

Признаки взрывобезопасности пыли полимера, вспучивающегося при нагревании

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. Знание максимального размера d_{cr} частиц, активно участвующих в процессе горения аэрозвеси, позволяет без огневых испытаний произвести классификацию отобранных на производстве дисперсных материалов по опасности взрыва. Для легковоспламеняющихся полимеров, в частности полиэтилена, $d_{cr} \approx (150 \pm 50)$ мкм (Hertzberg et al., 1982). При наличии в составе такого полимера вспучивающегося компонента, кратно увеличивающего размер частиц при нагревании (далее — вспучивающегося полимера), оценку его взрывоопасности вынуждены проводить экспериментально, обращая особое внимание на анализ правомерности полученных выводов.

Особенности объекта анализа. Рассмотрен вспучивающийся полимер, пыль которого по результатам стандартного исследования в 18,7-литровой камере была отнесена к взрывоопасной с максимальным давлением взрыва около 600 кПа. Сомнение в правомерности такого вывода обусловлено необходимостью двукратного увеличения энергии источника зажигания (до 5 кДж) для возбуждения взрыва аэрозвеси полимера.

Признаки взрывобезопасности и обсуждение результатов. Тщательный анализ результатов исследования вспучивающегося полимера выявил две особенности: случайное проявление взрывоопасности аэрозвеси в широком диапазоне концентрации пыли и наличие двух перегибов на восходящем участке зависимости давления во взрывной камере от времени в единичных опытах. Эти особенности по своим основным параметрам совпали с теми, что встречаются у антрацита и меламина, проявляющих взрывоопасность при испытаниях в 20-литровой камере, но взрывобезопасных по результатам крупномасштабных испытаний в камере объемом 1 м³ с источником зажигания 10 кДж.

Выводы. Взрывоопасность рассматриваемой пыли вспучивающегося полимера в нормальных атмосферных условиях маловероятна. Взрывы в 18,7-литровой камере вызваны первоначальным нагревом аэрозвеси теплом горящего источника зажигания и частичного выгорания пыли. Окончательное заключение следует сделать на основании крупномасштабных испытаний.

Ключевые слова: взрыв пыли; 20-литровая камера; завышение опасности; ошибка тестирования

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Признаки взрывобезопасности пыли полимера, вспучивающегося при нагревании // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 6. С. 5–11. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.5-11

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

Signs of explosion safety of polymer dust that swells when heated

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. Knowledge the maximum size of the d_{cr} particles actively involved in the combustion of dust/air mixture makes it possible to classify the dispersed materials selected in the production according to the explosion hazard without fire tests. For flammable polymers, in particular polyethylene, $d_{cr} \approx (150 \pm 50)$ microns (Hertzberg et al., 1982). If such a polymer contains a bulging component that multiplies the particle size when heated (hereinafter referred to as the bulging polymer), its explosion hazard must be assessed experimentally, paying special attention to the analysis of the validity of the conclusions obtained.

Features of the object of analysis. A bulging polymer is considered, the dust of which, according to the results of a standard study in an 18.7-liter chamber, was classified as explosive with a maximum explosion pressure of about 600 kPa. The doubt about the validity of this conclusion is due to the need to double the energy of the ignition source (up to 5 kJ) to initiate an explosion of the polymer air suspension.

Signs of explosion safety and discussion of the results. A thorough analysis of the results of the study of a bulging polymer revealed two features: the accidental occurrence of explosive air suspension in a wide range of dust concentrations and the presence of two inflection points in the ascending section of the pressure dependence in the blast chamber on time in single experiments. These features, in their main parameters, coincided with those found in anthracite and melamine, which exhibit explosive properties when tested in a 20-liter chamber, but are nonexplosive according to the results of large-scale tests in a 1 m³ chamber with an ignition source of 10 kJ.

Conclusions. The explosion hazard of the considered dust of a bulging polymer is unlikely under normal atmospheric conditions. The explosions in the 18.7-liter test chamber are caused by the initial heating of the air suspension by the heat of the burning ignition source and partial dust burning in the chamber. The final conclusion should be made based on large-scale tests.

Keywords: dust explosion; 20-liter chamber; overdrive effect; testing error

For citation: Poletaev N.L. Signs of explosion safety of polymer dust that swells when heated. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(6):5-11. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.5-11 (rus).

