

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 23–29

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(5):23-29

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 536.46

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.23-29>

Изменение температуры воздуха в 20-литровой камере при добавлении воздуха из ресивера

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, Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. К одной из причин завышения взрывоопасности пыли в камере объемом (20 ± 2) л относится повышенная начальная температура аэрозвеси. Существенный вклад в увеличение начальной температуры вносит процедура наполнения предварительно откаченной камеры воздухом из ресивера, которая используется для распределения пыли по объему камеры. В данной работе увеличение температуры воздуха в 18,7-литровой камере при добавлении воздуха из ресивера определено на основе экспериментального исследования.

Методика эксперимента. Измерение температуры воздуха в камере при добавлении воздуха из ресивера осуществляли с помощью термоэлектрического преобразователя ВР 5/20 (термопары). Спай термопары располагался на расстоянии 70 мм от внутренней стенки камеры. Сигнал термопары обрабатывался программируемым логическим контроллером MCLab PRO (разрешение по времени — 1 мс).

Результаты исследования. Средства измерения зафиксировали повышение температуры спаев термопары на +14 град. Из-за сопоставимости инерционности термопары (3 с) и характерного времени охлаждения воздуха стенками камеры (5 с) результаты измерений занижали реальное значение скачка температуры воздуха в камере. Уточнение результатов измерения сделали на основе простой модели процессов теплообмена участвующих объектов (спай термопары – воздух – стенка камеры) с экспоненциальной релаксацией разницы температур со временем. В результате оценили реальное увеличение начальной температуры в камере величиной +30 град.

Обсуждение результатов. Полученная оценка скачка температуры на +30 град. вносит заметный вклад в общее увеличение начальной температуры, которое ранее ассоциировалось только с выгоранием источника зажигания (+80 град.).

Выводы. С учетом известного увеличения температуры в камере, вызванного выгоранием стандартного источника зажигания (2 кДж), реальное значение начальной температуры среды при исследовании пыли в камере объемом (20 ± 2) л может достигать 135 °С.

Ключевые слова: взрыв; пыль; тестирование; начальная температура; автонагрев

Благодарность. Автор выражает искреннюю благодарность Девликанову М.О. за техническую помощь при проведении эксперимента на установке ПВ-20.

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Изменение температуры воздуха в 20-литровой камере при добавлении воздуха из ресивера // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 23–29. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.23-29

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

A change in the air temperature inside a 20-liter chamber when air is added from the receiver

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. One of the reasons for the overestimation of the explosion hazard of dust inside a (20 ± 2) -liter chamber is the elevated initial temperature of the air suspension. The initial temperature is also raised by the process of filling the pre-empted chamber with air from the receiver, used to distribute dust over the chamber. In this work, an increase in the air temperature inside an 18.7-liter chamber was identified in an experiment for the case of addition of air from the receiver.

The methodology of an experiment. The air temperature in the chamber was measured at the time when the air from the receiver was added using a WR 5/20 thermoelectric converter (a thermocouple). The thermocouple junction was located at the distance of 70 mm from the inner wall of the chamber. The thermocouple signal was processed by an MCLab PRO programmable logic controller (the time resolution is 1 ms).

Research results. The measuring instruments recorded an increase in the temperature of the thermocouple junction by +14 degrees. Due to the comparability of the inertia of the thermocouple (3 s) and the characteristic time of air

cooling by the chamber walls (5 s), the measurement results underestimated the real value of a jump in the air temperature inside the chamber. Measurement results were refined using a simple model of heat transfer between the objects involved in the process (thermocouple junction – air – chamber wall) that entailed the exponential relaxation of the temperature difference over time. As a result, an estimated increase in the initial temperature inside the chamber of +30 degrees was identified.

Results and discussion. The temperature jump by +30 degrees makes a noticeable contribution to the total jump in the initial temperature, which was previously tied solely to the burnout of the ignition source (+80 degrees).

Conclusions. Given the known increase in the temperature inside the chamber caused by the burnout of a standard ignition source (2 kJ), the real value of the initial temperature of the environment can reach 135 °C in the course of studying dust in a (20 ± 2)-liter chamber.

Keywords: explosion; dust; testing; initial temperature; self-heating

Acknowledgment. The author expresses his sincere gratitude to Devlikanov M.O. for the technical assistance during the experiment conducted using the 20-liter chamber.

For citation: Poletaev N.L. A change in the air temperature inside a 20-liter chamber when air is added from the receiver. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):23-29. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.23-29 (rus).

