УДК 622.814

З.А. Абиев, В.А. Родионов, Г.П. Парамонов, В.И. Чернобай

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИНГИБИРУЮЩИХ И ФЛЕГМАТИЗИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТЬ И ВЗРЫВЧАТОСТЬ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Описана методика исследования влияния ингибиторов и флегматизаторов на процесс детонационного горения каменноугольной пыли. В основу методики положена взрывная сферическая камера объемом 20 л. Приведены общая схема комплекса и основная часть лабораторной установки. Описаны измерительные приборы и разработаны указания для проведения испытаний на лабораторной установке. Результаты работы получены с помощью прикладного программного комплекса «ExTest». Рассмотрено устройство инициирования процесса детонации, приведен состав химического воспламенителя. Даны рекомендации для повышения точности исследований и для оценки достоверности лабораторных измерений. Проведено обоснование дисперсного состава каменноугольной пыли на основании физико-химических особенностей, указан гранулометрический диапазон по фракциям, с которым целесообразнее проводить исследования. В качестве примера показаны визуализированные на графиках экспериментальные результаты работы по данной методике. Описаны достоинства и недостатки методики исследования.

Ключевые слова: методика исследования, взрыв, воспламенение, угольная пыль, ингибирование, флегматизация, взрывоподавление, лабораторная установка, скорость нарастания давления при взрыве, сферическая взрывная камера.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-26-34

Актуальность

Подавление воспламенения и взрыва угольной пыли на многих предприятиях угледобывающей отрасли до настоящего времени проводится не так эффективно, как технологии добычи полезного ископаемого [1]. Востребованность новых методов и составов для повышения безопасности ведения горных работ подтверждается крупными катастрофами, влекущими за собой человеческие жертвы, а также значительный материальный ущерб [1, 2]. Поэтому и лабораторные исследования не менее важны, так как позволяют не только качественно, но и на количественном уровне определять важнейшие закономерности развития воспламенения и взрыва мелкодисперсной угольной пыли, а также оценить эффективность применяемых для подавления процесса детонационного горения каменноугольной пыли ингибиторов и флегматизаторов [1—5].

Цель работы

Разработать методику проведения научных исследований по оценке взрывоопасных параметров гибридных сме-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 5. С. 26–34.
© З.А. Абиев, В.А. Родионов, Г.П. Парамонов, В.И. Чернобай. 2018.

сей и их изменению в зависимости от дисперсного и процентного состава компонентов, а также влияния инертных добавок, а именно, ингибиторов и флегматизаторов на избыточное давление взрыва и скорость нарастания давления при взрыве.

Аналитическая часть

Разработанная авторами методика, рассматриваемая в настоящей статье, базируется на общепринятой системе оценки взрывоопасных свойств пыли, изложенных в ФЗ № 123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (с изменениями на 29 июля 2017 года) и ГОСТ 12.1.044-89 и методах изложенных, в международных стандартах [6—8] и опыте других ученых отраженном в [2, 9].

Методика позволяет определить:

• P_{ex} — максимальное избыточное давление взрыва, возникающее при дефлаграционном сгорании газо-, пароили пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,3 кПа;

• P_{max} — наибольшее значение давления взрыва (максимальное давление взрыва), определенное экспериментально в рамках взрывного диапазона концентрации пыли, МПа. Максимальное давление взрыва (P_{max}) рассчитывается программными методами автоматическим пересчетом из P_{ex};

• dP/dt — отношение приращения давления, развиваемого при взрыве в замкнутом сосуде, к интервалу времени, в течение которого это приращение произошло (скорость нарастания давления при взрыве), МПа/с;

• K_{st} — трансформационный коэффициент (постоянная Бартнехта), позволяющий классифицировать пыль по параметрам взрываемости аэрозоля и выполнить расчет характеристик взрыва для больших объемов, МПа*м/с.