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

Введение

Известно, что при определенной степени измельчения твердого горючего материала образуется мелкодисперсная пыль, способная в присутствии воздуха (газообразного окислителя) проявлять взрывоопасность [1]. Последняя выражается в том, что пыль в состоянии аэрозвеси распространяет пламя, которое по внешнему виду и возможным катастрофическим последствиям аналогично хорошо известному пламени горючих газозводушных смесей [2].

Важнейшей характеристикой взрывоопасной пыли является максимальный размер частиц d_{cr} , активно участвующих в процессе горения аэрозвеси [3]. Если размер частиц дисперсного материала превышает d_{cr} , пламя по аэрозвеси такого материала не распространяется. Величина d_{cr} зависит, в первую очередь, от химического состава горючего материала, изменяясь в широких пределах от субмикронных значений для ядерного углерода [4] до миллиметровых размеров для сухой молочной сыворотки [5].

Надежное по своим выводам экспериментальное исследование взрывоопасности пыли проводится в крупномасштабном оборудовании [6], являясь продолжительным и затратным (для заказчика работы) процессом. В то же время знание d_{cr} позволяет без огневых испытаний произвести предварительную классификацию отобранных на производстве дисперсных материалов на взрывоопасность, что приводит к существенной экономии времени и финансовых средств. В частности, известно, что для пыли органических полимеров, например полиэтилена, величина d_{cr} занимает интервал значений от 100 до 200 мкм [7], а нижний концентрационный предел распространения пламени для таких дисперсных материалов с размером частиц менее d_{cr} составляет величину от 30 до 60 г/м³ [8].

Тем не менее существует обстоятельство, которое не позволяет воспользоваться упомянутой выше

оценкой d_{cr} для пыли из горючих полимерных материалов и вынуждает проводить экспериментальное исследование. Этим обстоятельством является присутствие в составе дисперсного полимерного компонента, вспучивающегося при нагревании. Частицы такого материала (далее — вспучивающегося полимера) в пламени увеличивают свой габаритный размер, оставляя открытым ответ на вопрос о фактической дисперсности исследуемого образца в волне горения. Данный пробел знаний предполагает повышенное внимание к проведению стандартных исследований дисперсного материала для исключения ошибки при интерпретации полученных экспериментальных результатов [9, 10].

В настоящей работе приводится пример, как тщательный анализ результата стандартной оценки взрывоопасности образца вспучивающегося полимера, отнесенного к взрывоопасным материалам в состоянии аэрозвеси, привел к серьезным сомнениям в обоснованности вывода стандартного исследования.

Особенности объекта анализа

Исследованная ранее пыль вспучивающегося полимера обладала следующими особенностями (сведения получены от В.В. Вдовиной и М.О. Девликанова), отличающими результаты ее стандартных исследований от среднестатистических результатов для полимеров. Здесь и далее подразумеваем методы исследования, изложенные в ГОСТ 12.1.044–89 ССБТ¹.

При равномерном прогреве исследованного полимера в печи прибора ОТП в условиях монотонного подъема температуры наблюдалось вспучивание поли-

¹ ГОСТ 12.1.044–89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

мера при достижении температуры 180 °С. При дальнейшем повышении температуры характерный размер вспученного образца мог в несколько раз превосходить первоначальный размер, что затрудняло определение температуры воспламенения (около 240 °С) и температуры самовоспламенения (около 490 °С) полимера.

При исследовании показателей взрывоопасности аэрозвеси вспучивающегося полимера обнаружилось, что низкокалорийные источники зажигания не приводили к взрыву аэрозвеси. Взрыв аэрозвеси вспучивающегося полимера наблюдался, начиная с двукратного превышения стандартного значения энергии (2,5 кДж) пиротехнического источника зажигания, а именно при энергии источника зажигания $E_{ig} = 5$ кДж.

Значение нижнего концентрационного предела распространения пламени по аэрозвеси (НКПР) было заметно высоким (250 г/м³). Эту величину показателя можно было объяснить низким содержанием потенциально взрывоопасной фракции полимера с размером частиц менее 160 мкм, которое составляло $R = 20$ мас. %. Действительно, расчетное значение показателя НКПР $\cdot R = 50$ г/м³ соответствует среднестатистическому значению показателя для мелкодисперсного полимера с размером частиц менее d_{cr} .

Максимальное давление взрыва P_{max} и индекс пожаровзрывоопасности K_{st} вспучивающегося полимера в 18,7-литровой квазисферической камере имели заниженные значения: 5 и 8 бар/(с·м) соответственно.

