

УДК 622.814-047.37

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2018

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ КАМЕННОУГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

В.А. Родионов¹, З.А. Абиев¹, С.Я. Жихарев²

Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС РФ (196105, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 149)

¹Санкт-Петербургский горный университет (199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, 2)

²Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

METHODOLOGY FOR INVESTIGATION OF STONE DUST COMBUSTION AND DETONATION PROCESSES IN MINING

Vladimir A. Rodionov, Zaur A. Abiev¹, Sergey Ya. Zhikharev²

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovskiy av., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

¹Saint-Petersburg Mining University (2 21st Line, Vasilyevskiy island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation)

²Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78 Sibirskaya st., Building A, Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 27.11.2017. Принята / Accepted: 12.02.2018. Опубликовано / Published: 30.03.2018

Ключевые слова:

взрыв, скорость нарастания давления взрыва, угольная пыль, давление взрыва, горение, аэрозоль, дефлаграция, детонация.

Key words:

explosion, explosion pressure increase rate, coal dust, explosion pressure, combustion, aerosol, deflagration, detonation.

Приведены результаты исследования процессов детонационного горения каменноугольной пыли, полученные с помощью апробированной авторами методики, сущность которой заключается в использовании конкретной фракции каменноугольной пыли для исследования давления взрыва, скорости нарастания давления взрыва и трансформационного коэффициента. Он позволяет применить результаты лабораторного эксперимента к фактическим данным взрыва и горения пылегазовоздушных смесей горных выработок, имеющих значительно больший объем, т.е. дает возможность спрогнозировать скорость нарастания давления взрыва применительно к конкретным горным выработкам угольных шахт.

Методика исследования процессов горения и детонации, кратко описанная в статье, основана как на требованиях современных нормативно-правовых документов, так и на практическом опыте научно-исследовательских институтов, занимающихся аналогичными исследованиями. В основу практической составляющей методики положена установка, представляющая собой взрывную камеру сгорания в виде сферы объемом 20 л.

Данные процесса детонационного горения обработаны с помощью прикладного программного обеспечения и представлены в графическом виде на трех рисунках. Наглядно показано влияние дисперсионного состава каменноугольной пыли на давление взрыва, скорость нарастания давления при взрыве и трансформационный коэффициент. Научно-исследовательская работа проводилась с образцом каменного угля марки КС, пласт Мощный, шахта им. Дзержинского.

В результате анализа цифровых и графических данных, полученных в ходе обработки, доказано, что наиболее взрывоопасной каменноугольной пылью является пыль фракционного состава 63–94 мкм. Выявлен неоднозначный эффект изменения скорости нарастания давления взрыва в зависимости от концентрации пыли в реакционном объеме установки, а именно наблюдалось два максимума скорости нарастания давления взрыва, один при 100 г/м³ и второй при 400 г/м³. Полученные результаты определения скорости нарастания давления взрыва показали необходимость нетривиального, более тщательного подхода к ее исследованию и, как следствие, к определению трансформационного коэффициента. Кроме того, анализ экспериментальных данных, приведенных в настоящей статье, подтвердил, что при разработке эффективных средств огнепреграждения и взрывоподавления, применяемых в автоматических средствах локализации взрыва, необходимо проводить дальнейшие исследования с фракцией каменноугольной пыли, равной 63–94 мкм. Полученные в работе результаты позволят перейти к изучению процессов детонационного горения в пылевоздушной среде содержащей метан.

The paper presents results of the study of processes of coal dust detonation combustion obtained using a technique approved by the authors. The essence of the technique is the use of a specific coal dust fraction to study the explosion pressure, explosion pressure increase rate and transformation coefficient. It allows applying the results of a laboratory experiment to the actual data of explosion and combustion of dust and gas mixtures of mines that have a much larger volume. In other words it allows predicting the explosion pressure increase rate in relation to specific excavation of coal mines.

The methodology for studying combustion and detonation processes, briefly described in the article, is based both on requirements of modern regulatory documents and the practical experience of research institutes engaged in similar research. The practical component of the method is based on an installation which represents an explosive combustion chamber in the form of a sphere with a volume of 20 liters.

The data of detonation combustion are processed using application software and presented graphically in three figures. It is shown that dispersion composition of coal dust influences on the explosion pressure, explosion pressure increase rate and transformation coefficient. Research work is carried out with a sample of coal of KS-type from a thick seam of the mine named after Dzerzhinskiy.

