ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 2. С. 23–31
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(2):23-31

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.4

https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31

Особенности взрыва антрацита в 20-л камере

Николай Львович Полетаев[1] ✉, Михаил Сергеевич Сазонов[2], Михаил Юрьевич Коптев[2]

[1] 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

[2] Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», г. Кемерово, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Хорошо известен эффект «overdrive», когда аэровзвесь, проявившая взрывоопасность при тестировании в 20-л камере, оказывается безопасной по результатам более надежного тестирования в 1 м^3 камере. Завышение взрывоопасности пыли в 20-л камере объясняют предварительным нагревом свежей аэровзвеси пламенем энергоемкого (E_{ig}) источника зажигания. О возможности «overdrive» судят по такому признаку: при E_{ig} = 10 кДж индекс взрыва K_{st} < 4,5 МПа·м/с (Proust et al., 2007). Данная статья посвящена выявлению дополнительных признаков «overdrive» в 20-л камере на примере взрывобезопасного антрацита для снижения вероятности упомянутой выше качественной ошибки.
Анализ публикаций. Замечен случайный характер проявления взрывоопасности антрацита в широком диапазоне концентраций пыли при E_{ig} = 5 кДж (Cashdollar, Chatrathi, 1993). Наблюдаются две точки перегиба на восходящей ветви зависимости давления взрыва антрацита P от времени t, отвечающие сначала минимуму, а затем максимуму dP/dt соответственно. Все эти особенности могут являться признаками «overdrive» после экспериментальной проверки.
Антрацит и метод его исследования. Антрацит с содержанием летучих 2,7 % масс. исследован в 20-л камере Сивека, E_{ig} = 10 кДж, с видеосъемкой излучения через смотровое окно.
Результаты. Получены зависимости интенсивности излучения среды и давления в камере от времени в диапазоне концентраций пыли от 125 до 750 г/м^3.
Обсуждение и выводы. Подтверждены экспериментально и предложены три дополнительных признака эффекта «overdrive» для антрацита: вероятностный характер проявления взрывоопасности; две точки перегиба на восходящей ветви графика $P(t)$; заметное ослабление излучения среды после выгорания источника зажигания и до момента достижения нижней точки перегиба. Давление взрыва превышало 400 кПа и обусловлено, в основном, выгоранием связанного углерода.

Ключевые слова: уголь; взрывоопасность; камера Сивека; признаки «overdrive»; свечение пламени

Для цитирования: *Полетаев Н.Л., Сазонов М.С., Коптев М.Ю.* Особенности взрыва антрацита в 20-л камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 23–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31

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

Anthracite dust explosion specificities in 20 L chamber

Nikolay L. Poletaev[1] ✉, Mikhail S. Sazonov[2], Mikhail Yu. Koptev[2]

[1] 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

[2] Joint-Stock Company “Scientific Center of VOSTNII on Industrial and Environmental Safety in the Mining Industry”, Kemerovo, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The “overdrive” effect is well known, when dust/air mixture, explosive during testing in a 20 L chamber, turns out to be safe according to the results of more reliable testing in a 1-m^3 chamber. The overestimation of the dust explosion hazard in the 20 L chamber is explained by the preheating of the fresh dust/air mixture with the flame of an energy-intensive (E_{ig}) ignition source. The possibility of “overdrive” is judged by the following basis: at E_{ig} = 10 kJ, the explosion index K_{st} < 4.5 MPa·m/s (Proust et al., 2007). This paper is devoted to the identification of additional signs of “overdrive” in the 20 L chamber using the example of non-explosive anthracite to reduce the probability of the above-mentioned qualitative error.

© Н.Л. Полетаев, М.С. Сазонов, М.Ю. Коптев, 2024

Analysis of publications. The random nature of anthracite explosiveness over a wide range of dust concentrations at E_{ig} = 5 kJ was observed (Cashdollar, Chatrathi, 1993). Two inflection points on the ascending branch of the dependence of the anthracite explosion pressure P on time *t* are observed, corresponding first to the minimum and then to the maximum *dP/dt*, respectively. All these features may be signs of "overdrive" after experimental testing.
Anthracite and its research method. Anthracite with the volatile content of 2.7 % wt. was studied in a 20 L. Siwek chamber, E_{ig} = 10 kJ, with video recording of radiation through an observation window.
Results. Time dependences of the medium radiation intensity and the pressure in the chamber on time in the range of dust concentrations from 125 to 750 g/m^3 are obtained.
Discussion and conclusions. Three additional signs of the "overdrive" effect for anthracite were confirmed experimentally and proposed: probabilistic nature of the explosion hazard; two inflection points on the ascending branch of the graph *P*(*t*); noticeable weakening of the medium radiation after the ignition source burnout and before reaching the lower inflection point. The explosion pressure exceeded 400 kPa and was mainly caused by the burning of fixed carbon.