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

1. Введение

Из научных работ [1] и стандартов¹ известно, что тестирование взрывоопасности пыли общепризнанными стандартными методами²⁻⁵ в сферической 20-литровой камере может приводить к оценке, существенно отличающейся от результата тестирования пыли в крупномасштабной камере объемом 1 м³, который принято считать наиболее надежным. Существенному отличию оценок тестирования взрывоопасности пыли в разномасштабных камерах может способствовать целый ряд особенностей методик эксперимента. В частности, к ним относятся различие полей распределения турбулентности газовой фазы взрывов по объему камеры [2, 3], измельчение пыли при диспергировании [4], различие интенсивности седиментации пыли при высокой концентрации взвеси [5] и др. Наибольшее отличие результатов тестирования наблюдается для пылей с низким уровнем взрывоопасности, которым в последнее десятилетие стали уделять повышенное внимание [6–9].

С примерами принципиального различия результатов тестирования связаны пыли ряда твердых горючих материалов, которые не взрываются в камере объемом 1 м³, но взрываются в 20-литровой камере с энергоемким пиротехническим источником зажигания [10–13]. Это явление, известное с конца 1980-х годов, получило название *overdrive* [6, 11].

Согласно предположению, высказанному в [11], *overdrive* обусловлен тем, что реальная начальная температура пыли в 20-литровой камере выше нормального значения ($T_0 = 298$ К или 25 °C), заявленного в методе испытаний. Исследование настоящей работы относится к уточнению упомянутого изменения начальной температуры взрыва.

Общее увеличение начальной температуры среды в 20-литровой камере можно представить в виде суммы трех последовательных скачков температуры, обусловленных соответственно тремя последовательными процессами подготовки взрыва к стандартным огневым испытаниям [6]:

1) наполнением предварительно откаченной камеры воздухом из ресивера до нормального уровня давления, равного примерно 100 кПа [6]; в стандартных испытаниях поток воздуха из ресивера распыляет расположенный на его пути образец исследуемой пыли в объеме камеры;

2) адиабатическим сжатием газовой фазы в камере при локальном горении источника зажигания [6, 11];

3) конвективным нагревом среды во всей камере продуктами горения источника зажигания [12].

Второй скачок температуры описывается расчетным соотношением из [6]. Сумма второго и третьего скачков температуры оценивается расчетным соотношением из [9]. В общем случае сумма второго и третьего скачков температуры пропорциональна энергии источника зажигания и, например, для стандартного пиротехнического источника зажигания с запасом химической энергии 2 кДж составляет около 80 град. До настоящего времени именно эту величину брали за основу при оценке увеличения начальной температуры среды в 20-литровой камере, пренебрегая первым скачком температуры в камере, согласно стандарту ASTM E1226-19⁵ и работе [14].

¹ NFPA 68: Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, 2013.

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

³ 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, 2011.

⁴ ASTM E1226 - 2012a. Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds, 2012. DOI:10.1520/E1226-12A.

⁵ ASTM E1226-19. Standard Method Explosibility Dust Clouds. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019:1-15.

Расчетная оценка первого скачка температуры затруднена из-за отсутствия точных сведений о теплообмене между воздушным потоком из ресивера в камеру и ее конструктивными элементами. Используя крайние случаи теплообмена (адиабатическое и изотермическое истечение), автор [6] определил границы значений первого скачка температуры среды — от 11 до 51 град. Эти границы показывают возможность заметного вклада первого скачка температуры в общее увеличение начальной температуры исследуемой взрывзвеси. Ввиду важности знания начальной температуры среды в 20-литровой камере следует уточнить значение первого скачка температуры, что с учетом вышесказанного целесообразно сделать экспериментально. Автору не известны опубликованные работы, в которых экспериментально исследовался первый скачок температуры. Более того, устные ответы специалистов на вопрос о знаке величины первого скачка температуры могли сопровождаться утверждением о том, что предварительно сжатый воздух, поступающий в камеру из ресивера, снижает температуру в камере. Это обстоятельство дополнительно подчеркивает актуальность указанного исследования.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию увеличения температуры воздуха в стандартной квазисферической камере ВНИИПО МЧС России объемом около 20 л при добавлении воздуха из ресивера.

2. Методика эксперимента

2.1. Используемые приборы и инструменты

В настоящих экспериментальных исследованиях использовалась установка ПВ-20, разработанная ВНИИПО МЧС России и предназначенная для исследования показателей взрыва взрывзвесей в квазисферической камере объемом 18,7 л. Схема и параметры установки описаны в [6]. Управление работой установки, а также регистрация показаний датчиков давления, установленных на камере и ресивере, осуществляются программируемым логическим контроллером «Микролаб» (далее — контроллером⁶). Результаты измерений контроллером выводились на видеомонитор компьютера и сохранялись в памяти компьютера.

Для исследования температуры воздуха внутри камеры в ее объем вводился датчик температуры. Ввод осуществлялся через технологическое отверстие в боковой поверхности камеры, расположенное на уровне, отвечающем половине высоты (0,34 м) внутреннего объема камеры. Датчик представлял собой термоэлектрический преобразователь ВР 5/20 (далее — ТП) с электродами

из сплавов вольфрама и рения. Диаметр электродов — 0,1 мм; поперечный размер спая электродов около — 0,3 мм. Расстояние от внутренней боковой поверхности камеры до спая — примерно 70 мм. Выход электродов наружу через упомянутое технологическое отверстие герметизировался.

Свободные концы электродов ТП подключали ко второму контроллеру, с дисплея которого видеокамерой считывались результаты измерения температуры спая ТП. Анализ видеосъемки позволял строить зависимость температуры спая ТП от времени для каждого из проведенных экспериментов с разрешением по времени примерно 0,1 с.

С целью корректного использования результатов измерений температуры спая ТП для оценки изменяющейся во времени температуры окружающего спай воздуха измеряли инерционность ТП в соответствии с ГОСТ 6616–94⁷. Согласно данному стандарту, показатель тепловой инерции ТП (далее — инерция ТП) — это время τ_{ic} , необходимое для того, чтобы при внесении ТП в среду с постоянной температурой разность температур среды и спая ТП уменьшилась в 2,71 раза. В качестве среды с постоянной (на короткое время измерения) температурой использовался нагретый электроспиралью воздух в перевернутом (во избежание конвективного охлаждения) термосе с открытой горловиной. В результате указанных измерений определили $\tau_{ic} \approx 3$ с, что находится в приемлемом согласии с данными [15].

2.2. Методика проведения опыта

Из камеры установки ПВ-20 в течение 40 с вакуум-насосом откачивается воздух до давления около 50 кПа (здесь и далее приводятся абсолютные значения давления воздуха). В ресивер установки объемом 0,76 л насосом закачивается воздух до давления около 1100 кПа. В течение 10 с корректируется положение видеокамеры, снимающей показания температуры с дисплея второго контроллера, производится включение видеокамеры.

С клавиатуры компьютера через первый контроллер направляются команды на открытие электропневмоклапана, установленного на трубопроводе, соединяющем ресивер и камеру. Воздух из ресивера поступает в камеру в течение промежутка времени $\tau_r \approx 0,2$ с, после чего электропневмоклапан закрывается. Начальные давления воздуха в ресивере и камере подбираются таким образом, чтобы к моменту закрытия электропневмоклапана давление в камере оказывалось близким к нормальному значению (примерно 100 кПа).

⁷ ГОСТ 6616–94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия : принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации 21 октября 1994 г.

⁶ MCLab PRO. URL: mclab.ru/izmeritelnye-pribory/microlab-pro

Через 10 с прерывается съемка видеокамерой, а результаты съемки используются для построения экспериментальной зависимости температуры спая ТП от времени: $T_{ic}(t)$.

2.3. Особенности методики

2.3.1. Первая особенность методики

Первой особенностью является охлаждение воздуха в камере при откачке вакуум-насосом. Величина падения температуры воздуха в камере, регистрируемая ТП, достигает примерно 9 град. (например, с 25 до 16 °С), после чего падение температуры прекращается из-за конкуренции упомянутого процесса охлаждения с нагревом воздуха стенками камеры. После выключения вакуум-насоса происходит восстановление комнатной температуры воздуха в камере с характерным временем $\tau_{ev} \approx 6$ с. Поскольку промежуток времени от момента выключения вакуум-насоса до начала наполнения камеры воздухом из ресивера (момента срабатывания электропневмоклапана) намного превышает τ_{ev} , влиянием упомянутого охлаждения на скачок температуры воздуха в камере при добавлении воздуха из ресивера можно пренебречь.