Последняя из перечисленных особенностей представляла формальное основание для опасений по поводу правомерности отнесения вспучивающегося полимера к взрывоопасным материалам в состоянии аэрозвеси. Действительно, низкое значение индекса пожаровзрывоопасности образца полимера при зажигании аэрозвеси энергоемким пиротехническим зарядом (5 кДж) оказалось в диапазоне «менее 45 бар/(с·м)», что, по мнению авторов работы [11], должно вызывать сомнение в возможности подтвердить взрывоопасность образца в крупномасштабных испытаниях с использованием взрывной камеры объемом 1 м³, в которой применяют пиротехнический источник зажигания с $E_{ig} = 10$ кДж.

Для подтверждения высказанных опасений ниже отмечается очевидное сходство некоторых особенностей результатов маломасштабного исследования взрывоопасности вспучивающегося полимера с особенностями результатов исследования двух горючих мелкодисперсных материалов (антрацита и меламина), проявляющих взрывоопасность при исследовании в 20-литровой взрывной камере, но признанных невзрывоопасными по результатам исследования в 1-м³ взрывной камере. Данные особенности будем называть признаками взрывобезопасности.

Признаки взрывобезопасности

Случайное проявление взрывоопасности аэрозвеси в широком диапазоне концентрации пыли

Для вспучивающегося полимера это явление наблюдалось в диапазоне концентрации пыли от 250 до 900 г/м³, о чем свидетельствуют данные, представленные на рис. 1. Разрыв между максимальными значениями регистрируемого давления в камере для представленных на рисунке двух совокупностей опытов составил от 200 до 350 кПа.

Это явление в части масштаба диапазона концентраций, для которого характерно наличие неоднозначной (двух ветвей) зависимости $P(C_s)$, и характерной величины разрыва между этими ветвями аналогично явлению, которое наблюдалось для пыли антрацита [12]. Пыль антрацита проявляла взрывоопасность при исследовании в сферической 20-литровой взрывной камере Р. Сивека, но не проявляла взрывоопасность в крупномасштабных огневых испытаниях

При оформлении результатов исследования вспучивающегося полимера опыты, отвечающие кривой 1 для концентраций пыли, превышающих 250 г/м³, рассматривались экспериментатором как ошибки эксперимента и не включались в протокол стандартного исследования. В отсутствие информации о таких опытах график зависимости $P(C_s)$ имел характерный

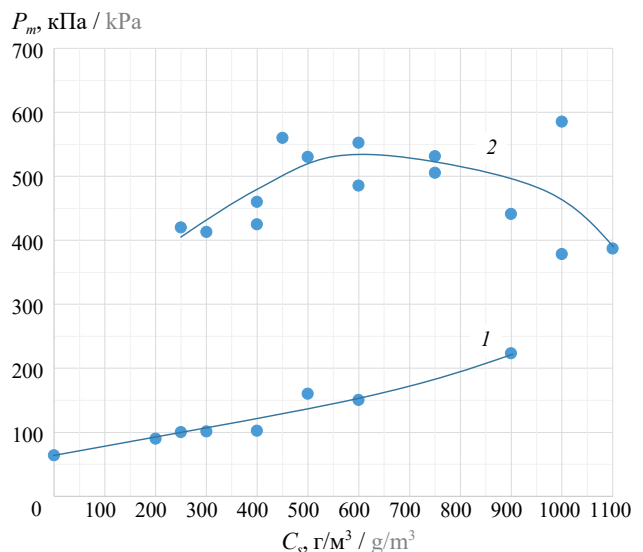


Рис. 1. Дискретная зависимость максимального избыточного давления P_m , кПа, в 18,7-литровой взрывной камере от концентрации аэрозвеси вспучивающегося полимера C_s , г/м³, и ее аппроксимация для опытов со взрывом (кривая 2) и без взрыва (кривая 1); ● — экспериментальные данные; энергия зажигания — 5 кДж

Fig. 1. Discrete dependence of the maximum overpressure P_m , kPa, in an 18.7-liter blast chamber on the concentration of the air suspension of the bulging polymer C_s , g/m³, and its approximation for experiments with an explosion (curve 2) and without an explosion (curve 1); ● — experimental data; ignition energy — 5 kJ