Keywords: coal; explosion hazard; Siwek chamber; overdrive signs; flame glow

For citation: Poletaev N.L., Sazonov M.S., Koptev M.Yu. Anthracite dust explosion in a 20 L chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):23-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.23-31 (rus).

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

Введение

Принято считать, что объективную информацию о взрывоопасности взвешенной в воздухе горючей пыли при условиях, близких к нормальным (давление P = 100 кПа, температура T = 298 К, содержание кислорода 20,6 % об.), следует получать на основе тестирования аэровзвеси в крупномасштабной взрывной камере объемом порядка 1 м^3 с энергоемким (10 кДж) пиротехническим источником зажигания (далее ИЗ) [1–3]. В связи с высокой трудоемкостью и значительной стоимостью подобных исследований в подавляющем большинстве лабораторий используют маломасштабные 20-л сферические взрывные камеры конструкции Р. Сивека [4–7], сохраняя по порядку величины энергию источника зажигания E_{ig} (от 2 до 10 кДж). Существенное снижение объема взрывной камеры при сохранении высокой энергии ИЗ вызывает предварительный нагрев исследуемой аэровзвеси, который способствует завышению взрывоопасности дисперсного материала в маломасштабных исследованиях [8–10]. Это, в частности, может привести к качественной ошибке при тестировании пыли на взрывоопасность в 20-л камере, а именно, взрывоопасная по результатам такого исследования пыль может в действительности оказаться взрывобезопасной по более надежным результатам исследования этой пыли в 1-м^3 камере. Подобный случай получил в научной литературе наименование «overdrive» [8].

К настоящему времени опубликованы сведения о единственном признаке проявления «overdrive» при тестировании пыли в 20-л камере [9], который сформулирован следующим образом. Если в 20-л камере Р. Сивека при использовании ИЗ с E_{ig} = 10 кДж получено значение нормированной скорости нарастания давления взрыва (индекса пожаровзрывоопасности) K_{st} < 4,5 МПа·м/с, то весьма вероятно, что данная пыль по результатам испытаний в камере объемом 1 м^3 будет признана невзрывоопасной. Выражение «весьма вероятно» предполагает, что данный признак не является абсолютно надежным. Поэтому представляется разумным искать дополнительные признаки проявления «overdrive» при тестировании пыли в 20-л камере для снижения вероятности качественной ошибки при оценке взрывоопасности пыли.

В данной работе выявление дополнительных признаков проявления «overdrive» производится на примере пыли антрацита, которая относится к невзрывоопасным материалам по результатам тестирования в 1-м^3 камере, но взрывается в 20-л камере при использовании ИЗ с энергией 5 кДж и более.

Анализ сообщений о взрывоопасности антрацита

Исследованию взрывоопасности аэровзвеси антрацита в режиме волнового распространения пламени или самовоспламенения посвящено много работ [8, 11–16]. Наиболее важная из них [8] выполнена в Горном Бюро США (US Bureau of Mines) при исследовании в 20-л взрывной камере антрацита, характеристики которого приводятся в первой строке табл. 1.

Антрацит не взрывался при E_{ig} = 2,5 кДж. При E_{ig} = 5 кДж образец проявил взрывоопасность, которая обладала следующей особенностью. В широком диапазоне концентраций горючего от 600 до 1200 г/м^3 проявление взрывоопасности носило случайный характер, при котором максимальное давление продуктов горения ИЗ и антрацита в единичном опыте P_m удовлетворяло одному из двух условий: 185 кПа ≤ P_m ≤ 300 кПа и 480 кПа ≤ P_m ≤ 620 кПа. Согласно [17], только второе из условий отвечает взрыву антрацита.

Таблица 1. Характеристики упомянутых в настоящей работе дисперсных материалов
Table 1. Characteristics of the dispersed materials mentioned in this paper

Образец Specimen	Средний размер частиц, мкм Average particle size, microns	Содержание, % масс. Content, mass %				Теплота сгорания, МДж/кг Heat of combustion, MJ/kg	Источник информации Source of information
		связанного углерода fixed Carbon	летучих volatile	золы ash	влаги moisture		
Антрацит Anthracite	40	79	8	11	2	29,7	[8]
Антрацит Anthracite	20	59	3,34	37,09	0,54	23,7	[12]
Алюминий Aluminum	34	–	–	–	–	31,0	[13]
Антрацит Anthracite	32	92,5	2,8	5,7	–	31,5	Настоящая работа This work

На рис. 1 приводится зависимость частоты проявления антрацитом взрывоопасности ϕ от концентрации антрацита C_s (г/м³) по данным [8]:

$$\phi(C_s) = N_{ex}(C_s)/N_{total}(C_s),$$

где $N_{ex}(C_s)$, $N_{total}(C_s)$ — число зарегистрированных взрывов и общее число выполненных опытов с антрацитом в диапазоне концентраций от (C_s – 50 г/м³) до (C_s + 50 г/м³) соответственно.

