

ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 66.047: 621.374: 614.833.5

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРЕДЕЛОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ПЫЛЕВОЗДУШНЫМ СИСТЕМАМ

А. А. Сечин¹, Ю. Ф. Патраков², А. И. Сечин¹

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

E-mail: auct-68@yandex.ru, просп. Ленина, 30, 634050, г. Томск, Россия

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,

E-mail: yupat@icc.kemsc.ru, просп. Ленинградский, 10, 650065, г. Кемерово, Россия

Представлена экспериментальная методика определения критических условий распространения пламени в условиях равномерного распределения частиц в пылевом облаке при варьировании температуры инициирующего источника зажигания, что позволяет методом последовательных приближений оценивать пожаровзрывоопасные свойства угольной пыли. Показана возможность исследования эффекта холодного пламени при зажигании аэрозвеси угля и его перехода в горячий режим горения при увеличении концентрации пылевых частиц, что имеет большое значение для теории техники взрывобезопасности.

Угольная пыль, пожаровзрывоопасные свойства, экспериментальная установка

DOI: 10.15372/FTPRPI20190318

Угольная пыль является неизбежным атрибутом практически всех технологических стадий добычи, транспортировки, обогащения и переработки угля. Это обуславливает повышенную пожаровзрывоопасность объектов угольной промышленности и энергетики [1].

Воспламенение пылевоздушных смесей (ПВС) — многопараметрический процесс, поэтому принятые классификации и характеристики угольной пыли достаточно условны и не учитывают всего разнообразия факторов, которые могут обеспечить безаварийную работу таких предприятий. Разработка новых устройств и методик для изучения смачивающих свойств угольной поверхности [2, 3] и критических условий распространения пламени в аэрозвесах продолжает оставаться актуальной [4].

Актуальность данной проблемы заключается в необходимости определения чувствительности аэрозвеси к инициирующим факторам различных источников зажигания как при использовании современного высокопроизводительного угледобывающего оборудования [5], так и при разработке новых технологий обогащения и переработки угля, а также утилизации углетоходов [6]. В [7], опираясь на физико-химические свойства веществ и материалов, используемых на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях, решаются задачи идентификации рисков, оценки вероятности наступления неблагоприятных событий, определения структуры возможного ущерба. Учитывают эти свойства и разработчики практических рекомендаций по технологии выемки и хранению типов руд, склонных к самовозгоранию [8].

Разработанная методика оценки пожаровзрывоопасных свойств угольной пыли модифицирована относительно имеющихся аналогов и предполагает с помощью последовательных приближений оценивать критические концентрации пылевой взвеси, по которой возможно распространение пламени, при варьировании температуры инициирующего источника зажигания.

Изучение пожаро- и взрывоопасных характеристик пылевоздушных смесей проводилось на экспериментальной установке (рис. 1), включающей испытательную камеру, блок формирования пневматического импульса, блок управления, блок регистрации и блок формирования газовой среды.

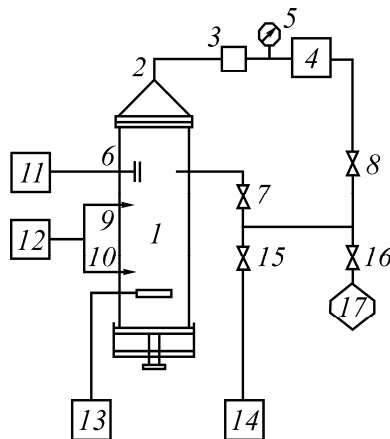


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию критических условий распространения пламени в аэровзвесьях: 1 — испытательная камера; 2 — распылительный конус, совмещенный с форсункой; 3 — электромагнитный клапан; 4 — ресивер; 5 — манометр; 6 — тензометрический датчик давления; 7, 8, 15, 16 — вентили; 9, 10 — термопарные датчики; 11 — тензометрическая станция с осциллографом С8-12; 12 — многоканальный самописец Н-338-6П; 13 — источник зажигания; 14 — компрессор; 17 — блок формирования газовой среды

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В предварительно герметизированной реакционной камере (рис. 2) при включенных блоках регистрации и инициирующего источника зажигания, температура которого 1050 °С, проводят холостой опыт с начальным избыточным давлением в ресивере 50.7 кПа. В дальнейшем полученные показания этого опыта используют для сравнения с показаниями рабочих опытов.

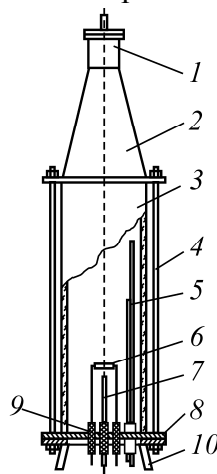


Рис. 2. Испытательная камера: 1 — форсунка; 2 — распылительный конус; 3 — взрывной стеклянный цилиндр; 4 — крепежные стержни; 5, 7 — термопары; 6 — спираль накаливания; 8 — нижний фланец; 9 — фторопластовые вводы; 10 — подставка

В форсунку помещают навеску исследуемого вещества массой 0.05 г, устанавливают давление воздуха в ресивере 50.7 кПа, включают регистрационный блок в режим регистрации и осуществляют пуск установки. Если пламя распространилось до верхней термопары и выше и произошел отличный от холостого опыта рост давления, то опыт считается положительным, в противном случае или при отсутствии одного из показателей (распространения пламени до верхнего фланца камеры или отсутствия роста давления) считается отказом.