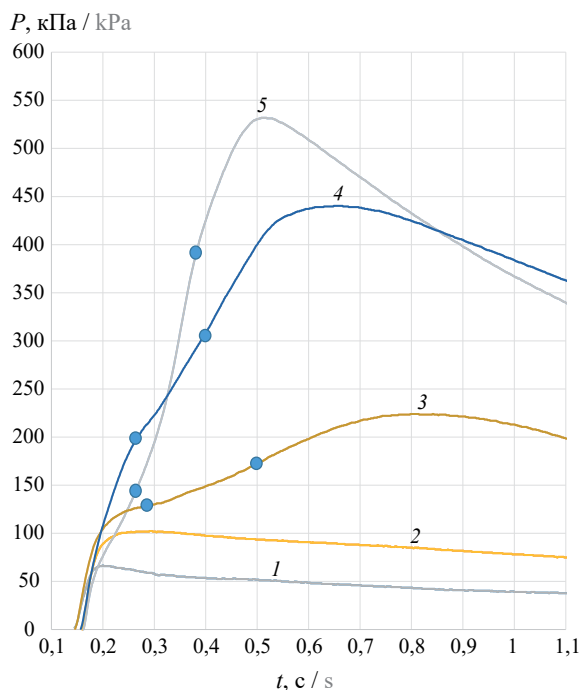


Рис. 2. Зависимости избыточного давления P , кПа, во взрывной камере от времени t , с, в единичных опытах. Жирными точками отмечены перегибы данных зависимостей

Fig. 2. Dependences of the excess pressure P , kPa, in the blast chamber on the time t , s, in single experiments. The inflections of these dependences are marked with bold dots

(однозначный) вид, типичный для взрывоопасной пыли.

Наличие двух перегибов на восходящем участке зависимости избыточного давления от времени $P(t)$ в единичных опытах

На рис. 2 приводятся характерные графики данной зависимости для вспучивающегося полимера. График 1 отвечает давлению, возникающему при срабатывании источника зажигания в отсутствие пыли. Графики 2 и 3 отвечают начальным концентрациям пыли, соответственно, 200 и 900 г/м³ нижней ветви зависимости $P_m(C_s)$ на рис. 1. Графики 4 и 5 отвечают начальной концентрации пыли, соответственно, 900 и 500 г/м³ для верхней ветви зависимости $P_m(C_s)$ на рис. 1.

Отчетливо видны перегибы функций $P(t)$ на графиках 3, 4 и 5. Нижний и верхний перегибы отвечают соответственно точке перехода скорости изменения давления dP/dt от стадии снижения к стадии роста и точке обратного перехода. Наличие этих перегибов свидетельствует о двух последовательных стадиях развития горения аэровзвеси во взрывной камере. Первая стадия отвечает подготовке негорючей аэровзвеси к переходу в состояние горючей аэровзвеси вследствие нагрева взвеси при срабатывании источника зажигания и вызванного этим событием частичного выгорания пыли. Вторая ста-

дия отвечает выгоранию подготовленной горючей аэровзвеси.

Аналогичное поведение функций $P(t)$ наблюдалось для пыли антрацита и меламина [9]. Важно отметить, что данные пыли проявляли взрывоопасность при исследовании в сферической 20-литровой взрывной камере P . Сивека, но не проявляли взрывоопасность в крупномасштабных огневых испытаниях.

Обсуждение результатов

Представленные на рис. 1 результаты позволяют разделить все опыты с пылью вспучивающегося полимера на две группы по величине P . В первую группу входят опыты, группирующиеся вблизи кривой 1 на рис. 1. Во вторую группу входят опыты, группирующиеся вблизи кривой 2. Близость значений P к аппроксимирующим кривым внутри каждой из групп опытов (менее 70 кПа) и существенный разрыв между упомянутыми кривыми (более 200 кПа) демонстрируют качественное отличие процессов горения пыли в опытах из разных групп. Опыт первой группы выявляют локальное горение аэровзвеси вблизи пламени источника зажигания, т.е. отсутствие взрыва. Опыт второй группы выявляют взрыв пыли, охватывающий значительный объем аэровзвеси [10]. В то же время характер изменения аппроксимирующих кривых с ростом концентрации аэровзвеси C_s порождает уверенность в слиянии этих кривых в диапазоне значений C_s от 900 до 1200 г/м³. Там же находится верхний предел распространения пламени по аэровзвеси, которому отвечает $P \approx 330$ кПа [9]. По мере приближения к упомянутому диапазону значений C_s происходит размывание признаков принадлежности опыта к той или иной конкретной группе, что можно видеть на примере графиков $P(t)$ для $C_s = 900$ г/м³ (кривые 3 и 4 на рис. 2).