Случайный характер проявления антрацитом взрывоопасности объясняется, по-видимому, сочетанием следующих обстоятельств:

- наличие разброса (± 10 %) реальной энергии, выделяющейся при горении ИЗ [18];
- конкуренция двух процессов, один из которых способствует росту горючести антрацита (турбулентный перенос тепла от зоны, нагретой выгоранием ИЗ и примыкающей к нему аэровзвеси, на весь объем камеры [19]), а другой снижает зажигательную способность нагретой области среды из-за уменьшения ее максимальной температуры.

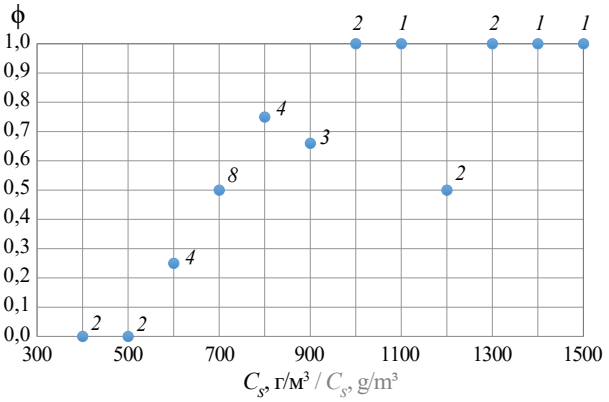

Рис. 1. Влияние концентрации антрацита C_s на частоту взрывов антрацита ϕ, равную отношению числа опытов со взрывом антрацита к общему числу опытов $N(C_s)$ в диапазоне от (C_s – 50 г/м³) до (C_s + 50 г/м³) по данным [8]. Над символом дискретного графика приводится значение $N(C_s)$
Fig. 1. The effect of anthracite concentration C_s on the frequency of anthracite explosions ϕ, equal to the ratio of the number of experiments with anthracite explosion to the total number of experiments $N(C_s)$ in the range from (C_s – 50 g/m³) to (C_s + 50 g/m³) according to [8]. The value $N(C_s)$ is given above the symbol of the discrete graph

Данное объяснение использует предположение о двухэтапном характере взрыва антрацита в 20-л камере: сначала аэровзвесь прогревается без существенного изменения давления среды, затем осуществляется воспламенение и выгорание аэровзвеси с энергичным ростом давления в камере. Двухэтапный характер взрыва антрацита с необходимостью порождает особенность для зависимости давления в камере P от времени t, которую можно продемонстрировать путем сравнения типичного графика $P(t)$, полученного для пыли, взрывоопасной при нормальных начальных условиях, с графиком $P(t)$ для антрацита (рис. 2 и 3 соответственно). Необходимо отметить, что в оригинальной работе [8] зависимость $P(t)$ для антрацита не приводится. Поэтому на рис. 2 представлен результат работы [11], полученный для условий эксперимента, близких к тем, которые имели место в [8].

Характеристики упомянутых дисперсных материалов приводятся в табл. 1.

На графиках рис. 2 и 3 основной интерес представляет форма восходящего участка зависимости $P(t)$ от момента начала срабатывания источника зажигания (точка *IG*) до момента достижения максимального давления (точка Max). Общим для обоих графиков является наличие точки перегиба *A*, отвечающей моменту достижения максимальной скорости изменения давления $(dP/dt)_{max}$. Отличие формы графика для антрацита состоит в наличии дополнительной точки перегиба *B*, отвечающей моменту достижения минимальной скорости изменения давления $(dP/dt)_{min}$. Как следует из рисунка, точка *B* расположена между точками *IG* и *A*.

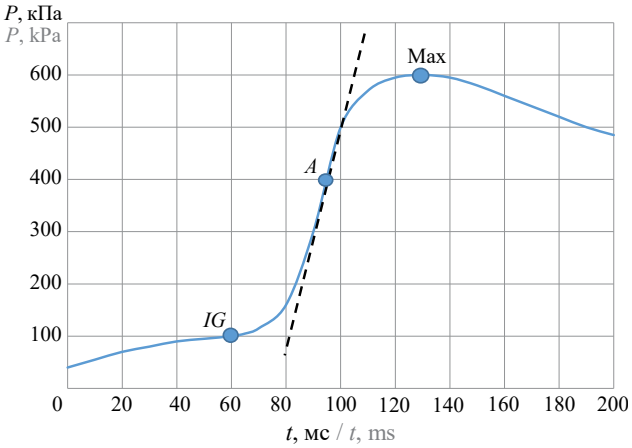

Рис. 2. Пример типичной зависимости абсолютного давления P, кПа, от времени t, мс, в 20-л камере при тестировании пыли, взрывоопасной при нормальных начальных условиях (аэровзвесь алюминия, 750 г/м^3, источник зажигания 5 кДж) [20]

Fig. 2. An example of typical dependence of absolute pressure P, kPa, on time t, ms, in a 20 L chamber when testing dust that is explosive under normal initial conditions (aluminium dust, 750 g/m^3, ignition source 5 kJ) [20]