Методика, описываемая в настоящей статье, предназначена для определения вышеприведенных параметров взрыва, как аэрозоля каменноугольной пыли в воздухе или в воздушной среде содержащей метан (гибридные смеси), так и аэродисперсной пыли содержащей добавки флегматизаторов и/или ингибиторов. Под флегматизаторами авторы подразумевают инертные вещества и материалы основным механизмом взрывоподавления, которых является принцип огнепреграждения и разбавления, а под ингибиторами — катализаторы отрицательного действия способные тормозить химические реакции горения, протекающие как во фронте детонационного горения, так и в остальном объеме.

Рассматриваемая в настоящей статье, методика, разработанная авторами статьи, основана на материально-технической части, которая включает в себя лабораторный комплекс, основными блоками которого являются 20-литровая сферическая взрывная камера (СВК) и система управления и сбора данных схематически представленные на рис. 1.

В блоке управления (БУ) установлен программируемый логический контроллер (ПЛК), генератор сигнала воспламенения, панель данных давления и пользовательский интерфейс. Он (БУ) соединен с компьютером через Ethernet кабели. Изменение давления во взрывной камере переводится в электрический сигнал датчиком давления и передающим устройством, записывается системой сбора данных и сохраняется в памяти компьютера. Чувствительность датчиков давления — 0,021 кПа.

Оболочка камеры двухслойная. Для поддержания постоянной температуры внутрь камеры заливали воду; возможно применение и другого хладагента. На одной из сторон СВК находится смотровое окно для визуального наблюдения за процессом воспламенения гибридной