Отличие процессов горения для опытов из разных групп подтверждает различие восходящего участка зависимости $P(t)$. В опытах первой группы для этого участка $P(t)$ характерно монотонное снижение производной dP/dt , аналогичное тому, которое наблюдается в случае срабатывания источника зажигания при отсутствии пыли (см. опыт 1 на рис. 2). Для опытов второй группы на восходящем участке $P(t)$ присутствуют две точки перегиба (см. кривые 4 и 5 на рис. 2), исключающие монотонное изменение dP/dt и указывающие на двухэтапный характер горения пыли полимера. Нижний перегиб соответствует моменту достижения минимальной скорости изменения давления dP/dt , что является особенностью проявления эффекта «overdrive»: завершается этап медленного развития горения, на котором происходит прогрев свежей

аэровзвеси путем ее турбулентного перемешивания с продуктами горения источника зажигания [13]. Верхний перегиб относится к этапу быстрого развития взрыва и отвечает моменту достижения максимальной скорости изменения давления $(dP/dt)_{\max}$, нормированное значение которой K_{st} весьма мало (не более 8 бар·м/с) [10].

Диапазон взрывоопасных концентраций пыли полимера в использованных условиях тестирования (18,7-литровая камера, $E_{ig} = 5$ кДж) составил от 250 до 1100 г/м³. Во всем диапазоне взрывоопасных концентраций имеет место случайный характер проявления взрывоопасности пыли (рис. 1), который объясняется, по-видимому, следующими обстоятельствами:

- близостью габарита пламени источника зажигания и габарита камеры и разбросом (± 10 %) энергии, выделяющейся при горении источника зажигания [14];
- двухэтапным характером взрыва, включающим конкуренцию процессов, один из которых способствует росту горючести пыли (прогрев свежей аэровзвеси), а другой снижает способность нагретой зоны в камере к инициированию волны горения (из-за уменьшения максимальной температуры этой зоны) [15].

Проявление взрывоопасности вспучивающегося полимера при увеличении энергии источника зажигания до 5 кДж в настоящей работе вызвано ростом начальной температуры аэровзвеси из-за притока тепловой энергии от срабатывающего источника зажигания и инициированного этим событием локального выгорания пыли [10]. Оценим увеличение среднеобъемной температуры аэровзвеси в герметичной взрывной камере из-за упомянутого теплового воздействия, пренебрегая различием температур фаз аэровзвеси на начальной стадии огневого опыта и используя закон Шарля [16, 17]:

$$\frac{T + 273}{T_0 + 273} = \frac{P + 100}{P_0 + 100}, \quad (1)$$

где T , °С, — возросшая температура аэровзвеси, отвечающая возросшему избыточному давлению воздуха в камере P , кПа; полагаем $T_0 = 25$ °С, $P_0 = 0$ кПа;

T_0 , °С, и P_0 , кПа, — начальные значения температуры аэровзвеси и избыточного давления воздуха в камере соответственно.

Для случая срабатывания источника зажигания в отсутствие аэровзвеси (кривая 1 на рис. 2) имеем максимальное значение $P = 65$ кПа, которому, согласно формуле (1), отвечает значение $T \approx 220$ °С, близкое к температуре воспламенения вспучивающегося полимера. Это позволяет предположить, что при наличии в камере взвеси вспучивающегося полимера срабатывание источника зажигания может (с некоторой вероятностью) инициировать появление горючей смеси воздуха с газообразными продуктами деструкции полимера в значительной части объема камеры. В этом случае увеличенный размер частиц не будет препятствием для распространения пламени в среде, представляющей, фактически, гибридную смесь [18–20].

Согласно графикам на рис. 2, «расщепление» зависимостей $P(t)$ на две группы («взрыв есть» и «взрыва нет») происходит вблизи уровня давления $P_{cr} \approx 125$ кПа на момент $t \approx 0,3$ с. Превышение P_{cr} гарантирует результат «взрыв есть». Согласно формуле (1), значению P_{cr} соответствует среднеобъемная температура в камере $T \approx 400$ °С, отвечающая примерно равным вкладам в начальный прогрев аэровзвеси от источника зажигания и локального выгорания пыли.