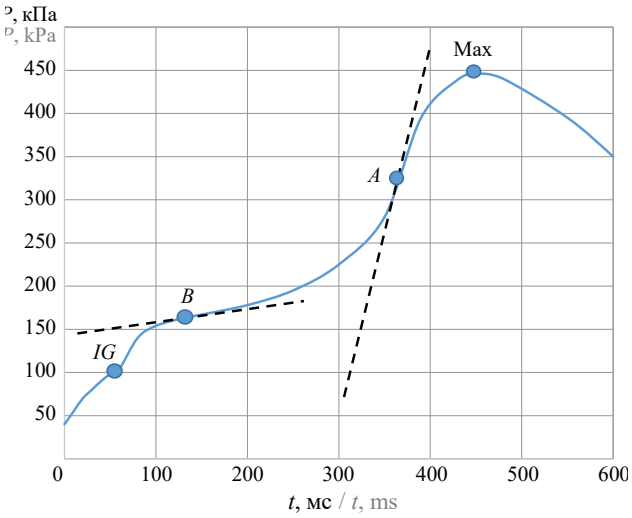

Рис. 3. Зависимость абсолютного давления P от времени t в 20-л камере (источник зажигания 5 кДж, концентрация антрацита 500 г/м^3) [12]

Fig. 3. Dependence of absolute pressure P on time t in a 20 L chamber (ignition source 5 kJ, anthracite concentration 500 g/m^3) [12]

Таким образом, особенностью взрыва пыли антрацита является наличие двух перегибов на восходящем участке зависимости $P(t)$. В то же время авторы работы [12] не упоминали о случайном характере проявления антрацитом взрывоопасности, что делает целесообразным дополнительное экспериментальное подтверждение этой особенности.

В связи с вышеизложенным проведены экспериментальные исследования взрывоопасности антрацита в 20-л камере с фиксацией характера проявления взрывоопасности, формы зависимостей $P(t)$ и визуальным восприятием зависимости интенсивности свечения среды в камере от времени. Результаты этого исследования излагаются ниже.

Объект исследования и экспериментальная установка

В качестве дисперсного материала был выбран антрацит, добытый на одной из шахт Кузбасса. Исследуемый образец антрацита был измельчен и высушен до постоянной массы. Его характеристики приводятся в последней строке табл. 1. Подробное распределение частиц образца по размерам, определенное анализатором Analysette 22 Microtec plus, приводится в табл. 2.

Для проведения исследования взрывоопасности антрацита использовалась установка со сферической 20-л взрывной камерой конструкции Р. Сивека [4]. Автоматизированная процедура единичного опыта состояла из последовательности следующих основных операций: частичной откачки камеры (до абсолютного давления 40 кПа), распыления импульсом сжатого воздуха навески пыли в объеме камеры с одновременным восстановлением атмосферного давления, зажигания образовавшейся аэровзвеси пиротехническим зарядом с запасом химической энергии 10 кДж фирмы Simex [18] и регистрации зависимости развивающегося в камере давления P от времени t. Методика единичного опыта подробно описана в [4] и соответствует европейским стан-

Таблица 2. Гранулометрический состав частиц антрацита

Table 2. Granulometric composition of anthracite particles

Фракция, мкм Fraction, microns	< 140	< 70	< 50	< 45	< 32	< 25	< 18	< 10	< 4	< 1
Содержание, % масс. Content, % wt.	100	90	80	60	50	40	30	20	10	2

дартам определения давления взрыва аэровзвеси[1] и максимальной скорости его нарастания[2].

Через смотровое окно взрывной камеры производилась видеозапись процессов срабатывания источника зажигания и последующего горения аэровзвеси с частотой 240 кадр/с. Просмотр видеозаписи с частотой 40 кадр/с позволял замедлить регистрируемые процессы для их более доступного визуального восприятия.

Экспериментальные результаты

Результаты семи опытов с антрацитом, проведенных в рамках настоящей работы, представлены в табл. 3. Графики $P(t)$ для каждого из 7 опытов и для случая выгорания ИЗ в отсутствие пыли приводятся на рис. 4. Для опыта № 6 на рис. 5 приводятся отдельные кадры видеосъемки процесса через смотровое окно в камере.

Таблица 3. Показатели тестирования антрацита
Table 3. Anthracite testing indicators

Номер опыта Experiment Number	C_s, г/м³ C_s, g/m³	P_{max}, кПа P_{max}, kPa	K_{st}, МПа·м/с K_{st}, MPa·m/s	Вывод Output
1	125	80	0	Нет взрыва No explosion
2	250	90	0	Нет взрыва No explosion
3	250	550	1,0	Взрыв Explosion
4	500	100	0	Нет взрыва No explosion
5	500	550	1,5	Взрыв Explosion
6	500	430	1,2	Взрыв Explosion
7	750	490	1,2	Взрыв Explosion

Примечание: C_s — начальная концентрация антрацита в аэровзвеси; P_{max} — максимальное избыточное давление (по отношению к атмосферному давлению 100 кПа); K_{st} — нормированная максимальная скорость изменения давления в камере (индекс пожаровзрывоопасности).