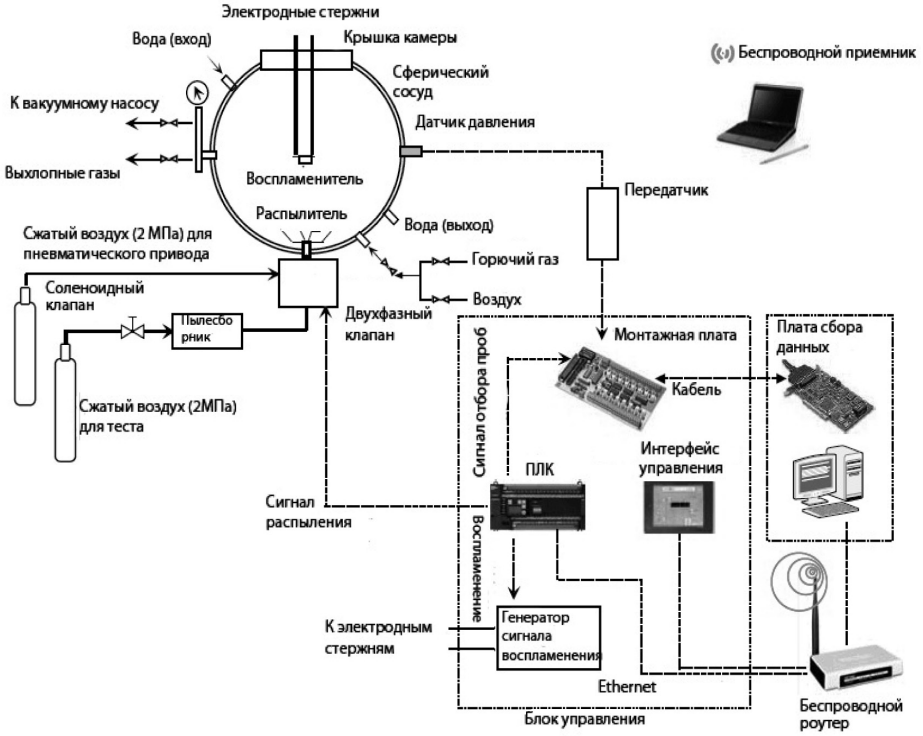

Рис. 1. Схема лабораторной установки
Fig. 1. Laboratory testing facility

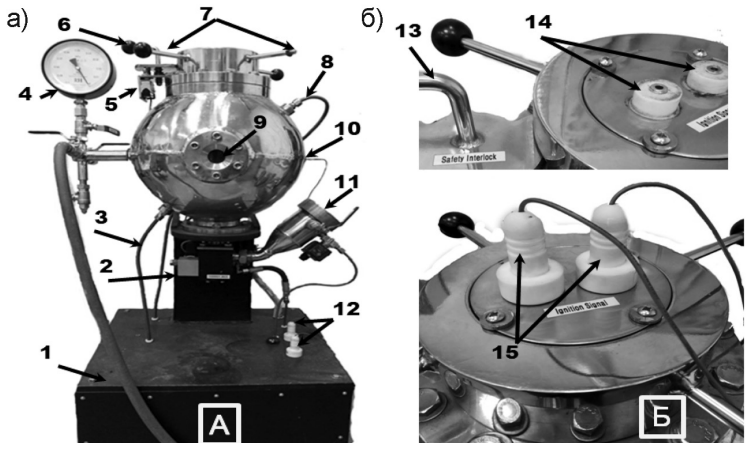

Рис. 2. Внешний вид 20-литровой взрывной камеры (а); увеличенный фрагмент запорной крышки со снятыми и подсоединенными кабелями зажигания (б): 1 — основание (стойка); 2 — мультифазный клапан подачи пыли/воздуха; 3 — вывод рециркуляционной воды; 4 — вакуумметр; 5 — предохранительная задвижка; 6 и 13 — ручка замка безопасности предохранительной задвижки; 7 — поворотные ручки крышки камеры; 8 — ввод для рециркуляционной воды; 9 — смотровое окно; 10 — ввод датчика давления; 11 — сосуд для образцов пыли (сосуд предварительной компрессии); 12 — контакты проводов зажигания в снятом положении; 14 — выход токопроводов на поверхность запорной крышки; 15 — контакты проводов зажигания в подсоединенном к токопроводам состоянии

Fig. 2. View of 2-l blasting chamber; enlarged fragment showing locking assembly with disconnected and connected ignition cables

смеси внутри камеры. СВК оборудована клапанами (входные и выходные соединения) для откачки воздуха, удаления продуктов горения, слива/налива хладагента и т.п.

Мультифазный (быстродействующий) клапан подачи пыли/воздуха установлен под дном испытательной камеры и используется для контроля над процессом рассеяния пыли. Реле давления установлено внутри стенки сосуда и используется для определения динамического давления взрыва пыли. Структура соединения крышки с камерой аналогична таковой на промышленных и лабораторных автоклавах. Манипуляции с крышкой может производить один человек. Рассеивающее сопло установлено на дне камеры и используется для равномерного рассеяния пыли в камере. Общий вид 20 л СВК показан на рис. 2.

Практическая часть

Алгоритм проведения эксперимента согласно предлагаемой нами методики состоит из трех этапов.

Первый этап включает в себя: подготовку системы управления, а так же подготовку установки к работе и пробоподготовку образца для исследований или партии образцов одной серии, приготовление химического воспламенителя согласно рецептуре и сборку инициирующего устройства.

Операции пробоподготовки образцов для исследования, включают в себя операции размола, гранулометрического анализа и ситового рассева для получения необходимых по дисперсности фракций. На основании накопленного опыта и литературных данных, изложенных в [2, 3, 5, 10—12] мы рекомендуем проводить научные исследования с фракциями следующего дисперсионного состава: 250÷500 мкм, 150÷250 мкм, 75÷÷150 мкм, 50÷75 мкм. В случае исследования образцов каменноугольной пыли необходимо знать следующие ее параметры: зольность, выход летучих и влажность. Эти параметры можно определить проведя входной контроль.

Пробоподготовка ингибирующих и/или флегматизирующих добавок включает в себя их диспергирование и ситовой рассев для получения фракций аналогичных по составу основному образцу, т.е. имеющему тот же дисперсионный состав в который их планируют добавлять.