Выводы

Взрывоопасность аэровзвеси рассмотренного образца пыли вспучивающегося полимера в нормальных атмосферных условиях маловероятна. Взрывы в испытательной камере, скорее всего, вызваны первоначальным нагревом аэровзвеси вспучивающегося полимера теплом горящего источника зажигания и теплом инициированного этим событием частичного выгорания пыли. Окончательное заключение о взрывоопасности вспучивающегося полимера следует сделать на основании крупномасштабного исследования в камере объемом 1 м³ с источником зажигания, имеющим запас химической энергии, равный 10 кДж [1].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Eckhoff R.K.* Dust explosions in the process industries. 3rd edition // Gulf Professional Publishing/Elsevier. Boston, 2003. 719 p. DOI: 10.1016/B978-075067602-1/50012-3
2. *Тетерин И.А., Копылов П.С., Копылов С.Н., Леончук П.А.* Методика определения давления взрыва газозвушного облака при выбросе сжиженного природного газа в открытое пространство // Горение и взрыв. 2025. № 18 (2–47). С. 30–40. DOI: 10.30826/CE25180204. EDN GXHGGP.
3. *Полетаев Н.Л.* Максимальный размер взрывоопасных частиц аэровзвеси железа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 33 (3). С. 5–10. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.5-10. EDN ZOEVPA.

4. Поletaев Н.Л. Оценка взрывоопасности ядерного графита в 1-м³ камере // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2022. № 31 (2). С. 15–21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21. EDN XHNOXH.
5. Поletaев Н.Л. Взрывоопасность аэрозвеси сухой молочной сыворотки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. № 32 (1). С. 51–56. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.51-56. EDN UGDHRZ.
6. Bartknecht W. Explosionen, Ablauf und Schutzmaßnahmen. Berlin, Springer-Verlag, 1980. 264 p. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_INFOCOMM_116_5000063735/
7. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Ng D.L., Conti R.S. Domains of flammability and thermal ignitability for pulverized coals and other dusts: Particle size dependences and microscopic residue analyses // Symposium (International) on Combustion. 1982. No. 19 (1). Pp. 1169–1180. DOI: 10.1016/s0082-0784(82)80293-2
8. Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справоч. в 2 кн.; кн. 2. М. : Химия, 1990. 384 с. EDN UXZQDH.
9. Поletaев Н.Л. Критерии взрывоопасности аэрозвеси // Пожарная безопасность. 2018. № 3. С. 49–60. EDN XYUTLV.
10. Поletaев Н.Л., Сазонов М.С., Контев М.Ю. Исследование взрывоопасности аэрозвеси свинца // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 33 (4). С. 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.5-12. EDN ONWNUS.
11. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2007. No. 20 (4–6). Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
12. Поletaев Н.Л., Сазонов М.С., Контев М.Ю. Особенности взрыва антрацита в 20-л камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 33 (2). С. 23–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31. EDN PYWDOT.
13. 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. No. 40 (4). Pp. 289–295. DOI: 10.1002/prs.12249. EDN PZFPTL.
14. Krietsch A., Scheid M. Test on suitability of a new pyrotechnical igniter for determination of explosion characteristics of dust clouds in 20-l-sphere and 1-m³-vessel // Science and Technology Energetic Materials. 2011. No. 72 (6). Pp. 174–178. URL: tem/Vol.72/No.6.04.html
15. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum Explosible Dust Concentrations Measured in 20-L and 1-m³ Chambers // Combustion Science and Technology. 1993. No. 87 (1–6). Pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213
16. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. М. : Наука, 1967. Т. I. С. 414. 576 с. URL: https://archive.org/details/B-001-038-324-ALL/Landsberg_I/
17. Dramićanin M. Luminescence Thermometry. Methods, Materials, and Applications. Chap. 1. Introduction to Measurements of Temperature. 2018. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/B978-0-08-102029-6.00001-4
18. Taveau J.R., Going J.E., Hochgreb S., Lemkowitz S.M., Roekaerts D.J.E.M. Igniter-induced hybrids in the 20-l sphere // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. No. 49 (8). Pp. 348–356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
19. Addai E.K., Clouthier M., Amyotte P., Safdar M., Krause U. Experimental investigation of limiting oxygen concentration of hybrid mixtures // Journal of Loss Prevention Process Industries. 2019. No. 57. Pp. 120–130. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.11.016
20. Friedrichova R., Karl J., Janovsky B. Preconditioning of Dust and Fluid in a 20 L Chamber During Ignition by a Chemical Ignitor // Fire. 2025. No. 8 (9). P. 336. DOI: 10.3390/fire8090336