2.3.2. Вторая особенность методики

Второй особенностью является нагрев воздуха в ресивере в процессе наполнения ресивера воздухом до рабочего давления (1 МПа). Хотя величина возникающего нагрева не регистрировалась, им также можно пренебречь по причине, указанной в п. 2.3.1. Действительно, интенсивность процессов теплообмена воздуха со стенками ограничивающего объема увеличивается с уменьшением габаритов объема, а промежуток времени от момента окончания наполнения ресивера до начала наполнения камеры намного превышает τ_{ev} . Другими словами, к моменту начала наполнения камеры можно пренебрегать отличием температуры сжатого воздуха в ресивере от комнатной.

2.3.3. Третья особенность методики

Третья особенность касается высокой инерции ТП. Скачок температуры воздуха в камере, возникший за время наполнения камеры воздухом из ресивера (примерно 0,2 с), в последующие моменты времени снижается до комнатной температуры из-за теплообмена воздуха со стенками камеры. Грубая оценка характерного времени τ_a такого снижения дает $\tau_a \approx \tau_{ev} \approx 6$ с. Поскольку $\tau_{ic} \approx 3$ с, имеют место соотношения:

$$\tau_r \ll \tau_{ic} < \tau_a. \quad (1)$$

Согласно (1) максимум на графике $T_{ic}(t)$ не будет отвечать максимальному изменению температуры воздуха, возникающему к концу наполнения камеры воздухом из ресивера. Это обусловлено задержкой измерения температуры воздуха в камере (инерцией ТП), за время которой температура воздуха в камере успеет снизиться ввиду того, что τ_{ic} и τ_a являются величинами одного порядка.

Для прогнозирования реального значения скачка температуры воздуха на стадии наполнения камеры воздухом из ресивера используется математическая модель теплообмена, описанная в следующем разделе работы.

3. Результаты исследования

На рис. приводится экспериментальная (в дискретных символах) зависимость температуры спая термопары от времени $T_{ic}(t)$ по методике, изложенной в п. 2.2. График зависимости демонстрирует нагрев спая ТП примерно на 14 град. (до 39 °С), а затем сравнительно медленную релаксацию температуры спая (с характерным временем порядка 5 с) к начальному комнатному значению (25 °С).

Как было показано в п. 2.3.3, реальное значение скачка температуры воздуха на стадии наполнения камеры воздухом из ресивера должно быть выше. Оценим реальное значение упомянутого скачка температуры на основе следующей простой математической модели рассматриваемых процессов.

Уравнения теплообмена между воздухом в камере и ее стенками и теплообмена между воздухом в камере и спаем термопары имеют следующий вид:

$$T'_a = (T_0 - T_a)/\tau_1; \quad T'_{ic} = (T_0 - T_{ic})/\tau_2. \quad (2)$$

Начальные условия: $T_a(0) = T_{a,\max}$; $T_{ic}(0) = T_0$. С учетом первого неравенства из (1) считается, что скачок температуры воздуха на стадии наполнения камеры воздухом из ресивера происходит мгновенно, т.е. момент времени $t = 0$ рассматривается как начало и окончание процесса накачки.

Решением (2) являются функции:

$$T_a(t) = T_0 + (T_{a,\max} - T_0) \cdot \exp(-t/\tau_1);$$

$$T_{ic}(t) = T_0 + (T_{a,\max} - T_0) [\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)] / (1 - \tau_2/\tau_1),$$

где T_a — характерная (средняя) температура воздуха в камере, °С;

T_{ic} — температура спая термопары в объеме камеры, °С;

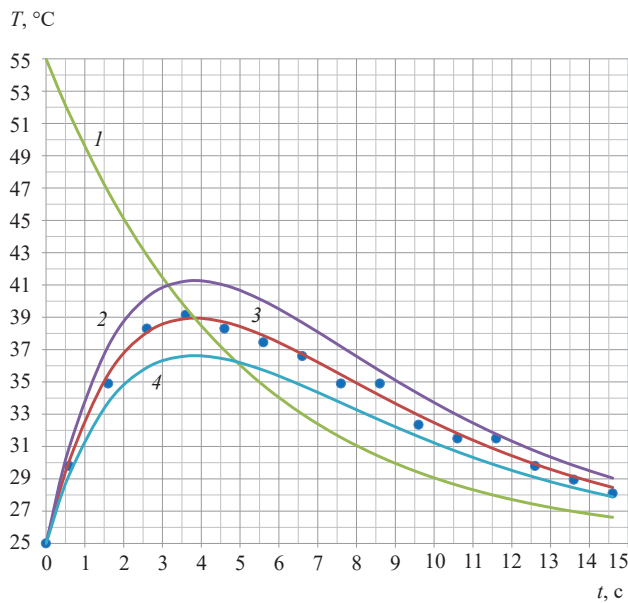
штрих (') при переменной означает производную переменной по времени;

t — время, с;

T_0 — температура стенки камеры, $T_0 = 25$ °С;

τ_1 — характерное время теплообмена нагретого воздуха в камере со стенками камеры, с;

τ_2 — инерция термопары, с;



Расчетная зависимость температуры воздуха в камере от времени (кривая 1); экспериментальная (дискретные символы) и расчетные (кривые 2, 3 и 4) зависимости температуры спая термопары от времени. Кривые 1 и 3 отвечают начальному ($t = 0$) скачку температуры в камере на 30 град; кривые 2 и 4 — начальному скачку температуры в камере на 35 и 25 град. соответственно

Design dependence of the air temperature in the chamber on time (curve 1); experimental (discrete symbols) and design (curves 2, 3 and 4) dependences of the thermocouple temperature on time. Curves 1 and 3 correspond to the initial ($t = 0$) temperature jump in the chamber by 30 degrees; lines 2 and 4 correspond to the initial temperature jump in the chamber by 35 degrees and 25 degrees, respectively

$T_{a,\max}$ — максимальная (к моменту окончания накачки камеры) температура воздуха в камере, °C.

Полагая величины τ_1 , τ_2 и $T_{a,\max}$ неизвестными параметрами системы (2)–(4), подбираем их таким образом, чтобы среднеквадратическое отклонение расчетной зависимости температуры спая $T_{ic,cal}(t)$ от экспериментальной зависимости данного параметра $T_{ic,exp}(t)$ было наименьшим. Хотя значение каждого из параметров влияет на всю форму расчетной зависимости $T_{ic,exp}(t)$, можно отметить приоритетное влияние τ_1 , τ_2 и $T_{a,\max}$ на крутизну заднего и переднего фронтов, а также на высоту графика этой зависимости соответственно, что значительно облегчает поиск наилучшей аппроксимации экспериментальных данных. Расчеты показали, что наименьшее отклонение наблюдается при $\tau_1 \approx 5$ с, $\tau_2 \approx 3$ с, $T_{a,\max} = 55$ °C (см. рисунок, кривая 3). Для демонстрации заметного отклонения расчетной зависимости $T_{ic,cal}(t)$ от экспериментальной при малом изменении $T_{a,\max}$ на рис. дополнительно приводятся расчетные зависимости для случая $T_{a,\max} = 60$ °C (кривая 2) и $T_{a,\max} = 50$ °C (кривая 4) при $\tau_1 = 5$ с, $\tau_2 = 3$ с. Отметим близость значений параметров $\tau_2 \approx \tau_{ic}$.

4. Обсуждение результатов

Согласно графику $T(t)$ на рисунке, температура воздуха в камере после окончания процедуры ее наполнения воздухом из ресивера испытывает скачок на $(55 - 25) = 30$ град.

Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений температуры спая ТП поддерживает уверенность в правомерности использованного метода оценки скачка температуры.

Близость значений $\tau_2 \approx \tau_{ic}$ указывает на возможность пренебречь влиянием движения нагретого воздуха в камере на инерцию ТП, которая определялась в неподвижной нагретой среде.

Полученная расчетно-экспериментальная оценка скачка температуры (30 °C) не противоречит термодинамическим расчетам [6], согласно которым эта величина находится в интервале значений от 12 до 51 град.

С учетом известного увеличения температуры в камере (на 80 град. [10]), вызванного выгоранием стандартного источника зажигания (2 кДж, ASTM E1515–14²), начальная температура среды при исследовании взрыва пыли в 20-литровой камере может достигать значения $(25 + 30 + 80) = 135$ °C. Это значение существенно превышает величину 25 °C, которая подразумевается разработчиками стандартной методики исследования взрывоопасности пыли в 20-литровой камере.

5. Выводы

С использованием термоэлектрического преобразователя ВР 5/20 измерено увеличение температуры воздуха в квазисферической камере, предназначенной для стандартного исследования показателей взрыва аэрозвесей, на стадии добавления воздуха из ресивера. Результат измерения составил 14 град.

