



I ПОЖАРНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.89.87.001

УДК 622.814:622.411.52

© М.С. Сазонов, С.И. Голоскоков, 2019

М.С. САЗОНОВ

канд. техн. наук,
старший научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: m.sazonov@nc-vostnii.ru



С.И. ГОЛОСКОКОВ

канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: s.goloskokov@nc-vostnii.ru



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТОСТИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ РАЗЛИЧНОГО ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА

Представлены исследования взрывчатости угольной пыли, проводимые в НЦ ВостНИИ. Целью работы является повышение уровня пылевзрывобезопасности технологических процессов. Испытания проводились в 4,25-литровой испытательной камере. Проведен анализ измеряемых показателей: нижнего концентрационного предела распространения пламени, максимального давления взрыва, максимальной скорости нарастания давления взрыва, индекса пожаровзрывоопасности, времени индукции пыли, времени горения пыли, добавки инертной пыли, модальной величины распределения частиц угля.

Ключевые слова: ВЗРЫВЧАТОСТЬ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ, УГОЛЬ, ПЫЛЬ.

Введение

Известный факт о влиянии размера частиц аэрозоля на его параметры взрывчатости [1, 2, 3], такие как нижний концентрационный предел распространения пламени, давление взрыва, скорость нарастания давления взрыва, добавка инертной пыли, делает актуальным вопрос о том, насколько будут опаснее мелкодисперсные фракции угольной пыли, возможно ли обеспечить пылевзрывобезопасность технологических процессов, связанных с образованием мелкодисперсной угольной пыли.

В разделе VI главы 30 статьи 133 [4] указаны требования пожарной безопасности к информации о пожарной опасности веществ и материалов. Вот некоторые из них:

- 1) максимальное давление взрыва;
- 2) скорость нарастания давления взрыва;
- 3) индекс пожаровзрывоопасности.

Кроме указанных показателей пожарной опасности используются также нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР, г/м³), добавка инертной пыли (Д, % масс.) и др. В п. 1.3 [5] дано определение понятия пыль — диспергированные твердые

вещества и материалы с размером частиц менее 850 мкм, а для экспериментального определения показателей взрыва пылевоздушных смесей при испытании используют образцы с размерами частиц менее 100 мкм. Но результаты исследований [6, 7] свидетельствуют, что отложившаяся угольная пыль в выработках с исходящей струей воздуха из высокопроизводительных очистных забоев по своему составу является мелкодисперсной, с весовой долей фракций 0–50 мкм более 90 %. Наличие пыли с размером частиц более 100 мкм наблюдается только на первых 10 м. На удалении свыше 20 метров от комбайна явно выражены частицы с аэродинамическим диаметром 15–25 мкм, определяющие основную массу пыли. В связи с нормированием определения показателей пожаровзрывоопасности пылей для фракции менее 100 мкм и фактическим наличием мел-

кодисперсной пыли 15–25 мкм в выработках необходимо количественно оценить опасность мелкодисперсной фракции по сравнению с более крупной.

Анализ параметров взрывчатости угольной пыли

Исследования проводились на угольной пыли Кузбасса фракцией менее 63 мкм и фракцией менее 20 мкм. Рассев предварительно высушенных проб производился сухим методом на ситах. Показатели технического анализа углей представлены в табл. 1. Нейтрализация взрывчатых свойств угольной пыли производилась с помощью пыли инертной гидрофобной марки «ПИГ», ее характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели анализа исследуемых углей

№	Фракция	Наименование пыли (пласт, марка)	W _a *, %	A _ф *, %	V _{daf} *, %	Модальная величина, мкм	< 15 мкм, %	< 25 мкм, %
1	< 63 мкм	«Рытвинный»	0,7	17,4	35,7	29,1	39,3	67,3
2	< 20 мкм					13,8	72,3	95,6
3	< 63 мкм	«Надбайкаимский»	3,3	4,2	42,9	30,1	35,5	58,0
4	< 20 мкм					12,1	79,5	97,9
5	< 63 мкм	«СС»	1,1	6,3	17,9	20,4	49,0	78,0
6	< 20 мкм					9,3	89,1	99,4
7	< 63 мкм	«6»	0,7	5,0	16,3	36,6	14,2	30,4
8	< 20 мкм					4,2	93,7	99,5
9	-	«ПИГ»	0,1	99,6	-	35,4	54,3	69,4

* W_a — влага аналитической пробы, %; A_ф — суммарное содержание негорючих веществ, %; V_{daf} — выход летучих веществ сухого беззольного состояния, %.