REFERENCES

1. Eckhoff R.K. Dust explosions in the process industries. 3rd edition. Gulf Professional Publishing/Elsevier. Boston, 2003; 720. DOI: 10.1016/B978-075067602-1/50012-3
2. Teterin I.A., Kopylov P.S., Kopylov S.N., Leonchuk P.A. Method for determining the explosion pressure of a gas-air cloud during the release of liquefied natural gas into open space. *Combustion and Explosion*. 2025; 18(2-47):30-40. DOI: 10.30826/CE25180204. EDN GXHGGP. (rus).
3. Poletaev N.L. Maximum explosive particles size of iron air suspension. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):5-10. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.5-10. EDN ZOEVPA. (rus).
4. Poletaev N.L. Explosibility of nuclear graphite measured in a 1 m³ chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):15-21. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.15-21. EDN XHNOXH. (rus).
5. Poletaev N.L. Explosion hazard of whey powder mixed with air. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(1):51-56. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.51-56. EDN UGDHRZ. (rus).

6. Bartknecht W. *Explosionen, Ablauf und Schutzmaßnahmen*. Berlin, Springer-Verlag, 1980; 259. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_INFOCOMM_116_5000063735/
7. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Ng D.L., Conti R.S. Domains of flammability and thermal ignitability for pulverized coals and other dusts: Particle size dependences and microscopic residue analyses. *Symposium (International) on Combustion*. 1982; 19(1):1169-1180. DOI: 10.1016/s0082-0784(82)80293-2
8. Baratov A.N., Korolchenko A.Ya., Kravchuk G.N. Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing means : *handbook in 2 vol. Book 2*. Moscow, Khimiya, 1990. EDN UXZQDH. (rus).
9. Poletaev N.L. About criterion of dust explosibility. *Fire Safety*. 2018; 3:49-60. EDN XYUTLV. (rus).
10. Poletaev N.L., Sazonov M.S., Koptev M.Yu. Explosion hazard study of lead dust/air mixture. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):5-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.5-12. EDN ONWNUS. (rus).
11. 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(4-6):599-606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
12. Poletaev N.L., Sazonov M.S., Koptev M.Yu. Anthracite dust explosion specificities in 20 L chamber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):23-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31. EDN PYWDOT. (rus).
13. 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. EDN PZFPPTL.
14. Krietsch A., Scheid M. Test on suitability of a new pyrotechnical igniter for determination of explosion characteristics of dust clouds in 20-l-sphere and 1-m³-vessel. *Science and Technology Energetic Materials*. 2011; 72(6):174-178. URL: tem/Vol.72/No.6.04.html
15. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum Explosible Dust Concentrations Measured in 20-L and 1-m³ Chambers. *Combustion Science and Technology*. 1993; 87(1-6):157-171. DOI: 10.1080/00102209208947213
16. Landsberg G.S. *Elementary Textbook of Physics*. Moscow, Nauka, 1967; I(414):576. URL: https://archive.org/details/B-001-038-324-ALL/Landsberg_I/ (rus).
17. Dramićanin M. *Luminescence Thermometry. Methods, Materials, and Applications. Chap. 1. Introduction to Measurements of Temperature*. 2018; 1-12. DOI: 10.1016/B978-0-08-102029-6.00001-4
18. 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 Process Industries*. 2017; 49:348-356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
19. Addai E.K., Clouthier M., Amyotte P., Safdar M., Krause U. Experimental investigation of limiting oxygen concentration of hybrid mixtures. *Journal of Loss Prevention Process Industries*. 2019; 57:120-130. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.11.016
20. Friedrichova R., Karl J., Janovsky B. Preconditioning of Dust and Fluid in a 20 L Chamber During Ignition by a Chemical Ignitor. *Fire*. 2025; 8(9):336; DOI: 10.3390/fire8090336

Поступила 16.09.2025, после доработки 20.10.2025;

принята к публикации 21.10.2025

Received September 16, 2025; Received in revised form October 20, 2025;

Accepted October 21, 2025

Информация об авторе

ПОЛЕТАЕВ Николай Львович, д.т.н., 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, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RSCI: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru