

## Об оценке взрывоопасности ядерного графита в 1-м<sup>3</sup> камере

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.** Ядерный графит представляет угрозу образования взрывоопасной смеси пыли графита (АПГ) при демонтаже вышедших из эксплуатации ядерных реакторов. В то же время нет ясного ответа на вопрос о взрывоопасности АПГ. Согласно обзору международных исследований, взрывоопасность АПГ либо отсутствует, либо слабо выражена (Phylaktou H.N. и др., 2015). В настоящей работе приводятся аргументы в пользу мнения о взрывобезопасности АПГ.

**Выбранный результат исследования.** Рассматривался известный результат исследования горения АПГ со средним размером частиц 5 мкм и концентрацией около 450 г/м<sup>3</sup> в камере объемом 1,138 м<sup>3</sup> с источником зажигания фирмы Fr. Sobbe GmbH («Sobbe 10 kJ»). Максимальное избыточное давление  $\Delta P_{\max}$  в камере составило 0,47 бар, что в соответствии с EN 14034-3 отвечает случаю взрывоопасной взрывоопасности (1 бар = 100 кПа).

**Интерпретация результата исследования.** Проведено сравнение осциллограмм давления для двух случаев: случая максимального проявления взрывоопасности АПГ ( $\Delta P_{\max} = 0,47$  бар;  $dP/dt|_{\max} = 3,8$  бар/с) и случая срабатывания источника зажигания в отсутствие взрывоопасности ( $\Delta P_{\max} = 0,027$  бар;  $dP/dt|_{\max} = 2,7$  бар/с). Сопоставление показало, что первые 20 мс изменения давления в камере обусловлены, в основном, горением источника зажигания: характерные значения  $\Delta P = 0,03$  бар и  $(dP/dt) \approx 3,8$  бар/с близки к показателям горения «Sobbe 10 kJ» в отсутствие АПГ. Дальнейшее увеличение  $\Delta P$  происходит при постоянном или резко убывающем значении  $(dP/dt)$ , что означает монотонное снижение скорости пламени и выявляет негорючесть АПГ.

**Выводы.** Ввиду малости  $\Delta P_{\max}$  рассмотренную АПГ возможно считать взрывобезопасной при нормальных атмосферных условиях. Графики зависимостей давления продуктов горения и скорости его нарастания от времени являются важными сведениями о горении взрывоопасности в взрывных камерах при низкой взрывоопасности пыли.

**Ключевые слова:** пыль графита; взрывоопасность; взрыв; осциллограмма давления; снижение скорости пламени

**Для цитирования:** Полетаев Н.Л. Оценка взрывоопасности ядерного графита в 1-м<sup>3</sup> камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 15–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21

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

## Explosibility of nuclear graphite measured in a 1 m<sup>3</sup> chamber

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.** Nuclear graphite poses a threat due to the formation of the graphite dust – air mixture (GDAM) during the dismantling of decommissioned nuclear reactors. However, there is no clear answer to the question on the GDAM explosibility. A review of international studies suggests that GDAM is either inexplorable or its explosibility is weak (Phylaktou H.N. et al., 2015). In this paper, the authors advance arguments for the explosion safety of GDAM.

**Selected research result.** The authors considered a well-known result of a study on the combustion of GDAM with an average particle size of 5 μm, the concentration of about 450 g/m<sup>3</sup> in a 1.138 m<sup>3</sup> chamber, and an ignition

source made by Fr. Sobbe GmbH ("Sobbe 10 kJ"). The maximum overpressure  $\Delta P_{\max}$  was 0.47 bar in the chamber, and it fitted the case of an explosive air suspension, according to EN 14034-3 (1 bar = 100 kPa).

**Interpretation of the research result.** Pressure oscillograms were compared for the following two cases: the case of the maximum manifestation of the GDAM explosion hazard ( $\Delta P_{\max} = 0.47$  bar;  $dP/dt|_{\max} = 3.8$  bar/s) and the case of combustion of an ignition source in the absence of air suspension ( $\Delta P_{\max} = 0.027$  bar;  $dP/dt|_{\max} = 2.7$  bar/s). The comparison shows that the first 20 ms of a pressure change inside the chamber is mainly due to the combustion of the ignition source: the characteristic values  $\Delta P = 0.03$  bar and  $(dP/dt) \approx 3.8$  bar/s are close to the "Sobbe 10kJ" combustion index in the absence of GDAM. A further increase in  $\Delta P$  is accompanied by the constant or sharply decreasing value of  $(dP/dt)$ , which means a monotonous decrease in the flame velocity and proves the incombustibility of GDAM.

**Conclusions.** Due to the smallness of  $\Delta P_{\max}$ , GDAM can be considered nonexplosive under normal atmospheric conditions. Dependency diagrams, relating the pressure of combustion products and its growth to time offer important information about the combustion of the air suspension in explosion chambers under the condition of a low dust explosion hazard.

**Keywords:** graphite dust; air suspension; explosion; pressure oscillogram; flame velocity reduction

**For citation:** Poletaev N.L. Explosibility of nuclear graphite measured in a 1 m<sup>3</sup> chamber. *Pozharovzryvobezopasnost'/ Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):15-21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21 (rus).

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

## Введение

Эксплуатация ядерных реакторов с замедлителями из материала, получившего наименование ядерного графита (далее — графита), сопровождается образованием большого количества мелкодисперсной пыли графита [1]. Этот материал представляет угрозу образования взрывов пыли графита (далее — АПГ) при демонтаже вышедших из эксплуатации ядерных реакторов, что с необходимостью требует ясного ответа на вопрос о взрывоопасности АПГ. В то же время данные о взрывоопасности АПГ имеют противоречивый характер из-за существенного различия результатов тестирования данной пыли в разномасштабных камерах и несогласованности количественного критерия взрывоопасности пыли между национальными нормами. В частности, избыточное давление взрыва АПГ при стандартном исследовании в 20-литровой взрывной камере может превысить 500 кПа [1–4], а во взрывной камере объемом 1 м<sup>3</sup> избыточное давление взрыва АПГ не поднимается выше 50 кПа<sup>1,2</sup> [5]. Согласно классификации [6], АПГ демонстрирует принадлежность к взрывовзвесям с низкой взрывоопасностью, которым в последнее время стали уделять повышенное внимание [7–10].

Всестороннему изучению горючести и взрывоопасности графита посвящен многолетний цикл работ исследователей из различных стран, выводы которых обобщены в отчете [11]. Некоторые из этих выводов проанализированы в [12], где предлагается для объективной оценки взрывоопасности АПГ использовать результаты испытаний в 1-м<sup>3</sup> камере. По-

следнее объясняется завышением взрывоопасности АПГ в маломасштабной камере из-за энергоемкого источника зажигания (эффектом «overdrive») [13, 14].

Основной вывод авторов [11, 12] сводится к выражению «АПГ либо взрывобезопасна, либо взрывоопасность АПГ слабо выражена». Предположение о слабовыраженной взрывоопасности АПГ основывается на результатах стандартного исследования АПГ в 1-м<sup>3</sup> камере и определении взрывоопасности взрывовзвеси по Европейским нормам EN 14034-3:2006+A1:2011. Согласно этому определению, взрывовзесь взрывоопасна, если избыточное давление продуктов горения в 1-м<sup>3</sup> камере превышает критическое значение  $P_{cr} = 30$  кПа, что имеет место для АПГ. Сомнения авторов [11, 12] можно понять, если принять во внимание требование американского стандарта ASTM E1226-2012a, согласно которому  $P_{cr} = 100$  кПа и АПГ следует признать взрывобезопасной.

С целью получения дополнительных аргументов для вывода о взрывобезопасности АПГ, исследованной в 1-м<sup>3</sup> камере, в настоящей работе приводится более тщательный анализ информации о результате данного исследования, изложенном в [11]. Для этого проводится сопоставление случая максимального проявления взрывоопасности АПГ со случаем срабатывания источника зажигания в отсутствие взрывовзвеси.

## Выбранный результат исследования [13]

В [11] представлена информация о тестировании взрывоопасности АПГ в квазисферической камере объемом 1,138 м<sup>3</sup>. Исследовался свежий (не подвергавшийся облучению нейтронами) графит. Фракция графита с размером частиц менее 10 мкм составляла 90 % (масс.), средний размер частиц равнялся 5 мкм. В качестве источника зажигания использовался пи-

<sup>1</sup> Graphite decommissioning: Options for graphite treatment, recycling, or disposal, including a discussion of safety-related issues. EPRI, Palo Alto, CA, 2006. P. 1013091.

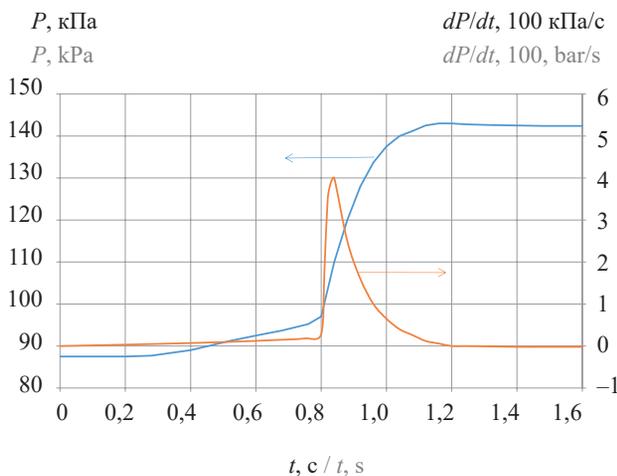
<sup>2</sup> GESTIS-DUST-EX: compiled by IFA (Institut fuer Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung), as of 2021. URL: <http://staubex.ifa.dguv.de/explosuche.aspx>

ротехнический заряд фирмы Fr. Sobbe GmbH [6] с запасом энергии 10 кДж (далее — «Sobbe 10 кДж»). Скачок давления от срабатывания такого источника зажигания в отсутствие пыли составлял  $\Delta P_{ig} = 2,7$  кПа.

Ниже будут рассматриваться сглаженные графики эволюции абсолютного давления  $P(t)$  и производной ( $dP/dt$ ) для случая концентрации пыли  $0,45$  кг/м<sup>3</sup>, при которой в стандартном испытании достигалось максимальное значение  $P = 147$  кПа (рисунок). Присутствие пульсаций на реальных графиках с периодом около  $3,5$  мс позволяет с хорошей точностью определять моменты событий, характеризующих процесс в камере.

Согласно данным рисунка, начало выгорания источника зажигания отвечает моменту времени  $0,8$  с, начиная с которого происходит резкий рост как давления  $P$  в камере, так и его производной  $dP/dt$ . Для простоты: данный момент будет являться началом отсчета времени наступления последующих событий, а отвечающее этому моменту давление в камере ( $97$  кПа) будет являться началом отсчета изменения давления  $\Delta P$ , вызванного горением источника зажигания и графитовой пыли.

Для выбранных отсчетов времени  $t$  и изменения давления  $\Delta P$  получим следующую информацию о процессе в камере. Максимальное значение  $(dP/dt)_{max} = 3,8$  бар/с достигается через  $20$  мс и удерживается до  $40$  мс, после чего монотонно уменьшается до нуля к моменту  $400$  мс, когда достигается наибольшее значение скачка давления. Изменение давления  $\Delta P$  в камере для выделенных выше момен-



Сглаженные зависимости абсолютного давления  $P$  и его производной  $dP/dt$  от времени  $t$  для концентрации графита  $450$  г/м<sup>3</sup> и энергии источника зажигания  $10$  кДж во взрывной камере объемом  $1,138$  м<sup>3</sup> ( $1$  бар =  $100$  кПа) [11]

Smoothed dependences of absolute pressure  $P$  and its derivative  $dP/dt$  on time  $t$  for the graphite concentration of  $450$  g/m<sup>3</sup> and the ignition source energy of  $10$  kJ ( $1$  bar =  $100$  kPa) in a  $1.138$  m<sup>3</sup> explosion chamber [11]

тов времени  $20$ ,  $40$  и  $400$  мс составляет соответственно  $3$ ,  $8$  и  $46$  кПа.

### Интерпретация результата исследования [13]

Для интерпретации перечисленных характеристик тестирования АПГ необходимы сведения об эволюции давления в камере  $P_{ig}(t)$  для случая срабатывания «Sobbe 10 кДж» в отсутствие горючей пыли: продолжительность выгорания источника зажигания  $\tau_{ig}$  и максимальное значение  $(dP_{ig}/dt)_{max}$ . Поскольку такая информация в [11, 12] отсутствовала, воспользуемся сведениями из [15]. В этой работе исследована зависимость  $P_{ig}(t)$  в  $1$ -м<sup>3</sup> камере с источником зажигания «Sobbe 10 кДж» и получены следующие результаты:  $\tau_{ig} \approx 20$  мс,  $(dP_{ig}/dt)_{max} \approx 2\Delta P_{ig}/\tau_{ig}$ .

Возвращаясь к интерпретации приведенных выше результатов тестирования АПГ в камере объемом  $1,138$  м<sup>3</sup>, имеем возможность утверждать, что первые  $20$  мс изменения  $\Delta P$  обусловлены в основном горением источника зажигания. Характерные значения  $\Delta P = 3$  кПа и  $dP/dt = 3,8$  бар/с близки к показателям горения «Sobbe 10 кДж» в отсутствие АПГ:  $\Delta P_{ig} = 2,7$  кПа и  $2,7$  бар/с соответственно.

Изменение  $\Delta P$  за время с  $20$  до  $40$  мс обусловлено распространением горения по АПГ с затухающей скоростью. Вывод о снижении скорости на этом промежутке времени основан на имеющем место постоянстве параметра  $(dP/dt) \approx 3,8$  бар/с. Действительно, на начальном этапе распространение сферического пламени с постоянной скоростью в замкнутом объеме должно приводить к быстрому росту  $(dP/dt) \propto t^2$  [16], что не наблюдается.

По аналогии с объяснением из предыдущего абзаца изменение  $\Delta P$  за время с  $40$  до  $400$  мс также обусловлено распространением горения по АПГ с быстро затухающей скоростью ввиду резкого снижения параметра  $(dP/dt)$  с  $3,8$  бар/с до  $0$ .

Таким образом, общий скачок давления в камере ( $47$  кПа) обусловлен выгоранием АПГ с монотонно затухающей скоростью распространения пламени, что свидетельствует о негорючести АПГ. Первоначально возникшее пламя в АПГ затухает, не достигнув (ввиду малого скачка давления) стенки камеры. Последнее подтверждают оценки положения границы пламени в предположении сферической симметрии распространения и дополнительные опыты [11] по слежению за положением пламени с помощью гребенки термомпар.

Поскольку затухание пламени наблюдалось уже при незначительном подъеме давления в камере ( $3$ – $8$  кПа), разумно предполагать негорючесть АПГ при нормальных условиях (давлении  $100$  кПа, температуре  $25$  °С). Последнее подтверж-

дают неудачные попытки реализовать горение АПГ в полукрытой трубе, предпринимавшиеся в [11].

### Обсуждение полученных результатов

Согласно изложенной выше интерпретации результата тестирования АПГ в камере объемом 1,138 м<sup>3</sup> с источником зажигания «Sobbe 10 кДж», АПГ не распространяет горение при нормальных условиях. Данный факт может показаться удивительным, поскольку химический состав графита близок к химическому составу углей с низким содержанием летучих (антрацитов), взрывобезопасность которых в условиях *подземной* добычи хорошо известна<sup>3</sup>. Удивляет, однако, многократное (в 6 раз) отличие максимального значения скачка давления  $\Delta P_{cp} = (\Delta P_{max} - \Delta P_{ig})$  продуктов горения графита и продуктов горения антрацита, также исследованного в крупномасштабной камере (см. таблицу).

Высокие (порядка 50 кПа) значения  $\Delta P_{cp}$ , не связанные с характерной для аэрозвесей макроскопической неоднородностью распределения частиц горючего в пылевоздушном облаке (вблизи концентрационного предела распространения пламени), не являются частыми событиями в крупномасштабных испытаниях. Такое иногда случается вблизи границы «взрывается/не взрывается» по какому-либо влиятельному параметру испытаний. В частности, значения  $\Delta P_{cp} \approx 50$  кПа наблюдались в 1-м<sup>3</sup> взрывной камере при исследовании взрывоопасности пыли испанского лигнита, когда содержание кислорода в аэрозвеси оказалось на 0,5 % (об.) ниже значения показателя «минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК)» [18].

<sup>3</sup> Graphite decommissioning: Options for graphite treatment, recycling, or disposal, including a discussion of safety-related issues. EPRI, Palo Alto, CA, 2006. P. 1013091.

Параметры тестирования графита [11] и антрацита [17]

Test parameters for graphite [11] and anthracite [17]

Дисперсный материал Dispersed material	Средний размер частиц, мкм Average particle size, $\mu\text{m}$	Концентрация пыли, кг/м <sup>3</sup> Dust concentration, kg/m <sup>3</sup>	Объем взрывной камеры, м <sup>3</sup> Explosion chamber dimensions, m <sup>3</sup>	Энергия источника зажигания, кДж Ignition source energy, kJ	$\Delta P_{cp}$ , кПа $\Delta P_{av}$ , kPa
Графит Graphite	5	0,435	1,138	10	44
Антрацит Anthracite	40	1,0	1	10	7
Антрацит Anthracite	40	1,0	1	30	20

В случае графита параметром, характеризующим приближение/удаление от упомянутой выше границы, может выступить размер частиц. Следуя [19], разумно полагать, что для любого горючего дисперсного материала существует масштаб измельчения (вплоть до размеров, сопоставимых с молекулярными), начиная с которого аэрозвесь такого материала становится взрывоопасной. Авторы [11] на основании исследований продуктов горения образцов графита с различным распределением частиц по размерам высказали предположение, что частицы графита с размером более 5...6 мкм не участвуют в процессе распространения пламени. Данное предположение не противоречит результатам настоящей работы.

### Выводы

Выполнен анализ известных результатов тестирования взрывоопасности аэрозвеси пыли ядерного графита [11] в квазисферической камере объемом 1,138 м<sup>3</sup>. В рамках данного анализа использовались записи зависимостей давления и скорости его нарастания от времени. На основе таких записей проводилось сопоставление случая максимального проявления взрывоопасности пыли ядерного графита со случаем срабатывания 10 кДж источника зажигания в отсутствие аэрозвеси.

Показано, что инициированное источником зажигания горение графита происходит в режиме распространения пламени с монотонно убывающей скоростью. В связи с этим исследованную аэрозвесь ядерного графита с размером частиц, в основном, от 2 до 10 мкм следует считать взрывобезопасной при нормальных атмосферных условиях (давлении 100 кПа, температуре 25 °С).

Разумно полагать, что размер взрывоопасных частиц графита (т.е. способных распространять пламя в состоянии аэрозвеси при нормальных атмосферных условиях) меньше 5 мкм.

Данная работа показывает, что графики эволюции давления продуктов горения и скорости его нарастания являются наиболее информативными сведениями о горении аэрозвеси во взрывных камерах, особенно в случае низкой взрывоопасности пыли.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Turkevich L.A., Dastidar A.G., Hachmeister Z., Lim M.* Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: Explosion parameters of selected materials // *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 295. Pp. 97–103. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.03.069
2. *Turkevich L.A., Fernback J., Dastidar A.G., Osterberg P.* Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: screening of allotropes // *Combustion and Flame*. 2016. Vol. 167. Pp. 218–227. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.02.010
3. *Sha D., Li Yu., Zhou X., Zhang J., Zhang H., Yu J.* Influence of volatile content on the explosion characteristics of coal dust // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6. Issue 41. Pp. 27150–2715. DOI: 10.1021/acsomega.1c03803
4. *Santandrea A., Pacault S., Perrin L., Vignes A., Dufaud O.* Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103942. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103942
5. *Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al.* Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben // *SFTReport*. 1979. No. 2.2. 100 s.
6. *Полемаев 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
7. *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 m<sup>3</sup> test chambers // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
8. *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 m<sup>3</sup> chambers // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
9. *Полемаев Н.Л.* О взрывоопасности аэрозвеси меламина // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 9. С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28
10. *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
11. Graphite dust deflagration: A review of international data with particular reference to the decommissioning of graphite moderated reactors. EPRI, Palo Alto, CA, 2007. P. 1014797.
12. *Phylaktou H.N., Andrews G.E., Mkpadi M., Willacy S., Wickham A.J.* The explosibility of graphite powder; the effects of ignition energy, graphite concentration and graphite age // 16th International Nuclear Graphite Specialists Meeting, 13–17 Sept 2015, Nottingham. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/281862384>
13. *Mintz K.J.* Problems in experimental measurements of dust explosions // *Journal of Hazardous Materials*. 1995. Vol. 42. Issue 2. Pp. 177–186. DOI: 10.1016/0304-3894(95)00011-i
14. *Proust Ch., Accorsi A., Dupont L.* Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard «ISO 1m<sup>3</sup> vessel». Systematic comparison and analysis of the discrepancies // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007. Vol. 20. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/J.JLP.2007.04.032
15. *Zhen G., Leuckel W.* Effects of ignitors and turbulence on dust explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1997. Vol. 10. Issue 5–6. Pp. 317–324. DOI: 10.1016/S0950-4230(97)00021-1
16. *Pu Y.K., Jia F., Wang S.F., Skjold T.* Determination of the maximum effective burning velocity of dust–air mixtures in constant volume combustion // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007. Vol. 20. Issue 4–6. Pp. 462–469. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.036
17. *Cashdollar K.L., Chatrathi K.* Minimum explosible dust concentrations measured in 20-L and 1-m<sup>3</sup> chambers // *Combustion Science and Technology*. 1993. Vol. 87. Issue 1–6. Pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213

18. Поletaев 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. 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 Publ., 1999. Vol. 394. 125 p. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P394.pdf>

## REFERENCES

1. Turkevich L.A., Dastidar A.G., Hachmeister Z., Lim M. Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: Explosion parameters of selected materials. *Journal of Hazardous Materials*. 2015; 295:97-103. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.03.069
2. Turkevich L.A., Fernback J., Dastidar A.G., Osterberg P. Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: screening of allotropes. *Combustion and Flame*. 2016; 167:218-227. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.02.010
3. Sha D., Li Yu., Zhou X., Zhang J., Zhang H., Yu J. Influence of volatile content on the explosion characteristics of coal dust. *ACS Omega*. 2021; 6(41):27150-2715. DOI: 10.1021/acsomega.1c03803
4. Santandrea A., Pacault S., Perrin L., Vignes A., Dufaud O. Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103942. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103942
5. Scholl E.W., Reeh D., Wiemann W. et al. Brenn- und Explosions — Kenngrößen von Stäuben. *SFTReport*. 1979; 2.2:100. (ger).
6. Poletaev N.L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(6):5-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20 (rus).
7. 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 m<sup>3</sup> test chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
8. 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 m<sup>3</sup> chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
9. Poletaev N.L. On explosibility of melamine dust/air mixture. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(9):15-28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28 (rus).
10. 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
11. *Graphite dust deflagration: A review of international data with particular reference to the decommissioning of graphite moderated reactors*. EPRI, Palo Alto, CA, 2007; 1014797.
12. Phylaktou H.N., Andrews G.E., Mkpadi M., Willacy S., Wickham A.J. The explosibility of graphite powder; the effects of ignition energy, graphite concentration and graphite age. *16th International Nuclear Graphite Specialists Meeting, 13–17 Sept 2015, Nottingham*. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/281862384>
13. Mintz K.J. Problems in experimental measurements of dust explosions. *Journal of Hazardous Materials*. 1995; 42(2):177-186. DOI: 10.1016/0304-3894(95)00011-i
14. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1m<sup>3</sup> vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20:599-606. DOI: 10.1016/J.JLP.2007.04.032
15. Zhen G., Leuckel W. Effects of ignitors and turbulence on dust explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1997; 10(5-6):317-324. DOI: 10.1016/S0950-4230(97)00021-1
16. Pu Y.K., Jia F., Wang S.F., Skjold T. Determination of the maximum effective burning velocity of dust-air mixtures in constant volume combustion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20(4-6):462-469. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.036
17. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum explosible dust concentrations measured in 20-L and 1-m<sup>3</sup> chambers. *Combustion Science and Technology*. 1993; 87(1-6):157-171. DOI: 10.1080/001022092-08947213
18. Poletaev N.L. Experiment-calculated estimating of the maximum particle size of explosive mono-disperse dust-air mixture. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(9):15-26. DOI: 10.18322/PVB.2014.23.09.15-26 (rus).

19. 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 Publ., 1999; 394:125. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P394.pdf>

*Поступила 16.02.2022, после доработки 14.03.2022;  
принята к публикации 29.03.2022*

*Received February 16, 2022; Received in revised form March 14, 2022;  
Accepted March 29, 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](mailto: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](mailto:nlpvniipo@mail.ru)