Разработанное нами инициирующее устройство включает в себя навеску химического воспламенителя, общей массой 2,4 г, размещаемого в рабочей емкости. В качестве рабочей емкости лучше всего зарекомендовали себя пробирки Эпендорфа. Для такого количества химического воспламенителя мы использовали пробирку Эпендорфа объемом 1,5 мл.

Примененный нами химический воспламенитель по своему составу состоит из: 0,96 г циркониевого порошка; 0,72 г $Ba(NO_3)_2$ (нитрата бария); 0,72 г BaO (оксида бария).

Каждое устройство при электровоспламенении выделяет 10 кДж энергию. Давление, создаваемое двумя такими воспламенителями составит $P_{воспл}$ = (0,19± ±0,01) МПа. Применение такого рода устройства в нашем случае было экономически выгодно и менее трудозатратно по сравнению с приобретением стандартных промышленных воспламенителей описанных в [6—8].

Итогом первого (подготовительного) этапа, является загруженный в сосуд предварительной компрессии образец, подсоединенные к тоководам крышки инициирующего устройства в количестве 2 штук и направленные в противоположные друг от друга стороны и закрытая крышка СВК.

Второй этап является непосредственным этапом проведения эксперимен-

тальной работы, заключающейся в проведении эксперимента и обработки полученных результатов программными средствами.

Поскольку все подготовительные операции нами выполнены на первом этапе и установка полностью готова к работе, то на данном этапе мы работаем только с прикладным программным комплексом ExTest.

При успешном проведении эксперимента мы получим визуализированный в виде графика результат и искомые значения, а именно P_{max} и dP/dt, P_{ex} и K_{st}.

При работе на прикладном программном комплексе «ExTest» необходимо будет выполнить следующие действия:

1. Запустить программное обеспечение ExTest на компьютере, соединенным с блоком управления лабораторной установки.

2. Войти на вкладку «File» в открывшемся диалоговом окне выберите «New test». Второй способ открытия новой карты испытаний заключается в непосредственном нажатии на панели инструментов значка «Create a new test card».

3. Заполнить карту испытания. В пустые ячейки карты (диалоговые информационные окна) необходимо ввести для каждого конкретного испытания концентрацию пыли и концентрацию кислорода в воздухе, температуру и влажность воздуха окружающей среды. При длительной работе с одним и тем же веществом (маркой угля), для оптимизации дальнейшей работы, необходимо ввести краткие характеристики испытуемого образца, например такие как: название (номер) испытуемого образца; принадлежность образца; условия подготовки образца; дисперсность; влажность; энергия зажигания; задержка воспламенения; начальное давление в камере; начальная температура; нижний концентрационный предел; максимальное давление взрыва; минимальное взрывоопасное содержание кислорода; номер опыта; дата опыта. Дополнительно в соответствующих диалоговых окнах можно оставить комментарии, а также сохранить введенную информацию как шаблон карты испытаний для последующих опытов и изменения данных в ней. При этом поля «Test Standard» и «Test Device» выставляются по умолчанию.

4. После заполнения карты испытаний необходимо нажать на кнопку «Start Test», появится интерфейс сбора данных в ожидании триггерного сигнала.

5. Взвесить образец угольной пыли и поместите его в сосуд предварительной компрессии, плотно завинтите крышку сосуда.

6. Прикрутить пиротехнические воспламенители к концам электродных стержней верхней крышки основной камеры сгорания.

7. Закрыть основную крышку установки. Завинтить ее до упора и установить блокировку (Safety Interlock) в основное положение. На верху этой крышки к разъемам электродов необходимо подключить кабели зажигания.

Очередность выполнения операции 5, 6 и 7 на первом этапе или втором этапе на конечные результат не влияет.

8. Закрыть запорные вентили выхлопного крана и крана ввода газа и открыть вентиль вакуумного крана. Включить вакуумный насос. Когда стрелка вакуумметра остановится на –0,065 МПа закрыть вентиль вакуумного крана и отключить насос. Подождать около 3 с, затем установить значение вакуумметра на –0,06 МПа с помощью вентиля выхлопного крана.

9. Убедиться (еще раз проверить) в закрытии крана вакуумметра и закрытии остальных вентилей.

10. В том случае, если при заполнении карты испытания, забыли указать значение времени рассеяния пыли (Dust Dispersion Time) равное 50 мс, необхо-

димо задать задержку зажигания (Ignition Delay) равную 60 мс, а также давление мультифазного клапана сосуда предварительной компрессии (Setting Pressure) равное 2 МПа, то это можно сделать на встроенном интерфейсе лабораторного блока управления.

11. На лабораторном блоке управления нажать кнопку подготовки сжатого воздуха (Prepare Gas) для впрыска пыли внутрь камеры (рис. 3, кнопка 2). Кнопка «Prepare Gas» автоматически отключится, когда давления достигнет заданного уровня (Setting Pressure).

Заданные значения и готовность установки к работе можно увидеть на панели блока управления экспериментальной установки (см рис. 3, *а*, кнопки управления и 3, *б*, индикаторы).

12. Нажать кнопку «Manual Trigger» на интерфейсе сбора данных программы ExTest, после чего сразу нажать на кнопку зажигания (Ignite) на панели пользовательского интерфейса (см. рис. 3, кнопка 3).

Если избыточное давление ($P_{изб}$) превысило созданное воспламенителем давление ($P_{воспл}$) на 0,02 МПа, то считается, что взрыв угольной пыли произошел [2, 6—8]. После успешного воспламенения программа «ExTest» автоматически выведет кривую давления–времени по данному испытанию (см. рис. 4) и позволит получить исходные данные для дальнейшей их обработки и графической визуализации (см. рис. 5).

Рис. 3. Увеличенные фрагменты панели блока управления взрывной камерой: установленные значения и кнопки управления (а): 1 — циркуляция воды, 2 — сжатый газ, 3 — инициирования воспламенителей; *индикаторы готовности (б): 4* — питание установки, 5 — циркуляция воды, 6 — сосуд предварительной компрессии (при достижении заданных 2 МПа загорается зеленым цветом), 7 — инициирование, 8 и 9 — индикаторы готовности установки для воспламенения (перед воспламенением должны быть активны)

Fig. 3. Enlarged fragments showing blasting chamber control board panels: measured values and control buttons; availability indicators

С помощью массива данных, полученных прикладным программным комплексом ExTest по результатам эксперимента, в среде OriginPro построены зави-

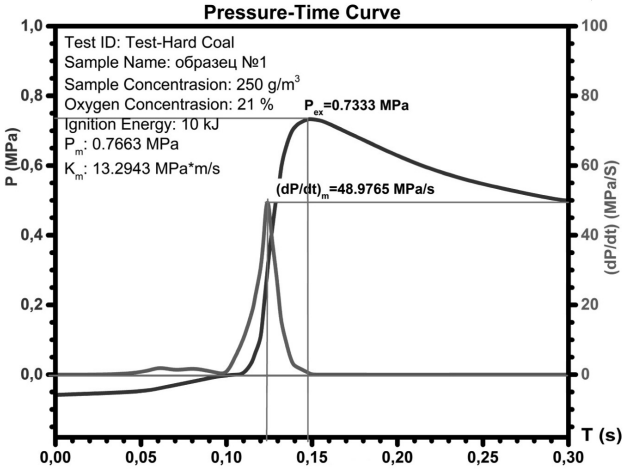

Рис. 4. Кривая давления-времени образца № 1 (визуализация средствами OriginPro)

Fig. 4. Time–pressure curve for specimen 1 (OringPro visualization)