Note: C_s is the initial concentration of anthracite in the air suspension; P_{max} is the maximum overpressure (relative to atmospheric pressure of 100 kPa); K_{st} is the normalized maximum rate of pressure rise in the chamber (explosion index).

[1] EN 14034-1:2004+A1. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 1: Determination of the maximum explosion pressure p_{max} of dust clouds, January 2011.

[2] EN 14034-2:2006+A1. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dp/dt)_{max}$ of dust clouds, January 2011.

Обсуждение результатов

Согласно данным табл. 3, во всех опытах с антрацитом в 20-л камере и источником зажигания, имеющим энергию 10 кДж, имело место неравенство $K_{st} \le 1{,}5$ МПа м/с. Поскольку антрацит не взрывается в условиях крупномасштабных испытаний, отмеченное неравенство не противоречит известному эмпирическому правилу о возможности возникновения «overdrive» [8].

Данные табл. 3 выявляют особенность проявления «overdrive», которая заключается в наличии вероятностного проявления взрывоопасности антрацита, по крайней мере, в диапазоне концентраций пыли C_s от 250 до 500 г/м³. В этом диапазоне сосуществуют два графика зависимости $P_{max}(C_s)$: график «нет взрыва» и график «взрыв», разделенные зазором, превышающим 300 кПа. В отличие от аналогичного результата, полученного в [8] (см. рис. 1), нижняя граница диапазона C_s, относящегося к графику «взрывов», простирается до меньших значений концентрации пыли. Последнее разумно объяснить использованием в данной работе более энергоемкого источника зажигания (10 против 5 кДж в [8]), что с необходимостью влечет снижение нижнего концентрационного предела распространения пламени.

Низкое содержание летучих в исследованном антраците (2,8 % масс.) исключает возникновение избыточного давления продуктов горения 550 кПа при концентрации аэровзвеси 250 г/м³ (табл. 3, строка 3) только за счет выгорания летучих. Макси-

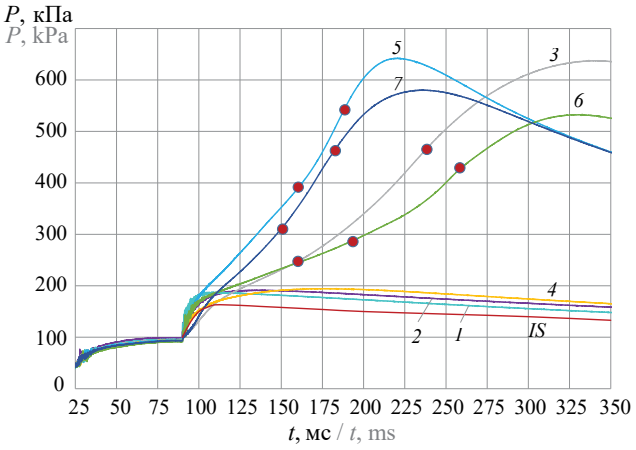

Рис. 4. Зависимость абсолютного давления в 20-л камере P, кПа, от времени t, мс, для опытов с антрацитом. Номер зависимости совпадает с номером опыта из табл. 3. Жирными точками отмечены два перегиба на каждом из графиков зависимости. *IS* — график $P(t)$ для случая выгорания источника зажигания в отсутствие пыли
Fig. 4. Absolute pressure in the 20 L chamber P, kPa, dependence on the time t, ms, for experiments with anthracite. The number of the dependency coincides with the number of the experiment from the Table 3. Two inflections on each of the dependency graphs are marked with bold dots. *IS* — the graph $P(t)$ for the case of ignition source burnout in the absence of dust

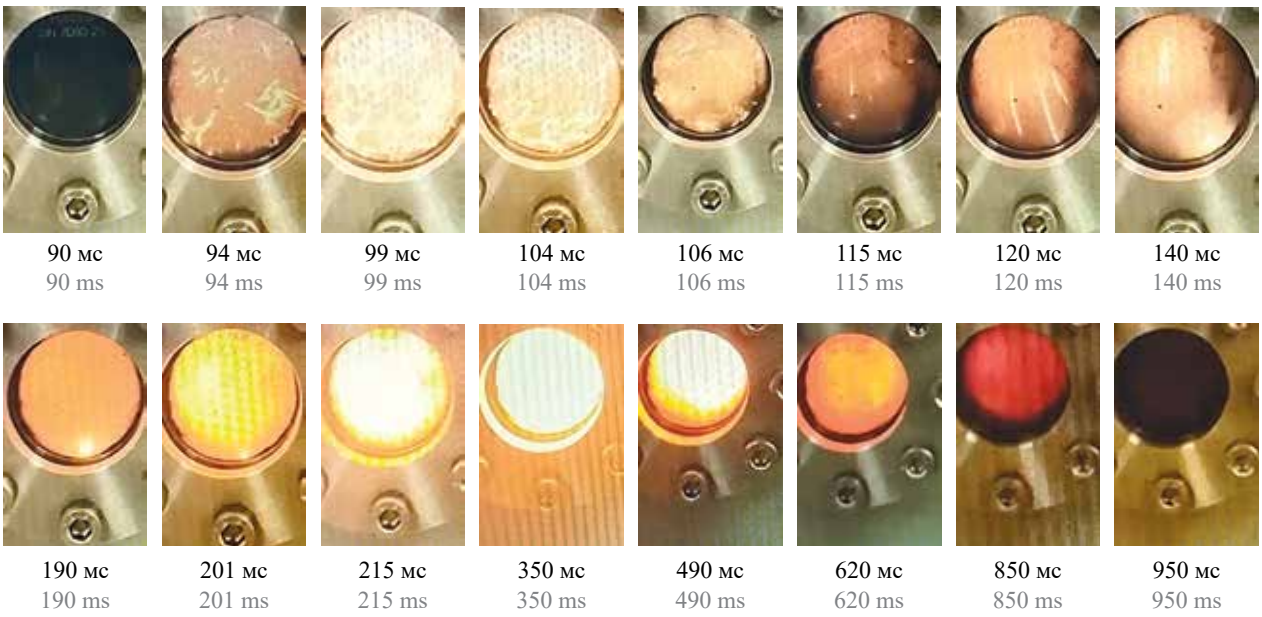

Рис. 5. Кадры видеосъемки свечения из смотрового окна камеры на протяжении опыта № 6 от момента инициирования источника зажигания (t = 90 мс) до момента завершения свечения (t = 950 мс)
Fig. 5. Video footage of the glow from the camera viewing window during experiment No. 6 from the moment of ignition source initiation (t = 90 ms) to the moment of glow completion (t = 950 ms)

мальный вклад выгорания летучих в этом случае можно оценить величиной порядка 80 кПа. Таким образом, взрыв антрацита обеспечивался выгоранием связанного углерода.

Согласно данным рис. 4, на восходящем участке всех графиков $P(t)$, относящихся к взрыву антрацита, можно заметить два перегиба. Верхний перегиб является типичным для результатов тестирования пылей, поскольку отвечает моменту достижения максимальной скорости изменения давления $(dP/dt)_{max}$ и относится к этапу относительно быстрого развития взрыва. Нижний перегиб является особенностью проявления эффекта «overdrive» и формально характеризует окончание этапа сравнительно медленного развития взрыва, который берет начало от момента полного выгорания источника зажигания.

На рис. 5 приводятся кадры видеосъемки свечения из смотрового окна камеры для опыта № 6. Согласно данным рис. 5, промежуток времени, на котором происходит ослабление свечения после вспышки источника зажигания, составляет интервал (115 с … 190 с). Промежуток времени от момента полного выгорания источника зажигания (110 с) до нижней точки перегиба (180 с) составляет примерно такой же интервал. Таким образом, этап относительно медленной подготовки энергичного взрыва близок по времени с проявлением другой особенности рассматриваемого процесса, а именно с резким ослаблением интенсивности свечения из смотрового окна камеры.

Выводы

Выполнены исследования взрывоопасности пыли антрацита в 20-л камере Сивека с пиротехническим источником зажигания фирмы Simex (2 × 5 кДж). Показано, что в упомянутых условиях исследования возможен взрыв антрацита. Поскольку антрацит не взрывоопасен в условиях крупномасштабных испытаний, следует признать, что условия настоящей работы приводят к эффекту «overdrive» из-за предварительного нагрева исследуемой аэровзвеси вследствие выгорания источника зажигания и расположенного в его окрестности антрацита.

Результаты работы подтвердили известную особенность возможного возникновения эффекта «overdrive»: индекс взрывоопасности антрацита K_{st} не превышает 4,5 МПа м/с.

В диапазоне концентраций антрацита от 250 до 500 г/м^3 подтверждается впервые описанный в [8] вероятностный характер проявления взрывоопасности антрацита, что позволяет считать это обстоятельство второй особенностью возникновения «overdrive».

Третья особенность возникновения «overdrive» для антрацита состоит в появлении дополнительной (нижней) точки перегиба на графике зависимости давления в камере P от времени t.

Четвертая особенность возникновения «overdrive» для антрацита состоит в резком ослаблении интенсивности излучения среды в камере на промежутке времени от момента полного выгорания источника зажигания до появления нижней точки перегиба на графике $P(t)$.

Наблюдавшиеся в эксперименте взрывы антрацита обеспечивались, в основном, выгоранием связанного углерода. Вклад летучих в давление взрыва не превышал 15 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Eckhoff R.K.* Dust explosions in the process industries : 3rd ed. Boston : Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003. 720 p.
2. *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^3 test chambers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
3. *Huéscar Medina C., MacCoitir B., Sattar H., Slatter D.J.F., Phylaktou H.N., Andrews G.E. et al.* Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m^3 dust explosion equipment // Fuel. 2015. Vol. 151. Pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.009
4. *Cesana C., Siwek R.* Operating instructions 20-l-apparatus. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden. 2009.
5. *Zlochower I.A., Sapko M.J., Perera I.E., Brown C.B., Harris M.L., Rayyan N.S.* Influence of specific surface area on coal dust explosibility using the 20-L chamber // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 54. Pp. 103–109. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.03.004
6. *Liu S.-H., Cheng Y.-F., Meng X.-R., Ma H.-H., Song S.-X., Liu W.-J. et al*. Influence of particle size polydispersity on coal dust explosibility // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 56. Pp. 444–450. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.10.005
7. *Zhang J., Sun L., Nie F., Zhou H*. Effects of particle size distribution on the explosion severity of coal dust. Energy sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2019. Pp. 1–11. DOI: 10.1080/15567036.2019.1654562
8. *Cashdollar K.L., Chatrathi K.* Minimum Explosible dust concentrations measured in 20-l and 1-m^3 chambers // Combustion Science and Technology. 1993. Vol. 87. Pp. 157–171. DOI: 10.1080/00102209208947213
9. *Proust Ch., Accorsi A., Dupont L.* Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m^3 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
10. *Cloney C.T., Amyotte P.R., Khan F.I., Ripley R.C.* Development of an organizational framework for studying dust explosion phenomena // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014. Vol. 30. Pp. 228–235. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.002
11. *Ren K., Guo Y., Huang W., Wei A., Wu D*. Explosion characteristics of coal dusts in O_2/N_2 ambience: A novel method to determine limiting oxygen concentration // Fuel. 2022. Vol. 324. P. 124673. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124673
12. *Zhao P., Schmidt M., Krause U., Duan Q., Krietsch A., Wu D.* Experimental study on the minimum explosion concentration of anthracite dust: The roles of O_2 mole fraction, inert gas and CH_4 addition // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 71. P. 104490. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104490
13. *Tan X., Schmidt M., Zhao P., Wei A., Huang W., Qian X. et al*. Minimum ignition temperature of carbonaceous dust clouds in air with CH_4/H_2/CO below the gas lower explosion limit // Fuel. 2020. Vol. 264. P. 116811. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116811
14. *Wang J., Meng X., Zhang Y., Chen H., Liu B.* Experimental study on the ignition sensitivity and explosion severity of different ranks of coal dust // Shock and Vibration. 2019. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2019/2763907
15. *Thakur P.* Gas and dust explosions // Advanced mine ventilation. 2019. Pp. 377–398. DOI: 10.1016/b978-0-08-100457-9.00023-7
16. *Zhao P., Tan X., Schmidt M., Wei A., Huanga W., Qian X. et al.* Minimum explosion concentration of coal dusts in air with small amount of CH_4/H_2/CO under 10-kJ ignition energy conditions // Fuel. 2020. Vol. 260. P. 116401. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116401
17. *Полетаев 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
18. *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-m^3-vessel // Sci. Tech of Energetic Materials. 2011. Vol. 72. No. 6. Pp. 174–178.
19. *Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A.* On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing: Comparison between 20 L and 1 m^3 explosion vessels // Proc. Safety Prog. 2021. P. e12249. DOI: 10.1002/prs.12249
20. *Guo Y., Ren K., Huang W., Wu D*. An alternative explosion criterion of combustible dusts based on combustion duration time: Applications for minimum explosion concentration and limiting oxygen concentration // Powder Technology. 2022. Vol. 409 (1). P. 117851. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117851

REFERENCES

1. Eckhoff R.K. Dust explosions in the process industries: 3rd ed. *Gulf Professional Publishing/Elsevier*. Boston, 2003; 720.
2. 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^3 test chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2019; 62:103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937
3. Huéscar Medina C., MacCoitir B., Sattar H., Slatter D.J.F., Phylaktou H.N., Andrews G.E. et al. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m^3 dust explosion equipment. *Fuel*. 2015; 151:91-101. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.009
4. Cesana C., Siwek R. *Operating Instructions 20-l-Apparatus. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden*. 2009.
5. Zlochower I.A., Sapko M.J., Perera I.E., Brown C.B., Harris M.L., Rayyan N.S. Influence of specific surface area on coal dust explosibility using the 20-L chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2018; 54:103-109. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.03.004
6. Liu S.-H., Cheng Y.-F., Meng X.-R., Ma H.-H., Song S.-X., Liu W.-J. et al. Influence of particle size polydispersity on coal dust explosibility. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 56:444-450. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.10.005
7. Zhang J., Sun L., Nie F., Zhou H. *Effects of particle size distribution on the explosion severity of coal dust. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.* 2019; 1-11. DOI: 10.1080/15567036.2019.1654562
8. Cashdollar K.L., Chatrathi K. Minimum Explosible dust concentrations measured in 20-l and 1-m^3 chambers. *Combustion Science and Technology.* 1993; 87:157-171. DOI: 10.1080/00102209208947213
9. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the "20 l sphere" and with the standard "ISO 1 m^3 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
10. Cloney C.T., Amyotte P.R., Khan F.I., Ripley R.C. Development of an organizational framework for studying dust explosion phenomena. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014; 30:228-235. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.002
11. Ren K., Guo Y., Huang W., Wei A., Wu D. Explosion characteristics of coal dusts in O_2/N_2 ambience: A novel method to determine limiting oxygen concentration. *Fuel.* 2022; 324:124673. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124673
12. Zhao P., Schmidt M., Krause U., Duan Q., Krietsch A., Wu D. Experimental study on the minimum explosion concentration of anthracite dust: The roles of O_2 mole fraction, inert gas and CH_4 addition. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2021; 71:104490. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104490
13. Tan X., Schmidt M., Zhao P., Wei A., Huang W., Qian X. et al. Minimum ignition temperature of carbonaceous dust clouds in air with $CH_4/H_2/CO$ below the gas lower explosion limit. *Fuel.* 2020; 264:116811. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116811
14. Wang J., Meng X., Zhang Y., Chen H., Liu B. Experimental study on the ignition sensitivity and explosion severity of different ranks of coal dust. *Shock and Vibration.* 2019; 1-11. DOI: 10.1155/2019/2763907
15. Thakur P. Gas and dust explosions. *Advanced Mine Ventilation*. 2019; 377-398. DOI: 10.1016/b978-0-08-100457-9.00023-7
16. Zhao P., Tan X., Schmidt M., Wei A., Huanga W., Qian X. et al. Minimum explosion concentration of coal dusts in air with small amount of $CH_4/H_2/CO$ under 10-kJ ignition energy conditions. *Fuel*. 2020; 260:116401. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116401
17. Poletaev N.L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2017; 26(6):5-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20 (rus).
18. 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-m^3-vessel. *Sci. Tech of Energetic Materials*. 2011; 72(6):174-178.
19. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing: Comparison between 20 L and 1 m^3 explosion vessels. *Proc Safety Prog*. 2021; e12249. DOI: 10.1002/prs.12249
20. Guo Y., Ren K., Huang W., Wu D. An alternative explosion criterion of combustible dusts based on combustion duration time: Applications for minimum explosion concentration and limiting oxygen concentration. *Powder Technology.* 2022; 409(1):117851. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117851

Поступила 20.11.2023, после доработки 08.12.2023;
принята к публикации 14.12.2023
Received November 20, 2023; Received in revised form December 8, 2023;
Accepted December 14, 2023

Информация об авторах

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

САЗОНОВ Михаил Сергеевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Россия, 650002, Кемеровская обл., Кузбасс, Кемеровский г.о.; г. Кемерово, ул. Институтская, 3, помещ. 1; РИНЦ ID: 543411; ORCID: 0000-0001-9000-7115; e-mail: m.sazonov@nc-vostnii.ru

КОПТЕВ Михаил Юрьевич, и.о. заведующего лабораторией борьбы с пылью и пылевзрывозащиты, Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Россия, 650002, Кемеровская обл., Кемеровский г.о.; г. Кемерово, ул. Институтская, 3, помещ. 1; РИНЦ ID: 893607; ORCID: 0009-0004-3812-9747; e-mail: m.koptev@nc-vostnii.ru

Вклад авторов:

Полетаев Н.Л. — *научное руководство; концепция исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.*

Сазонов М.С., Коптев М.Ю. — *эксперимент.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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, VNIIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Mikhail S. SAZONOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Joint-Stock Company "Scientific Center of VOSTNII on Industrial and Environmental Safety in the Mining Industry", Institutskaya, 3, room 1, Kemerovo, Kemerovo Region, Kuzbass, 650002, Russian Federation; ID RISC: 543411; ORCID: 0000-0001-9000-7115; e-mail: m.sazonov@nc-vostnii.ru

Mikhail Yu. KOPTEV, Senior Researcher, Joint-Stock Company "Scientific Center of VOSTNII on Industrial and Environmental Safety in the Mining Industry", Institutskaya, 3, room 1, Kemerovo, Kemerovo Region, Kuzbass, 650002, Russian Federation; ID RISC: 893607; ORCID: 0009-0004-3812-9747; e-mail: m.koptev@nc-vostnii.ru

Contribution of the authors:

Nikolay L. POLETAEV — *scientific guidance; research concept; writing the source text; final conclusions.*

Mikhail S. SAZONOV, Mikhail Yu. KOPTEV — *an experiment.*

The authors declare that there is no conflict of interest.