous flame retardant during the combustion of rigid polyurethane foam // Polymer Degradation and Stability. 2014. Vol. 101. Pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2014.01.015
6. Haynes W.M. CRC handbook of chemistry and physics. 95ed. CRC Press, 2014. Pp. 3–516.
7. Wang Supan, Chen Haixiang, Zhang Linhe. Thermal decomposition kinetics of rigid polyurethane foam and ignition risk by a hot particle // Journal of Applied Polymer Science. 2013. Vol. 131. Issue 4. DOI: 10.1002/app.39359
8. Urban J.L. Spot ignition of natural fuels by hot metal particles : doctor of Philosophy in Engineering. Mechanical Engineering in the Graduate Division of the University of California, Berkeley, 2017. 66 p.
9. Urban J.L., Zak C.D., Song J., Fernandez-Pello C. Smoldering spot ignition of natural fuels by a hot metal particle // Proceedings of the Combustion Institute. 2017. Vol. 36. Issue 2. Pp. 3211–3218. DOI: 10.1016/j.proci.2016.09.014

10. Urban J.L., Zak C.D., Fernandez-Pello C. Spot fire ignition of natural fuels by hot aluminum particles // *Fire Technology*. 2018. DOI: 10.1007/s10694-018-0712-4
11. Wang Supan, Zhang Yu, Huang Xinyan. Ignition of EPS foam by a hot moving hollow particle: Threshold, auto-ignition, and fire point // *Combustion and Flame*. 2021. Vol. 232. P. 111524. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111524
12. Glushkov D.O., Kosintsev A.G., Kuznetsov G.V., Vysokomorny V.S. Experimental research and numerical simulation of gel fuel ignition by a hot particle // *Fuel*. 2021. Vol. 291. P. 120172. DOI:10.1016/j.fuel.2021.120172
13. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Taburchinov R.I. Numerical simulation of gel fuel gas-phase ignition by a local source of limited heat content // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 163. Pp. 44–53. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.11.050
14. Glushkov D.O., Legros J.-C., Strizhak P.A., Zakharevich A.V. Experimental and numerical study of heat transfer and oxidation reaction during ignition of diesel fuel by a hot particle // *Fuel*. 2016. Vol. 175. Pp. 105–115. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.02.042
15. Shi Xueqiang, Zhang Yutao, Chen Xiaokun, Zhang Yuanbo, Ma Qian. Characteristics of coal dust ignited by a hot particle // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 153. Pp. 225–238. DOI: 10.1016/j.psep.2021.07.021
16. Clay R., Keivens K., Carmignani L., Bhattacharjee S. Ignition of solid fuels: A new approach to study the time delay // 11th U.S. National Combustion Meeting Organized by the Western States Section of the Combustion Institute, March 24–27, 2019. Pasadena, California, 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/332182312>
17. Günther M., Lorenzetti A., Schartel B. Fire phenomena of rigid polyurethane foams // *Polymers*. 2018. Vol. 10. Issue 10. P. 1166. DOI: 10.3390/polym10101166
18. Wille G., Millot F., Rifflet J.C. Thermophysical properties of containerless liquid iron up to 2500 K // *International Journal of Thermophysics*. 2002. Vol. 23. No. 5. Pp. 1197–1206. DOI: 10.1023/a:1019888119614
19. Riboux G., Gordillo J.M. Maximum drop radius and critical Weber number for splashing in the dynamical Leidenfrost regime // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 803. Pp. 516–527. DOI: 10.1017/jfm.2016.496
20. Yang Jiuling, Wang Supan, Chen Haixiang. Effect of interface thermal resistance on ignition of reactive material by a hot particle // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 97. Pp. 146–156. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.070