Показатели пожарной опасности определялись на модернизированной установке «Универсал» производства ФГБУ «ВНИИПО» (г. Балашиха) по методике, представленной в п. 4.11 [5] и усовершенствованной для увеличения количества определяемых параметров и учета факторов, способных повлиять на достоверность полученных результатов экспериментальных исследований показателей

взрывоопасности углей с низким выходом летучих веществ. Существуют и другие виды испытательных камер объемом 1,2 л, 4 л, 20 л и 1000 л, которые широко применяются в Европе, Северной Америке и так далее [8, 9, 10, 11].

Модernизированная установка «Универсал» представляет собой реакционный сосуд объемом 4,25 л, выполненный из нержавеющей стали и рассчитанный на рабочее дав-

ление до 1 МПа, снабженный системой распыления исследуемого вещества, системой регистрации давления (используются высокочувствительные пьезоэлектрические датчики динамического давления), обеспечивающей непрерывную или дискретную запись изменения давления во времени в частотном диапазоне 25 кГц (дискретность измерения по давлению — 0,001 Па, по времени — 0,04 мс), системой отображения и хранения данных, системой синхронизации процессов распыления и зажигания пылевоздушных смесей.

В качестве источника зажигания предусмотрен высоковольтный электрический разряд с энергией 1 кДж между электродами, расположенными в центре сосуда. После модернизации работоспособность установки была подтверждена проверкой по ликоподию в соответствии с требованиями [12].

Определения гранулометрического состава мелкодисперсной пыли исследуемых углей проводились на анализаторе частиц Analisette 22 Micro Tec plus, результаты одной из них представлены на рис. 1.

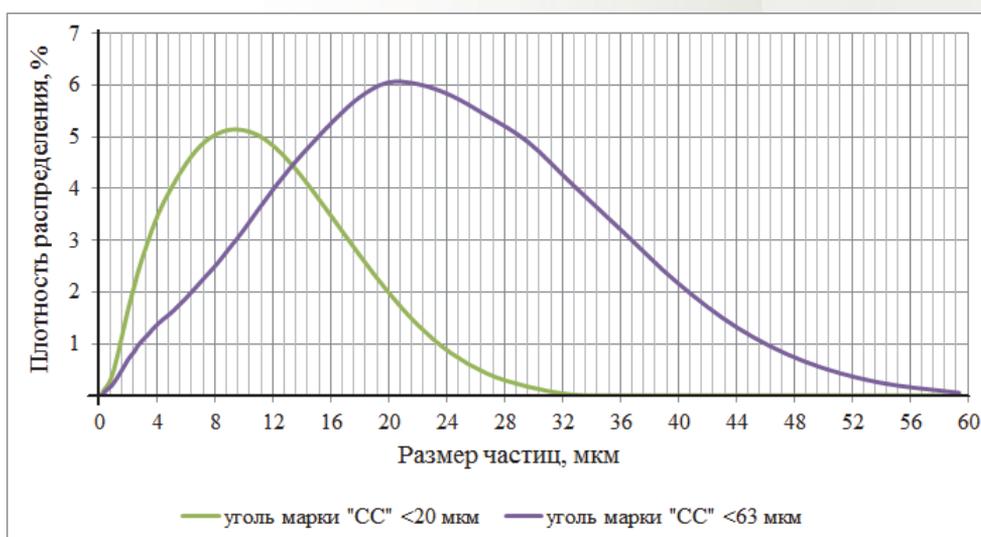


Рис. 1. График распределения частиц угольной пыли марки «СС» для двух фракций: меньше 20 мкм и меньше 63 мкм

Пожалуй, самая часто описываемая силовая характеристика пыли — это модальная величина распределения (табл. 2). Целью включения различных параметров грану-

лометрического анализа пыли является демонстрация того, что ни один параметр не является достаточным, чтобы однозначно охарактеризовать пыль.