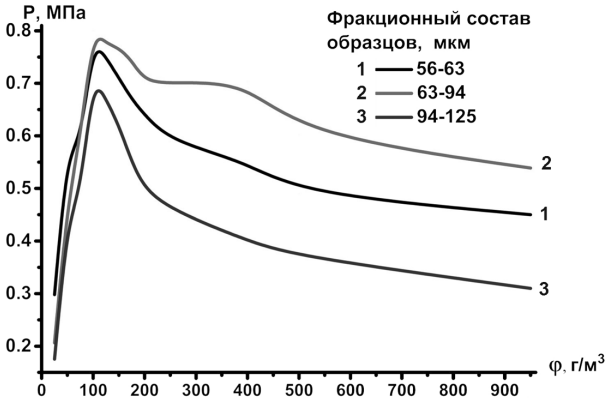

Рис. 5. График зависимости изменения давления взрыва от концентрации пылевоздушной смеси в объеме взрывной камеры установки

Fig. 5. Change in explosion pressure as function of air-and-dust concentration in the blasting chamber

симости динамики изменения давления взрыва от дисперсионного состава, приведенные на рис. 5.

13. Открыть выхлопной клапан для выравнивания давления в сосуде с атмосферным давлением и включить вытяжку, после чего нужно снять крышку установки и тщательно очистить ее внутреннюю часть с помощью воздушного компрессора.

14. Для получения более достоверных результатов необходимо повторить все предыдущие шаги (1—12) для других образцов угольной пыли без добавок. Желательно каждый из пяти образцов различных фракций пыли испытать несколько раз, изменяя концентрацию угольной пыли. Испытания начинать с концентрации 250 г/м^3, повышая концентрацию с шагом 250 г/м^3, или понижая, с шагом 50% от предыдущего значения концентрации в соответствии с приведенным ниже рядом значений: ...; 60; 125; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500; ... г/м^3.

15. Исследование влияния ингибиторов и флегматизаторов проводить в соответствии с вышеизложенным алгоритмом с пункта 1 по 12. С каждым из выбранных ингибиторов или флегматизаторов производить по 10 попыток воспламенения угольной пылевоздушной смеси с шагом концентрации в ней ингибитора 5% от массы угольной пыли.

Заключение

Указанная методика испытаний позволяет выявить наиболее значимые параметры воспламенения и взрыва угольной пылевоздушной смеси. Разработанная авторами инициирующее устройство из химического воспламенителя дает возможность полноценно заменить стандартные промышленные воспламенители и снизить трудозатраты на лабораторные испытания. При этом также появляется возможность регулировать энергию взрыва в широком диапазоне, настраивая испытуемую камеру под задачи исследователя. Результаты методики, визуализированные программными средствами, на экране монитора и качественно и количественно в он-лайн режиме могут оценить эффективность применения инертных и иных добавок в исследуемые пылевоздушные смеси.

Недостатком методики является слабый графический интерфейс программы ExTest, но данный недостаток устраняется с помощью различных программ позволяющих по массиву данных строить графики и их обрабатывать, например OriginPro.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *Абиев З.А., Родионов В.А.*, Жихарев С. Я., *Пихконен Л.В.* Исследование взрывчатых свойств каменноугольной пыли глубоких шахт Кузнецкого бассейна // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2018. — № 1. — С. 65—74.

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

4. *Coal* mine methane in Russia: Capturing the safety and inveronmental benefits. International Energy Agency: Information paper. — 2009. — 66 p.

5. *Нецепляев М.И., Любимова А.И., Петрухин П.М. и др.* Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. — М.: Недра, 1992. — 300 с.

6. *Determination* of explosion characteristics of dust clouds Part 1: Determination of the maximum explosion pressure Pmax of dust clouds BS EN 14034-1:2004+A1:2011.

7. *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.

8. *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.

9. *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. 119.

10. *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. — № 3. — С. 74—84.

11. *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—356. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.4.6.

12. *Колесниченко И.Е., Артемьев В.Б., Колесниченко Е.А., Черечукин В.Г., Любомищенко Е.И.* Теория горения и взрыва метана и угольной пыли // Уголь. — 2016. — № 6. — С. 30—35. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2016-6-30-35. РИАЗ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Абиев Заур Агаддович[1] — аспирант, e-mail: abievzaur@gmail.com,
Парамонов Геннадий Петрович[1] — доктор технических наук,
профессор, e-mail: paramonov_gp@pers.spmi.ru,
Чернобай Владимир Иванович[1] — кандидат технических наук,
e-mail: chernobay_vi@pers.spmi.ru,
Родионов Владимир Алексеевич — кандидат технических наук,
доцент, e-mail: 79213258397@mail.ru,
Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС РФ,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 5, pp. 26–34.

Z.A. Abiev, V.A. Rodionov, G.P. Paramonov, V.I. Chernobay

METHOD TO INVESTIGATE INFLUENCE OF INHIBITORY AND PHLEGMATIZING AGENTS ON IGNITABILITY AND EXPLOSIBILITY OF COAL DUST

The article describes the method of investigating effect of inhibitors and phlegmatizers on detonation combustion of coal dust. The topicality of the study ensues from the lack of knowledge on explosion of hybrid mixtures and on influence of detonation inhibitors used in explosion suppres

sion. The method rests on the international standards and on the personal experience gained by the authors of the article. The general layout of the testing facility is presented with the details of its core part. The tests are carried out in a spherical blasting chamber with a volume of 20 liters. The measurement equipment is described and the laboratory experimentation guidelines are proposed. The results are processed using ExTest application software system. The initiation device is described particularly, and composition of the chemical igniter is presented. The authors provide recommendations on improving accuracy of investigations and reliability of lab-scale measurements. The particulate composition of coal dust is evaluated based on physicochemical characteristics, and advisable size ranges for testing are given per fractions. The experimental results obtained using the described method are depicted by graphic charts. The investigation methods advantages and disadvantages are described.

Key words: investigation method, blast, inflammation, coal dust, inhibition, phlegmatization, explosion suppression, laboratory testing facility, rate of pressure rise during explosion, spherical blasting chamber.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-26-34

AUTHORS

Abiev Z.A.[1], Graduate Student, e-mail: abievzaur@gmail.com,
Paramonov G.P.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: paramonov_gp@pers.spmi.ru,
Chernobaj V.I.[1], Candidate of Technical Sciences, e-mail: chernobay_vi@pers.spmi.ru,
Rodionov V.A., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: 79213258397@mail.ru, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg University
of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia,
[1] Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

REFERENCES

1. Promyshlennaya bezopasnost' predpriyatiy mineral'no-syr'evogo kompleksa v XXI veke. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2017, no 1, pp. 82—87.

2. Abiev Z.A., Rodionov V.A., Zhikharev S. Ya., Pikhkonen L.V. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle.* 2018, no 1, pp. 65—74.

3. Kalyakin S.A., Shevtsov N.R., Kupenko I.V. *Ugol' Ukrainy*. 2012, no 2, pp. 24—30.

4. Coal mine methane in Russia: Capturing the safety and inveronmental benefits. *International Energy Agency: Information paper*. 2009. 66 p.

5. Netseplyaev M.I., Lyubimova A.I., Petrukhin P.M. *Bor'ba so vzryvami ugol'noy pyli v shakhtakh* (Combating coal dust explosions in mines), Moscow, Nedra, 1992, 300 p.

6. *Determination of explosion characteristics of dust clouds.* Part 1: Determination of the maximum explosion pressure Pmax of dust clouds BS EN 14034-1:2004+A1:2011.

7. *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

8. *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.

9. 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. 119.

10. Pikhkonen L.V., Rodionov V.A., Zhikharev S.Ya. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2017, no 3, pp. 74—84.

11. Rodionov V.A., Pikhkonen L.V., Zhikharev S.Ya. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2017. vol. 16, no 4, pp. 350—356. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.4.6.

12. Kolesnichenko I.E., Artem'ev V.B., Kolesnichenko E.A., Cherechukin V.G., Lyubomishchenko E.I. *Ugol'*. 2016, no 6, pp. 30—35. DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2016-6-30-35.