## REFERENCES

1. *Fires and Fire Safety in 2020*. D.M. Gordienko (ed.). Moscow, VNIPO, 2021. (rus).
2. Song Jiayun, Wang Supan, Chen Haixiang. Safety distance for preventing hot particle ignition of building insulation materials. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2014; 4(3):034005. DOI: 10.1063/2.1403405
3. Tang Gang, Zhou Lin, Zhang Ping, Han Zhongqiang, Chen Depeng, Liu Xiuyu et al. Effect of aluminum diethylphosphinate on flame retardant and thermal properties of rigid polyurethane foam composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020; 140:625-636. DOI: 10.1007/s10973-019-08897-z
4. Pang Xiu-Yan, Xin Ya-Ping, Shi Xiu-Zhu, Xu Jian-Zhong. Effect of different size-modified expandable graphite and ammonium polyphosphate on the flame retardancy, thermal stability, physical, and mechanical properties of rigid polyurethane foam. *Polymer Engineering & Science*. 2019; 59(7):1381-1394. DOI: 10.1002/pen.25123
5. Zheng Xiaorui, Wang Guojian, Xu Wei. Roles of organically-modified montmorillonite and phosphorous flame retardant during the combustion of rigid polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*. 2014; 101:32-39. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.015
6. Haynes W.M. CRC handbook of chemistry and physics. 95ed. CRC Press, 2014; 3-516.
7. Wang Supan, Chen Haixiang, Zhang Linhe. Thermal decomposition kinetics of rigid polyurethane foam and ignition risk by a hot particle. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013; 131:4. DOI: 10.1002/app.39359
8. Urban J.L. *Spot ignition of natural fuels by hot metal particles : doctor of Philosophy in Engineering*. Mechanical Engineering in the Graduate Division of the University of California, Berkeley, 2017; 66.

9. Urban J.L., Zak C.D., Song J., Fernandez-Pello C. Smoldering spot ignition of natural fuels by a hot metal particle. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017; 36(2):3211-3218. DOI: 10.1016/j.proci.2016.09.014
10. Urban J.L., Zak C.D., Fernandez-Pello C. Spot fire ignition of natural fuels by hot aluminum particles. *Fire Technology*. 2018. DOI: 10.1007/s10694-018-0712-4
11. Wang Supan, Zhang Yu, Huang Xinyan. Ignition of EPS foam by a hot moving hollow particle: Threshold, auto-ignition, and fire point. *Combustion and Flame*. 2021; 232: 111524. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111524
12. Glushkov D.O., Kosintsev A.G., Kuznetsov G.V., Vysokomorny V.S. Experimental research and numerical simulation of gel fuel ignition by a hot particle. *Fuel*. 2021; 291:120172. DOI:10.1016/j.fuel.2021.120172
13. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Taburchinov R.I. Numerical simulation of gel fuel gas-phase ignition by a local source of limited heat content. *Acta Astronautica*. 2019; 163:44-53. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.11.050
14. Glushkov D.O., Legros J.-C., Strizhak P.A., Zakharevich A.V. Experimental and numerical study of heat transfer and oxidation reaction during ignition of diesel fuel by a hot particle. *Fuel*. 2016; 175:105-115. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.02.042
15. Shi Xueqiang, Zhang Yutao, Chen Xiaokun, Zhang Yuanbo, Ma Qian. Characteristics of coal dust ignited by a hot particle. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 153:225-238. DOI: 10.1016/j.psep.2021.07.021
16. Clay R., Keivens K., Carmignani L., Bhattacharjee S. Ignition of solid fuels: A new approach to study the time delay. *11th U.S. National Combustion Meeting Organized by the Western States Section of the Combustion Institute, March 24–27, 2019*. Pasadena, California, 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/332182312>
17. Günther M., Lorenzetti A., Schartel B. Fire phenomena of rigid polyurethane foams. *Polymers*. 2018; 10(10):1166. DOI: 10.3390/polym10101166
18. Wille G., Millot F., Rifflet J.C. Thermophysical properties of containerless liquid iron up to 2500 K. *International Journal of Thermophysics*. 2002; 23(5):1197-1206. DOI: 10.1023/a:1019888119614
19. Riboux G., Gordillo J.M. Maximum drop radius and critical Weber number for splashing in the dynamical Leidenfrost regime. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016; 803:516-527. DOI: 10.1017/jfm.2016.496
20. Yang Jiuling, Wang Supan, Chen Haixiang. Effect of interface thermal resistance on ignition of reactive material by a hot particle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 97:146-156. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.070

*Поступила 17.12.2021, после доработки 10.01.2022; принята к публикации 17.01.2022*  
*Received December 17, 2021; Received in revised form January 10, 2022; Accepted January 17, 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