As a result of the analysis of digital and graphic data obtained during processing, it is proved that dust with fractional composition of 63–94 μm is the most explosive. It is revealed that explosion pressure increase rate changes as a function of dust concentration in the installation reaction volume in the way that there was two maxima of the explosion pressure increase rate where one was at 100 g/m³ and the second at 400 g/m³. The results obtained during determination of the explosion pressure increase rate have shown the necessity of a non-trivial, more thoughtful approach to study explosion pressure increase and, consequently, determine the transformation coefficient. In addition, analysis of the experimental data presented in the article confirmed that during the development of means of flame retardation and explosion suppression used in automatic means for explosion localization it is necessary to carry out further investigations with the coal dust fraction equal to 63–94 μm. The results obtained in the work will allow starting the study of the processes of detonation combustion in a dusty air containing methane.

Родионов Владимир Алексеевич – докторант факультета подготовки кадров высшей квалификации (моб. тел.: +007 921 325 83 97, e-mail: 79213258397@mail.ru). Контактное лицо для переписки.

Абиев Зaur Агадлович – аспирант кафедры взрывного дела (моб. тел.: +007 921 393 94 89, e-mail: abievzaur@gmail.com)

Жихарев Сергей Яковлевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник (моб. тел.: +007 921 325 83 97, e-mail: perevoloki55@mail.ru).

Vladimir A. Rodionov – Doctoral student at the Faculty of the Highest Qualification Personnel Training (mob. tel.: +007 921 325 83 97, e-mail: 79213258397@mail.ru). The contact person for correspondence.

Zaur A. Abiev – PhD student at the Department of Blasting (mob. tel.: +007 921 393 94 89, e-mail: abievzaur@gmail.com).

Sergey Ya. Zhikharev – Doctor of Engineering, Senior Research Fellow (mob. tel.: +007 921 325 83 97, e-mail: perevoloki55@mail.ru).

Введение

В настоящее время борьба с взрывами метана и угольной пыли – одна из актуальнейших проблем обеспечения безопасных условий труда в угольных шахтах. Известно, что при неудовлетворительном состоянии средств пылевзрывозащиты даже локальные взрывы метана или взвешенной угольной пыли, возникшие в каком-либо месте горных выработок, способны распространиться на значительное расстояние [1–5].

В последние годы в результате интенсификации угледобычи, при всё усложняющихся горно-геологических и горно-технических условиях резко увеличилось пылеобразование и газообильность шахт, что привело к повышенной опасности взрывов [2, 6–10].

Научно-технические сведения, приведенные в работах [10, 11], а также вышеперечисленные факторы подтверждают необходимость своевременного определения детонационных свойств каменноугольной пыли (КУП), образующейся в современных условиях шахтной угледобычи. После этого необходимо, с учетом особенностей процесса детонации каменноугольной пыли, научно обосновать выбор устройств подавления поражающих факторов взрыва (фронт пламени/ударная волна и др.), содержащих высокоэффективные средства пожаротушения/взрывоподавления [9, 11].

Цель работы – исследование процессов горения и детонации каменноугольной пыли в горных выработках для определения максимального давления взрыва, скорости нарастания давления при взрыве и трансформационного коэффициента, позволяющего соотнести результаты лабораторных исследований с шахтным пространством.

Объект исследования

Объектом исследования служили образцы каменного угля марки КС пласта Мощный

шахты имени Дзержинского, которая отнесена к сверхкатегорной по пыли и газу. Пласт Мощный относится к весьма склонным к самовозгоранию пластам. Минимальный выход летучих веществ в углях всех пластов на поле шахты составляет 17,3 %. Согласно «Единым правилам безопасности» пыль с выходом летучих веществ > 10 % является взрывоопасной [10, 12].

При выполнении исследования процессов горения и детонационных свойств каменноугольной пыли работали с образцами фракционного состава 63–94 мкм. Выбор данного фракционного состава не случаен и объясняется данными, приведенными в работах [10, 13–17], где показано, что КУП данного фракционного состава наиболее взрывопожароопасна и образуется в большем количестве в процессе добычи каменного угля (при его размоле).

Методы и методики исследования

При выполнении научно-исследовательской работы, результаты которой изложены в настоящей статье, применяли апробированный авторами статьи метод, изложенный в [13, 18]. Кроме того, учитывали требования и рекомендации по применению методик оценки взрывопожароопасных свойств каменноугольных пылевоздушных аэрозолей, содержащиеся в работах других авторов [14, 19–26].

Лабораторные исследования процессов детонационного горения каменноугольного воздушного аэрозоля проводили на установке, сделанной на основании австрийской лицензии Институтом промышленной взрывозащиты (Китай), установленной в Санкт-Петербургском горном университете.

Внешний вид установки представлен на рис. 1.

Методика (общий алгоритм) проведения лабораторного исследования заключается в том, что в закрытой камере сгорания установки,



Рис. 1. Внешний вид установки: 1 – загрузочное устройство (пылеотборник объемом 0,6 дм³); 2 – смотровое окошко; 3 – рабочая камера с внутренним объемом 20 л; 4 – держатели и запорный механизм 20-литровой сферы (рабочей камеры); 5 – манометр; 6 – токопроводы (держатели химического воспламенителя); 7 – выходное отверстие воды

представленной на рис. 1, формируется аэрозоль каменноугольной пыли, подаваемой одновременно с помощью сжатого воздуха под давлением 2 МПа.

Основными технологическими операциями при проведении испытаний являются:

- подготовка образца (измельчение каменного угля до рабочей фракции, т.е. размол на вибрационной конусной мельнице-дробилке, применяли ВКМД-10);
- гранулометрический рассев (получение требуемой фракции с размером частиц КУП в диапазоне 63–94 мкм);
- сушка до воздушно-сухого состояния;
- отбор пробы методом квартования для взвешивания и получения требуемой массы образца;
- загрузка образца КУП в загрузочное устройство установки;
- проведение испытаний согласно инструкции к установке и данным авторов [24, 25].

Согласно методикам, изложенным в [19–21], воспламенение пылевоздушной смеси рекомендовано проводить с задержкой 60 мс.

В качестве химических воспламенителей, выбранных с учетом рекомендаций [22, 23], применяли состав массой 2,4 г.

Основными компонентами химических воспламенителей были циркониевый порошок, нитрат и оксид бария. Количество воспламенителей, одновременно задействованных в установке, составляло две штуки. Они (воспламенители) позволяли получать общую энергию, равную 10 кДж.

Давление, создаваемое двумя такими воспламенителями, составляло $0,19 \pm 0,01$ МПа.

Результаты воспламенения образовавшегося внутри рабочей камеры каменноугольного пылевоздушного аэрозоля заданной концентрации, а именно давление взрыва и скорость нарастания давления взрыва, автоматически фиксировались системой обработки данных.

После проведения испытания анализировали график динамики изменения давления в полости 20-литрового шара (взрывной камеры). В качестве примера на рис. 2 представлен график испытаний взрывоопасных характеристик одного из образцов каменноугольной пыли с определяемыми параметрами.

Давление взрыва P_{ex} – максимальное избыточное давление, возникающее при дефлаграционном сгорании газо-, паро- или пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,3 кПа, определяемое как среднее арифметическое по результатам трех испытаний.

Время сгорания t_1 – разница во времени между активацией воспламенения и пунктом кульминации.

Индукционное время t_2 – разница во времени между активацией воспламенения и пересечением изгиба касательной с 0 МПа линией.

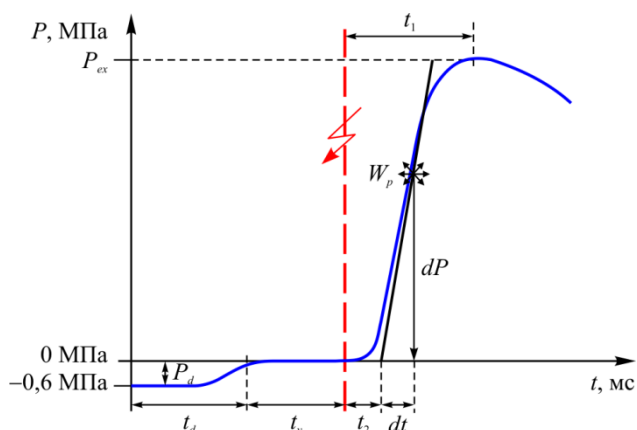


Рис. 2. График изменения давления (P , МПа) в течение времени (t , мс) горения пылегазовой смеси во взрывной камере: P_d – давление разрежения камеры сгорания; P_{ex} – давление взрыва; t_d – временная задержка выпускного клапана; t_1 – время сгорания; t_2 – индукционное время; t_v – время задержки воспламенения; W_p – точка перегиба в возрастающей части кривой давления; dP/dt – скорость нарастания давления при взрыве

Давление разрежения камеры сгорания P_d – разница между «предварительным вакуумом» и нормальным давлением (стандартная величина $-0,55$ – $0,7$ МПа).

Временная задержка выпускного клапана t_d – время между электрической активацией клапана и началом повышения давления в приборе (должна быть в диапазоне 30 – 50 мс).

Время задержки воспламенения t_v влияет на степень турбулентности (важный исходный параметр).

W_p – точка перегиба в возрастающей части кривой давления.

Скорость нарастания давления при взрыве dP/dt – отношение приращения давления, развиваемого при взрыве в замкнутом сосуде, к интервалу времени, в течение которого это приращение произошло. Значение скорости нарастания давления взрыва применяется при разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов. Определяется как максимум наклона касательной в точке перегиба W_p в возрастающей части кривой роста давления во времени.

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты обрабатывались с помощью прикладного программного обеспечения, и по полученным данным строились график зависимости изменения давления взрыва угольной пыли от концентрации и времени детонационного горения пылегазовой смеси (рис. 3, а), а также графики изменения давления взрыва и скорости нарастания давления взрыва от времени (рис. 3, б) (график давление – время (Pressure – Time)).

При определении зависимости изменения давления взрыва от концентрации и скорости нарастания взрыва от концентрации КУП

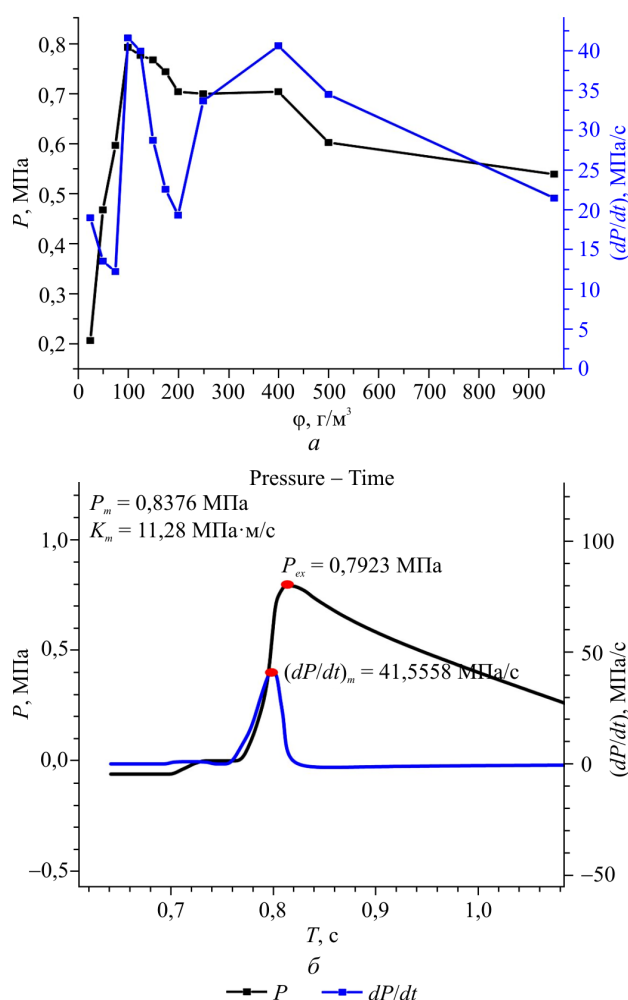


Рис. 3. График изменения давления взрыва P и скорости нарастания давления взрыва dP/dt : а – от концентрации каменноугольной пыли ϕ в 20-литровом объеме сферы (взрывной камеры); б – от времени T

в объеме взрывной камеры мы применили рекомендованный шаг по массовому количеству пыли, необходимому для создания в объеме 20-литровой сферы той или иной концентрации. Например, при малых концентрациях мы применяли шаг, не превышающий 50 % от первоначального значения, а при высоких концентрациях – равный 50 %, на последнем этапе – более 50 % от первоначального значения. В соответствии с применённой нами методикой, основанной на данных [13, 18, 19–21], и с учетом сведений, содержащихся в работах [27–29], получили результаты, представленные в таблице.

Результаты эксперимента по возникновению детонационного горения (взрыва) в объеме 20-литровой сферы при ее поджоге химическим воспламенителем с энергией 10 кДж

№ опыта	Концентрация пыли, г/м ³	Взрыв
1	25	Нет
2	50	Да
3	75	Да
4	100	Да
5	125	Да
6	150	Да
7	175	Да
8	200	Да
9	250	Да
10	400	Да
11	500	Один раз нет, два раза да
12	600	Один раз нет, два раза да
13	950	Два раза нет, один раз да
14	1000	Нет

Согласно данным таблицы, область воспламенения (детонационного горения) достаточно широка, от 50 до 950 г/м³.

Результаты лабораторных экспериментов по определению влияния концентрации угольной пыли на давление взрыва и скорость нарастания давления взрыва представлены на рис. 3, а.

Из анализа рис. 3 следует, что в достаточно широком диапазоне по концентрации, а именно 175–400 г/м³ (175, 200, 250, 400), давление взрыва практически не меняется: от

$P_{\text{взр}} = 0,74$ МПа при $\phi = 175$ г/м³ до $P_{\text{взр}} = 0,7$ МПа при $\phi = 400$ г/м³. При дальнейшем увеличении концентрации КУП в реакционном объеме давление взрыва медленно снижается. При концентрации 950 г/м³ происходят два отказа, и при концентрации 1000 г/м³ воспламенения пылевоздушной смеси не произошло.

При проведении научно-экспериментальной работы по изучению зависимости изменения скорости нарастания при взрыве от концентрации каменноугольной пыли нами были получены результаты, которые мы сразу объяснить не смогли. Например, максимальная скорость нарастания давления (dP/dt) наблюдается при концентрации 100 г/м³ и затем при дальнейшем увеличении концентрации угольной пыли резко падает. Однако начиная с 200 г/м³ наблюдается повторный рост скорости нарастания давления при взрыве, достигающий своего максимума при $\phi = 400$ г/м³, и далее происходит медленное падение dP/dt .

В результате изучения влияния концентрации пыли на давление взрыва для дальнейших исследований была выбрана концентрация каменноугольной пыли, равная 100 г/м³ (см. рис. 4) и продолжена работа по определению наиболее эффективных огнегасящих и взрывоподавляющих порошковых составов.

На рис. 3, б представлен результат обработки в среде OriginPro графического отображения автоматически регистрируемых данных детонационного горения пылевоздушного аэрозоля КУП дисперсностью (фракция) 63–94 мкм в 20-литровой взрывной камере (сфере).

В соответствии с методикой проводили три эксперимента с одним и тем же (по массе, дисперсности и т.д.) образцом КУП и строили итоговый график, в данном случае представленный на рис. 3, а.

Согласно полученным нами экспериментальным данным при детонационном горении каменноугольной пыли марки КС шахты имени Дзержинского в рабочей камере создано максимальное давление взрыва, равное 0,7923 МПа (7,9 атм, или 792,3 кПа), т.е. $P_{ex} = 0,7923$ ($^1P_{min} = 0,7684$, $^2P_{взр} = 0,7719$ и $^3P_{max} = 0,8376$ МПа).

Скорость нарастания давления при этом составила 41,558 МПа/с.

Рассчитанный прикладным программным обеспечением лабораторной установки трансформационный коэффициент K_m составил 11,28 МПа·м/с.

Согласно данным, изложенным в [17], зная коэффициент трансформации, можно рассчитать скорость нарастания давления взрыва в любых объемах, в том числе и в горных выработках.

Полученные нами результаты хорошо согласуются с ранее определенными данными, изложенными в [19, 24, 25, 29, 30].

В связи с тем что в процессе определения (исследования) скорости нарастания давления при взрыве возник ряд трудностей (см. выше описание рис. 3), то данному вопросу при проведении дальнейшей научно-исследовательской работы будет уделено более пристальное внимание.

Выводы

1. Экспериментально исследованы взрывоопасные характеристики пыли каменного угля

марки КС пласта Мощный шахты им. Дзержинского. Максимально зарегистрированное давление взрыва составило 0,8376 МПа (P_m). Подтверждено, что большим максимальным давлением взрыва обладают фракции пыли дисперсностью 63–94 мкм при концентрации, равной 100 г/м³.

2. Установлена возможность повторного роста (увеличения) скорости нарастания давления при взрыве, наблюдаемая в области высоких концентраций. Максимальная скорость нарастания давления при взрыве составила $dP/dt = 41,558$ МПа/с при $\varphi = 100$ г/м³. Повторный рост скорости установлен при $\varphi = 200$ г/м³ и до $\varphi = 400$ г/м³, при этом $dP/dt = 40,5$ МПа/с, что ниже пика при $\varphi = 100$ г/м³. Считаем целесообразным продолжить дальнейшую работу по изучению поведения скорости нарастания давления при взрыве в зависимости от концентрации каменноугольной пыли в реакционном объеме установки.

3. Определено, что из-за большого разброса значений dP/dt , составляющего более 15 %, необходимо определять среднее арифметическое по данным более чем трех измерений либо установить причину разброса значений и разработать меры по ее устранению.

4. Считаем необходимым продолжить работу в данном направлении и с целью выявления эффективного огнегасящего и взрывоподавляющего состава при $\varphi = 100$ г/м³, исследования провести как в воздушной среде, так и в среде, содержащей метан.

Библиографический список

1. Кудинов Ю.В., Володин А.В. О механизме взрыва угольной пыли // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – 2013. – 1(31).

2. Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 1. – С. 82–87.

3. Калякин С.А., Булгаков Ю.Ф. Пожаро-взрывоопасность отложений угольной пыли // Научный вестник НИИГД Респиратор. – 2012. – № 1. – С. 14–27.

4. Калякин С.А., Шевцов Н.Р., Купенко И.В. Создание эффективной системы взрывозащиты угольных шахт // Уголь Украины. – 2012. – № 2. – С. 24–30.

5. Гого В.Б. Развитие теории взрыва пылеугольного аэрозоля // Информационные технологии в научных исследованиях и учебном процессе: сб. науч. тр. 2-й междунар. конф. / ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ; Луганск: ЛУПУ, 2006. – Спецвып. – С. 29–34.

6. Родионов В.А., Пихконен Л.В., Жихарев С.Я. Анализ применения методов термического анализа для оценки взрывопожароопасных свойств каменного угля Соколовского месторождения // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – № 3. – С. 84–93.

7. Айруни А.Т., Клебанов Ф.С., Смирнов О.В. Взрывоопасность угольных шахт. – М.: Горное дело; Киммерийский центр, 2011. – 264 с.

8. Угольная промышленность: Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору / Управление по надзору в угольной промышленности. – 2016. – № 4(85). – С. 1–7.

9. Обеспечение пожарной безопасности производственных объектов. Исследование и разработка нормативных документов ФГБУ ВНИИПО МЧС России в области предупреждения пожаров и взрывов / В.М. Гордиенко, Л.П. Вогман, В.И. Горшков [и др.] // Безопасность труда в промышленности – Occupational Safety in Industry. – 2017. – № 6. – С. 5–20. DOI:10.24000/0409-2961-2017-6-5-20

10. Лебецки К.А., Романченко С.Б. Пылевая взрывоопасность горного производства. – М.: Горное дело; Киммерийский центр, 2012. – Т. 6: Промышленная безопасность, кн. 10. – 464 с. – (Серия «Библиотека горного инженера»).

11. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин [и др.]. – М.: Недра, 1992. – 300 с.

12. Рашевский В.В., Артемьев В.Б., Силютин С.А. Качество углей ОАО «СУЭК». – М.: Кучково поле, 2011. – Т. 5, кн. 1. – 576 с. (Серия «Библиотека горного инженера»).

13. Пихконен Л.В., Родионов В.А., Жихарев С.Я. Определение взрывопожароопасных

свойств каменного угля Ленинск-Кузнецкого каменноугольного месторождения // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2017. – Вып. 3. – С. 74–84.

14. Experimental mine and laboratory dust explosion research at NIOSH / M. Sapko, E. Weiss, K. Cashdollar, I. Zlochower // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2000. – Vol. 13, iss. 3–5. – P. 229–242. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00038-8

15. Родионов В.А., Пихконен Л.В., Жихарев С.Я. Дисперсность каменноугольной пыли марки Ж Воргашорского месторождения и ее влияние на процесс термической деструкции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 4. – С. 350–56. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.4.6

16. Толчинский Е.Н., Киселев В.А. Влияние дисперсного состава пыли природного твердого топлива на ее взрывоопасные свойства // Электрические станции (ежемесячный производственно-технический журнал). – 2001. – № 5. – С. 11–16.

17. Теория горения и взрыва метана и угольной пыли / И.Е. Колесниченко, В.Б. Артемьев, Е.А. Колесниченко, В.Г. Черечукин, Е.И. Любимищенко // Уголь. – 2016. – № 6. – С. 30–35. DOI:<http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2016-6-30-35>

18. Жихарев С.Я., Пихконен Л.В., Родионов В.А. Исследование взрывопожароопасных свойств каменного угля Прокопьевского месторождения кузнецкого угольного бассейна // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2017. – Вып. 3. – С. 65–74.

19. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 1: Determination of the maximum explosion pressure P_{max} of dust clouds British Standard BS EN 14034-1:2004+A1:2011 [Электронный ресурс]. – URL: <http://base.iepi.com.cn/download/Standards/CEN/EN%2014034-1-2004%20Determination%20of%20the>

%20maximum%20explosion%20pressure%20P_{max}
x%20of%20dust%20clouds.pdf (дата обращения:
12.09.2017).

20. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dP/dt)_{\max}$ of dust clouds BS EN 14034-2:2006+A1:2011 [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/431802696> (дата обращения: 10.09.2017).

21. Determination of explosion characteristics of dust clouds Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds BS EN 14034-3:2006+A1:2011 [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/431804881> (дата обращения: 10.09.2017).

22. Standard test method for minimum explosible concentration of combustible dusts ASTM E1515-14 [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/431812540> (дата обращения: 10.09.2017).

23. Standard test method for minimum for explosibility of dusts clouds ASTM E1226-10 [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/461910142> (дата обращения: 10.09.2017).

24. Kühner A.G. Operating instructions for the 20 litre apparatus 5.0. – Basel, Switzerland: Ciba-Geigy AG, 1994.

25. Li Qingzhao, Zhai Cheng, Wu Haijin. Investigation on coal dust explosion characteristics

using 20 L explosion sphere vessels // Journal of China Coal Society. – 2011. – 36 p.

26. Siwek R. Experimental methods for the determination of explosion characteristics of combustible dust // 3-d International Symposium on Lose Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. – Basel, 1980. – Vol. 3.

27. Свойства и параметры, определяющие взрывчатость угольной пыли / А.Г. Данилов, Э.А. Грачев, С.В. Кульчицкий, М.Г. Галиев // Евразийский научный журнал. – 2015. – № 8. – С. 12–17.

28. Dastidar P., Amyotte J., Going K. Chartathi, Inerting of coal dust explosions in laboratory – and intermediate-scale chambers // Fuel. – 2001. – Vol. 80, iss. 11. – P. 1593–1602. DOI: 10.1016/S0016-2361(01)00038-2

29. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ материалов. Номенклатура показателей и методы их определения (с изменением № 1) [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004802> (дата обращения: 10.09.2017).

30. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник: в 2 ч. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пожнаука, 2004. – 713 с.

References

1. Kudinov Iu.V., Volodin A.V. О механизме взрыва угольной пыли [On the mechanism of coal dust explosion]. *Sposoby i sredstva sozdaniia bezopasnykh i zdorovykh uslovii truda v ugol'nykh shakhtakh*, 2013, 1(31).

2. Promyshlennaia bezopasnost' predpriatii mineral'no-syr'evogo kompleksa v XXI veke [Industrial safety of enterprises of the mineral and raw materials complex in the 21st century]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2017, no.1, pp.82-87.

3. Kaliakin S.A., Bulgakov Iu.F. Pozharovzryvoopasnost' otlozhenii ugol'noi pyli [Fire and

explosion hazard of coal dust deposits]. *Nauchnyi vestnik NIIGD Respirator*, 2012, no.1, pp.14-27.

4. Kaliakin S.A., Shevtsov N.R., Kупenko I.V. Sozdanie effektivnoi sistemy vzryvozashchity ugol'nykh shakht [Development of the effective system for explosion protection of coal mines]. *Ugol' Ukrainy*, 2012, no.2, pp.24-30.

5. Gogo V.B. Razvitie teorii vzryva pyleugol'nogo aerezolia [Development of the theory of the explosion of coal dust aerosol]. *Informatsionnye tekhnologii v nauchnykh issledovaniakh i uchebnom protsesse. Sbornik nauchnykh trudov vtoroi mezhdunarodnoi*

konferentsii. Alchevsk, Lugansk, 2006, spetsvyпуск, pp.29-34.

6. Rodionov V.A., Pikhkonen L.V., Zhikharev S.Ia. Analiz primeneniia metodov termicheskogo analiza dlia otsenki vzryvopozharoopasnykh svoistv kamennogo uglia Sokolovskogo mestorozhdeniia [Analyzing application methods of thermal analysis for evaluation of explosive properties of Sokolovsky deposit coal]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2017, no.3, pp.84-93.

7. Airuni A.T., Klebanov F.S., Smirnov O.V. Vzryvoopasnost' ugol'nykh shakht [Explosiveness of coal mines]. Moscow, Gornoe delo, Kimmeriiskii tsentr, 2011, 264 p.

8. Ugol'naia promyshlennost'. Informatsionnyi biulleten' Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru [Coal industry. Information Bulletin of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision], 2016, no.4 (85), pp.1-7.

9. Gordienko V.M., Vogman L.P., Gorshkov V.I. et al. Obespechenie pozharoi bezopasnosti proizvodstvennykh ob"ektov. Issledovanie i razrabotka normativnykh dokumentov FGBU VNIPO MChS Rossii v oblasti preduprezhdeniia pozharov i vzryvov [Provision of fire safety of production facilities. Research and development of normative documents of FBSI VNIPO of the EMERCOM of Russia the field of prevention of fires and explosions]. *Occupational Safety in Industry*, 2017, no.6, pp.5-20. DOI:10.24000/0409-2961-2017-6-5-20

10. Lebedski K.A., Romanchenko S.B. Pylevaia vzryvoopasnost' gornogo proizvodstva [Dust explosiveness of mining]. Moscow, Gornoe delo, Kimmeriiskii tsentr, 2012, vol.6, book 10, 464 p. (Biblioteka gornogo inzhenera).

11. Netsepliaev M.I., Liubimova A.I., Petrukhin P.M. et al. Bor'ba so vzryvami ugol'noi pyli v shakhtakh [Control of the coal dust explosions in mines]. Moscow, Nedra, 1992, 300 p.

12. Rashevskii V.V., Artem'ev V.B., Siliutin S.A. Kachestvo uglei OAO "SUEK" [Quality of coals of

SUEK OJSC]. Moscow, Kuchkovo pole, 2011, vol.5, book 1, 576 p. (Biblioteka gornogo inzhenera).

13. Pikhkonen L.V., Rodionov V.A., Zhikharev S.Ia. Opredelenie vzryvopozharoopasnykh svoistv kamennogo uglia Leninsk-Kuznetskogo kamennougol'nogo mestorozhdeniia [Determination research of fire and explosion hazardous properties for hard coal at the Prokopyevsk coal field of the Leninsk-Kuznetskiy coal field]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*, 2017, iss.3, pp.74-84

14. Sapko M., Weiss E., Cashdollar K., Zlochower I. Experimental mine and laboratory dust explosion research at NIOSH. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, vol. 13, iss.3–5, pp.229-242. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00038-8

15. Rodionov V.A., Pikhkonen L.V., Zhikharev S.Ya. Dispersion of the G-type coal dust of the Vorgashorskoe field and its influence on the thermal destruction process. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol.16, n.4, pp.350-356. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.4.6

16. Tolchinskii E.N., Kiselev V.A. Vliianie dispersnogo sostava pyli prirodnogo tverdogo topliva na ee vzryvoopasnye svoistva [Influence of the dispersion composition of the dust of natural solid fuel on its explosive properties]. *Elektricheskie stantsii*, 2001, no.5, pp.11-16.

17. Kolesnichenko I.E., Artem'ev V.B., Kolesnichenko E.A., Cherechukin V.G., Liubomishchenko E.I. Teoriia goreniia i vzryva metana i ugol'noi pyli [The theory of combustion and explosion of methane and coal dust]. *Ugol'*, 2016, no.6, pp.30-35. DOI:http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2016-6-30-35

18. Zhikharev S.Ia., Pikhkonen L.V., Rodionov V.A. Issledovanie vzryvopozharoopasnykh svoistv kamennogo uglia Prokop'evskogo mestorozhdeniia kuznetskogo ugol'nogo basseina [Research of fire and explosion hazardous properties for hard coal at the Prokopyevsk coal field of the Kuznetsk coal basin]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*, 2017, iss.3, pp.65-74.

19. Determination of explosion characteristics of dust clouds Part 1: Determination of the maximum explosion pressure P_{\max} of dust clouds British Standard BS EN 14034-1:2004+A1:2011, available at: <http://base.iepi.com.cn/download/Standards/CEN/EN%2014034-1-2004%20Determination%20of%20the%20maximum%20explosion%20pressure%20Pmax%20of%20dust%20clouds.pdf> (accessed 12 September 2017).
20. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dP/dt)_{\max}$ of dust clouds BS EN 14034-2:2006+A1:2011, available at: <http://docs.cntd.ru/document/431802696> (accessed 10 September 2017).
21. Determination of explosion characteristics of dust clouds Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds BS EN 14034-3:2006+A1:2011, available at: <http://docs.cntd.ru/document/431804881> (accessed 10 September 2017).
22. Standard test method for minimum explosible concentration of combustible dusts ASTM E1515, available at: <http://docs.cntd.ru/document/431812540> (accessed 10 September 2017).
23. Standard test method for minimum for explosibility of dusts clouds ASTM E1226-10, available at: <http://docs.cntd.ru/document/461910142> (accessed 10 September 2017).
24. Kühner A.G. Operating instructions for the 20 litre apparatus 5.0. Basel, Switzerland, Ciba-Geigy AG, 1994.
25. Li Qingzhao, Zhai Cheng, Wu Haijin. Investigation on coal dust explosion characteristics using 20 L explosion sphere vessels. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36 p.
26. Siwek R. Experimental methods for the determination of explosion characteristics of combustible dust. *3 International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*. Basel, 1980, vol.3.
27. Danilov A.G., Grachev E.A., Kul'chitskii S.V., Galiev M.G. Svoistva i parametry, opredelivaiushchie vzryvchatost' ugol'noi pyli [Properties and parameters, which determine the explosiveness of coal dust]. *Evraziiskii nauchnyi zhurnal*, 2015, no.8, pp.12-17.
28. Dastidar P., Amyotte J., Going, K. Chartathi, Inerting of coal dust explosions in laboratory – and intermediate-scale chambers. *Fuel*, 2001, vol.80, iss.11, pp.1593-1602. DOI: 10.1016/S0016-2361(01)00038-2
29. GOST 12.1.044-89 (ISO 4589-84) Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazatelei i metody ikh opredeleniia (s Izmeneniiem no.1) [Occupational safety standards system. Fire and explosion safety of matter and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination (with Change no.1)], available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200004802> (accessed 10 September 2017).
30. Korol'chenko A.Ia., Korol'chenko D.A. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniia [Fire and explosion hazard of matter and materials and means of their suppression. Reference book: in 2 parts]. *Spravochnik v 2 chastiakh*. Moscow, Pozhnauka, 2004, 713 p.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Родионов В.А., Абиев З.А., Жихарев С.Я. Методика исследования процессов горения и детонации каменноугольной пыли в горных выработках // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т.17, №1. – С.50–59. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.5

Please cite this article in English as:

Rodionov V.A., Abiev Z.A., Zhikharev S.Ya. Methodology for investigation of stone dust combustion and detonation processes in mining. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.17, no.1, pp.50-59. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.5