Таблица 2

Показатели гранулометрического анализа исследуемых углей

Наименование показателя	«Рытвинный»		«Надбайкаимский»		«СС»		«Б»	
	< 63 мкм	< 20 мкм	< 63 мкм	< 20 мкм	< 63 мкм	< 20 мкм	< 63 мкм	< 20 мкм
Арифметический ср. диаметр, мкм	20,2	11,5	25,4	10,4	17,1	8,1	34,5	5,9
Геометрический ср. диаметр, мкм	15,2	8,7	18,1	8,1	12,8	6,1	27,6	4,1
Квадратичный ср. диаметр, мкм	24,8	13,6	31,3	12,2	20,3	9,8	38,7	7,8
Гармонический ср. диаметр, мкм	8,9	4,9	9,0	4,9	7,4	4,1	13,9	2,6
Модальная величина, мкм	29,1	13,8	30,1	12,1	20,4	9,3	36,6	4,2
Средний диаметр, мкм	19,3	10,7	21,5	9,6	15,8	6,9	34,0	4,5

Наименование показателя	«Рытвинный»		«Надбайкаимский»		«СС»		«6»	
	< 63 мкм	< 20 мкм	< 63 мкм	< 20 мкм	< 63 мкм	< 20 мкм	< 63 мкм	< 20 мкм
Средний коэф.	1,0	1,1	1,2	1,1	1,1	1,2	1,0	1,4
Расхождение, мкм ²	209,6	53,9	333,8	40,8	121,1	30,4	311,9	33,2
Среднеквадратичное отклонение, мкм	14,5	7,3	18,3	6,4	11,0	5,5	17,7	5,8
Среднее отклонение, мкм	10,4	5,9	14,6	5,1	8,9	4,4	14,0	4,3
Коэф. расхождения, %	71,5	63,7	71,8	61,4	64,4	68,2	51,2	90,4
Асимметрия	30,3	0,6	0,9	0,7	0,6	0,9	0,2	1,7
Эксцесс	3835,3	-0,1	0,4	0,1	-0,2	0,5	-0,2	3,0
Диапазон	1,7	1,8	2,2	1,7	1,8	2,0	1,4	3,0
Монотонность	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,6	0,4	0,9
Специфическая площадь поверхности, см ² /см ³	6 718,0	12 308,8	6 659,4	12 303,4	8 115,3	14 801,6	4 331,8	22 399,0

Особое внимание следует уделить специфической площади поверхности (табл. 2); если эту величину разделить на плотность угля, то получим удельную площадь поверхности без учета пористого пространства. Удельная площадь поверхности углей при уменьшении модальной величины пыли в три раза увеличивается более чем в 1,8 раза, а при уменьшении модальной величины пыли в восемь раз — в 5,2 раза.

Для определения максимального давления ($P_{\text{макс}}$, кПа) взрыва исследуемого вещества были построены кривые зависимости давления взрыва ($p_{\text{взр}}$) от концентрации вещества. Наибольшее из полученных значений давления взрыва — максимальное давление взрыва исследуемого вещества. Для определения максимальной скорости нарастания давления взрыва строят кривую зависимости скорости нарастания давления взрыва $[(dp/dt)_{\text{взр}}]$ от концентрации вещества. Наибольшее из полученных значений $[(dp/dt)_{\text{взр}}]$ принимают за максимальную скорость нарастания давления взрыва $[dp/dt]_{\text{макс}}$, МПа/с исследуемого вещества. Индекс пожаровзрывоопасности аэрозвеси вещества определялся по следующей формуле:

$$K_{st} = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\text{макс}} \cdot \sqrt[3]{V}, \quad (1)$$

где V — объем реакционного сосуда ($V=0,00425$), м³; K_{st} — индекс пожаровзрывоопасности, МПа·м/с.

Для определения минимальной флегматизирующей добавки инертной пыли проводят серию последовательных испытаний на взрываемость со смесями угольной и инертной пылей при постепенно возрастающем содержании в них инертной пыли. Содержание инертной пыли в смеси увеличивают в каждом последующем испытании на 3–5 %. Испытания следует проводить во всем возможном диапазоне концентраций смеси (обычно 200–800 г/м³) для определения наиболее неблагоприятного варианта.