Предложена математическая корректировка данного результата, учитывающая сопоставимость тепловой инерции термоэлектрического преобразователя и характерного времени охлаждения воздуха в камере ее стенками. Показано, что реальный прирост начальной температуры в камере на стадии добавления воздуха из ресивера составляет 30 град.

С учетом известного увеличения температуры в камере (на 80 град.), вызванного выгоранием стандартного источника зажигания (2 кДж), реальное значение начальной температуры среды при исследовании взрыва пыли в 20-литровой камере может достигать $(25 + 30 + 80) = 135$ °C. Эта величина значительно превышает значение 25 °C, предполагаемое разработчиками стандартной методики исследования взрывоопасности пыли в 20-литровой камере.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Eckhoff R.K.* Dust explosions in the process industries 3rd edition. Boston, Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003; 720.
2. *Castellanos D., Carreto V., Skjold T., Yuan S., Chaudhari P., Mannan M.S., Mashuga C.* Construction of a 36 L dust explosion apparatus and turbulence flow field comparison with a standard 20 L dust explosion vessel // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018. Vol. 55. Pp. 113–123. DOI:10.1016/j.jlp.2018.05.014
3. *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
4. *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
5. *Di Sarli V., Russo P., Sanchirico R., Di Benedetto A.* CFD simulations of the effect of dust diameter on the dispersion in the 20 L bomb // *Chemical Engineering Transactions*. 2013. Vol. 31. Pp. 727–732. DOI: 10.3303/CET1331122
6. *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
7. *Rodgers S.A., Ural E.A.* Practical issues with marginally explosible dusts — evaluating the real hazards // *Process Safety Progress*. 2011. Vol 30. Issue 3. Pp. 266–279. DOI: 10.1002/prs.10436
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-m³ chambers // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
9. *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
10. *Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I.* Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences // *Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1988. Vol. 21. Issue 1. Pp. 303–313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3
11. *Cashdollar K.L., Chatrathi K.* Minimum explosible dust concentrations measured in 20-L and 1-m³ Chambers // *Combustion Science and Technology*. 1993. Vol. 87. Pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213
12. *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” // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007. Vol. 20. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
13. *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(3-5): 209-219. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00043-1
14. *Di Benedetto A., Garcia-Agreda A., Russo P., Sanchirico R.* Combined effect of ignition energy and initial turbulence on the explosion behavior of lean gas/dust-air mixtures // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 51 (22). Pp. 7663–7670. DOI: 10.1021/ie201664a
15. *Сорокин Д.И., Джусов О.П.* Динамические характеристики термопар. Обнинск, 1973. 31 с.

REFERENCES

1. *Eckhoff R.K.* *Dust explosions in the process industries* : 3rd edition. Boston, Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003; 720.
2. *Castellanos D., Carreto V., Skjold T., Yuan S., Chaudhari P., Mannan M.S., Mashuga C.* Construction of a 36 L dust explosion apparatus and turbulence flow field comparison with a standard 20 L dust explosion vessel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 55:113-123. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.05.014
3. *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

4. 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
5. Di Sarli V., Russo P., Sanchirico R., Di Benedetto A. CFD simulations of the effect of dust diameter on the dispersion in the 20 L bomb. *Chemical Engineering Transactions*. 2013; 31:727-732. DOI: 10.3303/CET1331122
6. 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).
7. Rodgers S.A., Ural E.A. Practical issues with marginally explosible dusts — evaluating the real hazards. *Process Safety Progress*. 2011; 30(3):266-279. DOI: 10.1002/prs.10436
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-m³ chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
9. 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
10. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences. *Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1988; 21(1):303-313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3
11. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum explosible dust concentrations measured in 20-L and 1-m³ chambers. *Combustion Science and Technology*. 1993; 87:157-171. DOI: 10.1080/00102209208947213
12. 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
13. 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(3-5):209-219. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00043-1
14. Di Benedetto A., Garcia-Agreda A., Russo P., Sanchirico R. Combined effect of ignition energy and initial turbulence on the explosion behavior of lean gas/dust-air mixtures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011; 51(22):7663-7670. DOI: 10.1021/ie201664a
15. Sorokin D.I., Dzhusov O.P. *Dynamic characteristics of thermocouples*. Obninsk, 1973; 31. (rus).

Поступила 26.08.2021, после доработки 03.09.2021;

принята к публикации 09.09.2021

Received August 26, 2021; Received in revised form September 3, 2021;

Accepted September 9, 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, 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