На рис. 2 представлен частный случай процесса взрыва угольной пыли пласта «Рытвинный» фракции < 63 мкм при концентрации 374 г/м³. Сначала срабатывает электромагнитный клапан 10 мс, затем идет распыление в реакционном сосуде угольной пыли до 70 мс, затем зажигание 70 мс, дефлаграционное горение с максимумом в 104 мс. Разница во времени между активацией зажигания и максимальной точкой определяется как время горения пыли (t_1 на рис. 2). Разница во времени между активацией зажигания и пересечения касательной с осью абсцисс (линия 0 кПа) определяется как время индукции пыли (t_2 на рис. 2). Небольшое искривление на восходящей кривой давления объясняется влиянием источника зажигания.

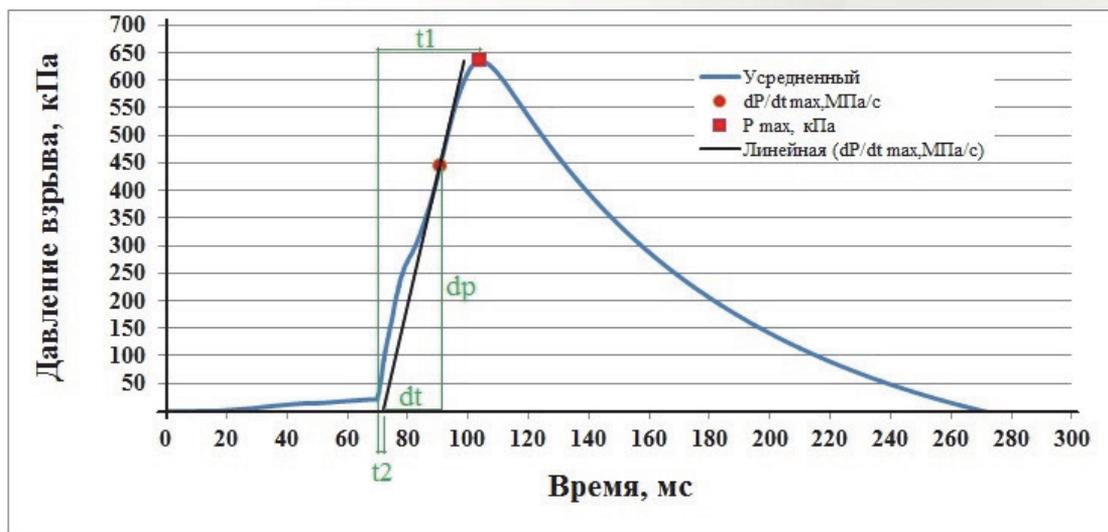


Рис. 2. График зависимости давления взрыва угольной пыли пласта «Рытвинный» фракции < 63 мкм при концентрации 374 г/м³ от времени

Результаты определения максимального давления взрыва угольной пыли (рис. 3) пласта «Надбайкаимский» фракции меньше 63 мкм и фракции меньше 20 мкм свидетельствуют о незначительных изменениях при уменьшении размера частиц почти в три раза.

Результаты определения максимальной скорости нарастания давления взрыва угольной пыли пласта «Надбайкаимский» для фракции меньше 20 мкм показывают значения выше в сравнении этих же показателей для фракции меньше 63 мкм (рис. 4).

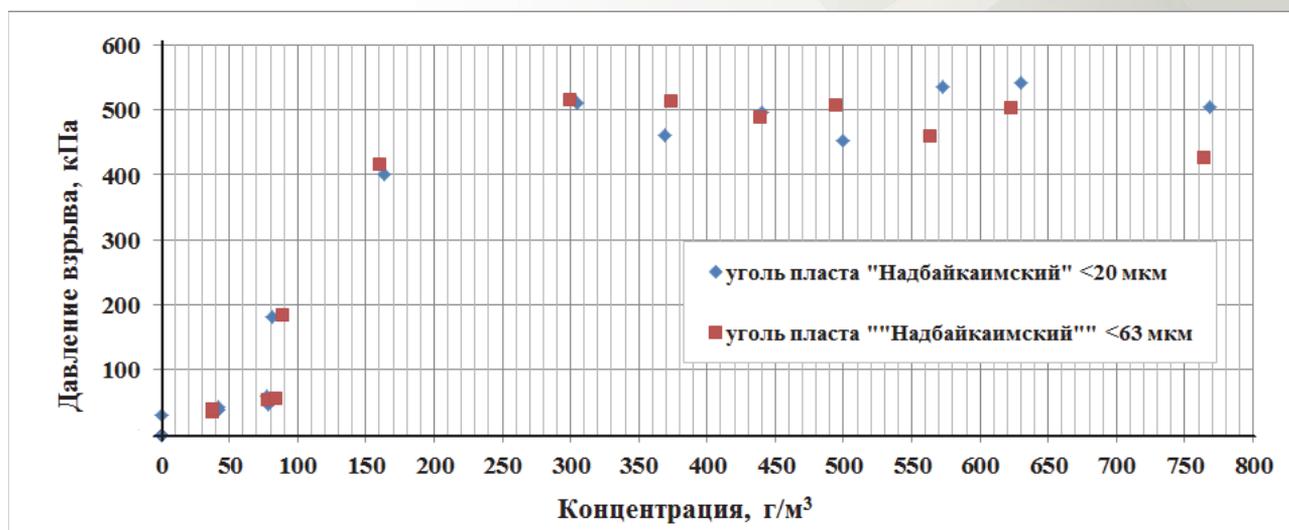


Рис. 3. График зависимости давления взрыва угольной пыли пласта «Надбайкаимский» от концентрации для фракций < 63 мкм и < 20 мкм

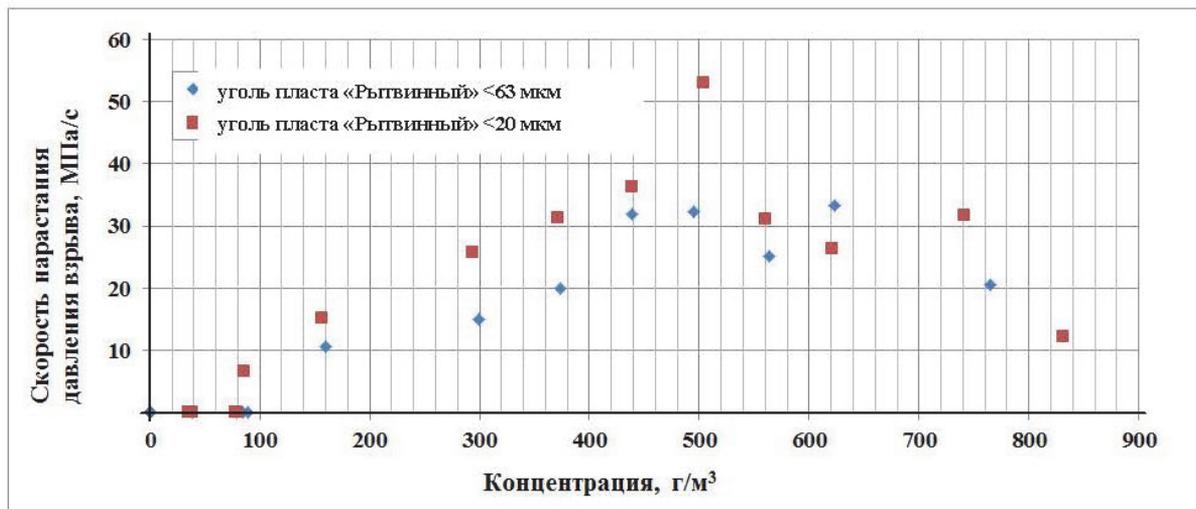


Рис. 4. График зависимости скорости нарастания давления взрыва угольной пыли пласта «Надбайкаимский» от концентрации для фракций < 63 мкм и < 20 мкм

Обобщенные результаты определения показателей пожаровзрывоопасности представлены в табл. 3, но наибольшего внимания заслуживают результаты определения добавки

инертной пыли и максимальной скорости нарастания давления взрыва для всех испытанных углей различных фракций.

Таблица 3

Экспериментальные значения показателей пожаровзрывоопасности пылевоздушных смесей для частиц размером < 63 мкм и < 20 мкм исследуемых углей

Наименование показателя	«Рытвинный»		Δ, %	«Надбайкаимский»		Δ, %	«СС»		Δ, %	«6»		Δ, %
	< 63 мкм	< 20 мкм		< 63 мкм	< 20 мкм		< 63 мкм	< 20 мкм		< 63 мкм	< 20 мкм	
мода, мкм	29,1	13,8	-53	30,1	12,1	-60	20,4	9,3	-54	36,6	4,2	-89
НКПР, г/м³	42	38	-10	47	44	-6	39	45	+15	127	98	-23
Д, %	75	83	+11	75	84	+12	75	83	+11	55	70	+27
P _{макс'} , кПа	515,1	544,0	+6	538,4	542,4	+1	508,5	469,2	-8	263,7	386,8	+47
(dp/dt) _{макс'} , МПа/с	33,2	53,1	+60	33,9	42,4	+25	21,0	22,6	+8	5,7	8,8	+54
K _{ст'} , МПа·м/с	5,4	8,6	+59	5,5	6,9	+25	3,4	3,7	+9	0,9	1,4	+56
мин. время индукции пыли, мс	1,6	5,8	+263	7,4	2,0	-73	5,3	3,8	-28	25,4	2,1	-92
мин. время горения пыли, мс	33,7	27,9	-17	29,1	26,3	-10	39,3	32,9	-16	48,1	35,2	-27

Основной причиной незначительных изменений максимального давления взрыва при уменьшении размера частиц углей более чем в три раза, видимо, является сгорание таких

веществ в полном объеме и с максимальной температурой, при которой достигается максимальное проявление энергетического потенциала частиц горючей фазы. Увеличение

максимальной скорости нарастания давления взрыва объясняется значительным увеличением (более чем в 1,8 раз) удельной площади поверхности, интенсификацией процессов пиролиза, уменьшением объема частиц, увеличением времени осаждения частиц под действием силы тяжести, что делает их химически активнее. Незначительные изменения НКПР пылевоздушных смесей, вероятно, говорят о самом минимальном (самом опасном состоянии) его значении в диапазоне размера частиц менее 37 мкм. Из-за увеличения химической активности угольной пыли увеличивается и количество инертной пыли, необходимой для нейтрализации взрывоопасных свойств пылевоздушной смеси.

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально установлено, что с

уменьшением среднего размера частиц (модальная величина) угольной пыли в 3 раза с 36 мкм до 12 мкм увеличивается в среднем на 37 % скорость нарастания давления взрыва, увеличивается в среднем на 10 % абсолютных добавка инертной пыли, а максимальное давление взрыва, нижний концентрационный предел распространения пламени, минимальное время индукции, минимальное время горения пыли остаются приблизительно прежними.

2. Для обеспечения пылевзрывобезопасности технологических процессов, связанных с обращением мелкодисперсной фракции угольной пыли, следует определять показатели пожаровзрывоопасности пыли и показатели, необходимые для нейтрализации взрывчатых свойств пыли, с указанием модальной величины гранулометрического распределения частиц угля для конкретных испытанных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минаев Д.С. Пожаро- и взрывоопасные свойства аэрозолей наноразмерных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 19 с.
2. Cashdollar K.L., Weiss E.S., Greninger N.B., Chatrathi K. Laboratory and large-scale dust explosion research // Plant/Operations Progress. 1992. Т. 11. № 4. С. 247–255.
3. Cashdollar K.L. Coal dust explosibility // Pittsburgh Research Center, Bureau of Mines, US Department of the Interior, Pittsburgh, PA 15236-0070, USA.
4. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. Доступ. из справ.-правовой системы «Техэксперт».
5. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения (с Изменением N 1). Доступ. из справ.-правовой системы «Техэксперт».
6. Исследование закономерностей и особенностей пылевыделения в местах интенсивного пылеобразования, распределения дисперсного состава витающей пыли и ее распространения по горным выработкам угольных шахт в условиях высокопроизводительной добычи угля: отчет о НИР / АО «НЦ ВостНИИ»; рук. Голоскоков С.И.; исполн.: Поздняков Г.А., Романченко С.Б., Сазонов М.С., Голоскоков Е.И., Довыденко С.А., Коптев М.Ю., Филонов Н.В., Тихоненко А.А., Володина Е.В., Палеев Д.Ю. Кемерово, 2015. 215 с.
7. Романченко С.Б. Динамика угольных аэрозолей и создание системы контроля и предотвращения взрывов пыли на горнодобывающих предприятиях: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2012.
8. EN 13821-2002. Potentially explosive atmospheres. Explosion prevention and protection. Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures.
9. EN 14034-1-2004+A1-2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Determination of the maximum explosion pressure p_{\max} of dust clouds.

10. EN 14034-2-2006+A1-2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Determination of the maximum rate of explosion pressure rise (dp/dt)_{max} of dust clouds.

11. EN 14034-3-2006+A1-2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds.

12. ГОСТ 22226-76. Ликоподий. Технические условия. Доступ. из справ.-правовой системы «Техэксперт».

DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.89.87.001

UDC 622.814:622.411.52

© M.S. Sazonov, S.I. Goloskokov, 2019

M.S. SAZONOV

Candidate of Engineering Sciences

Senior Researcher

JSC «NC VostNII», Kemerovo

e-mail: m.sazonov@nc-vostnii.ru

S.I. GOLOSKOKOV

Candidate of Engineering Sciences

Laboratory Head

JSC «NC VostNII», Kemerovo

e-mail: s.goloskokov@nc-vostnii.ru

DIFFERENT-DISPERSION COAL DUST EXPLOSIBILITY STUDY

Studies of the coal dust explosiveness conducted in the JSC «NC VostNII» are presented. The aim of the work is to increase the level of safety of works connected with coal dust. The tests were carried out in the 4.25-liter test chamber. The measurable indicators were analyzed: lower explosive limit, maximum explosion pressure, maximum rate of explosion pressure rise, fire and explosion hazard index, dust induction time, dust combustion time, the addition of preventive dust, modal value of coal particle distribution.

Keywords: COAL DUST EXPLOSIBILITY, COAL, DUST.

REFERENCES

1. Minaev D.S. Fire and explosive characteristics of aerosols of nanoscale materials: thesis... Candidate of Engineering Sciences. dss. Moscow. 2011. 19 p. (In Russ.).

2. Cashdollar K.L., Weiss E.S., Greninger N.B., Chatrathi K. Laboratory and large-scale dust explosion research. Plant Operations Progress. 1992. Vol. 11. № 4. pp. 247–255.

3. Cashdollar K.L. Coal dust explosibility. Pittsburgh Research Center, Bureau of Mines. US Department of the Interior. Pittsburgh. PA 15236-0070. The USA.

4. Technical Regulations on Fire Safety Requirements In Russian Federation: Federal Law of July 22, 2008, № 123. Available at: «Tekhekspert» system. (In Russ.).

5. GOST 12.1.044-89 (ISO 4589-84) SSBT. Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination (as amended N 1). Available at: «Tekhekspert» system. (In Russ.).

6. Goloskokov S.I., Pozdnyakov G.A., Romanchenko S.B., Sazonov M.S., Goloskokov E.I., Dovydenko S.A., Koptev M.Yu., Filonov N.V., Tikhonenko A.A., Volodina E.V., Paleev D.Yu. The study of dust regularities and characteristics of dust emission in places of intensive dust formation, distribution of different-dispersion airborne dust and its distribution in the mine workings of coal mines during of high-performance coal mining: Research report. Kemerovo. 2015. 215 p. (In Russ.).

7. Romanchenko S.B. The dynamics of coal aerosols and the creation of dust explosions control and prevent systems in mining enterprises: thesis... Doctor of Engineering Sciences. dss. Moscow. 2012.

8. EN 13821-2002. Potentially explosive atmospheres. Explosion prevention and protection. Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures.

9. EN 14034-1-2004+A1-2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Determination of the maximum explosion pressure p_{\max} of dust clouds.

10. EN 14034-2-2006+A1-2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(d_p/d_t)_{\max}$ of dust clouds.

11. EN 14034-3-2006+A1-2011. Determination of explosion characteristics of dust clouds. Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds.

12. GOST 22226-76. Clab moss. Specifications. Available at: «Tekhekspert» system. (In Russ.).