Вскрывая форсунку, проверяют: все ли вещество участвовало в распылении. Если в форсунке осталось нераспыленное вещество, повторяют опыт, увеличивая распыляющий импульс на 10.1 кПа до тех пор, пока форсунка не остается пустой, что свидетельствует о полном распылении образца. В случае пустой форсунки опыт повторяют с прежней навеской, уменьшая распыляющий импульс на 10.1 кПа. Таким образом определяется оптимальный распыляющий импульс для данной навески конкретного вещества.

Если воспламенение и распространение пламени не обнаружено, навеску увеличивают на 0.05 г. Получив положительный результат при очередной навеске, начинают искать предельные условия распространения пламени, уменьшая или увеличивая навеску на 0.01 г. Так поступают до тех пор, пока не будут найдены две концентрации пыли, различающиеся не более чем на 0.01 г, при одной из которых происходит воспламенение, а при другой отказ. Наличие или отсутствие воспламенения проверяют серией контрольных экспериментов. Их проводят не менее 10, с навеской, не дающей воспламенения. В случае одного воспламенения навеску понижают на 0.01 г, и так до тех пор, пока не получают всю серию невоспламенения аэрозвеси. После проведения каждого опыта снимают нижний фланец, отключая источник зажигания, и очищают реакционную камеру от осевшей пыли и продуктов сгорания, продувают ее сжатым воздухом.

Определяя область горения пылевой взвеси при изменении температуры иницирующего источника зажигания, эксперимент проводят по вышеизложенной методике. Температуру источника зажигания последовательно снижают с дискретностью 50 °С до тех пор, пока пылевая взвесь не перестанет воспламеняться, а горение распространяться по всему объему реакционной камеры. Испытываемую пыль, готовя к опытам, отсеивают на узкие фракции. Испытания начинают с самой мелкой фракции, так как чаще оказывается, что мелкая пыль опаснее крупной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Апробация методики и установки для исследования критических условий распространения пламени в пылевоздушной смеси выполнялось на бензойной кислоте. Так, для частиц размером 160–200 мкм нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) составил 36.7 г/м³ при температуре иницирующего источника 1100 °С, что согласуется с имеющимися в литературе данными [9]. Таким образом, предлагаемая экспериментальная методика коррелирует с утвержденной стандартом методикой [10] и расширяет область ее применения.

Разработанная методика использована для определения критических условий воспламенения угольной пыли на примере кузнецкого угля марки К. Для проведения опытов использованы следующие фракции: 0–100, 100–200, 200–250 мкм. Полученные результаты демонстрируют сильную зависимость НКПР от размера угольных частиц:

Фракция угольной пыли, мкм	0–100	100–200	200–250
Нижний концентрационный предел взрываемости, г/м ³	65	100	125

Все исследованные фракции данного образца угля относятся к пожароопасной категории. Следует отметить, что ПВС угольных фракций при проведении исследований горели без выраженного роста давления. Полученные результаты подтверждают сильное влияние на скорость химических реакций в зоне горения как температуры иницирующего источника зажигания, так и величины реакционной поверхности (размера частиц). Можно полагать, что существует некоторая мини-

мальная температура инициирующего источника зажигания, позволяющая запустить химические процессы окисления в системе “горючее–окислитель”. Это будет не температура самовоспламенения аэровзвеси, а температура источника зажигания, при которой возможно распространение пламени по всему объему ПВС определенной дисперсности и концентрации.

Исследование образца кузнецкого угля марки СС (0–50 мкм) показало предел взрываемости 525 г/м^3 . Отмечено, что горение может протекать без роста давления и активного распространения пламени по объему реакционной камеры. Режим такого горения стал наблюдаться с концентрации 425 г/м^3 .

Влияние температуры инициирующего источника зажигания исследовано на образце кузнецкого угля марки КО (0–50 мкм). Из рис. 3 видно, что аэровзвесь более чувствительна к инициированию источником зажигания с более высокой температурой.

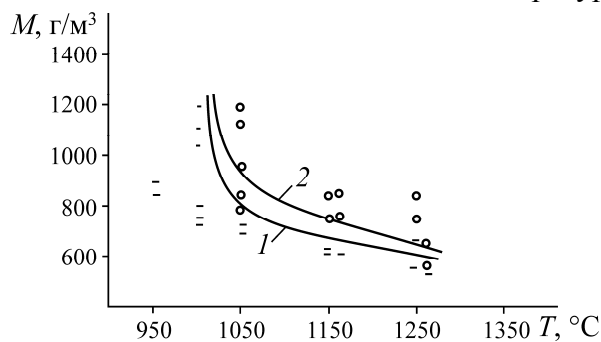


Рис. 3. Зависимость предельной величины распространения пламени по аэровзвеси угля марки КО от размера критической температуры инициирования горения: 1 — область холодных пламен; 2 — область горячих пламен

Наблюдения за распространением фронта пламени показали, что горение угольной пыли до определенных концентраций характеризуется слабым развитием избыточного давления в реакционной камере. По аналогии горения смесей углеводородов с воздухом [11–13] возможно предположить для угольной пыли наличие так называемого режима холодного пламени. При этом переход фронта горения в область горячих пламен (с заметным ростом давления) происходит при увеличении концентрации аэровзвеси на $100–120 \text{ г/м}^3$. Точка, характеризующая процесс горения холодного пламени, — 750 г/м^3 при температуре инициирующего источника зажигания $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ (кривая 1, рис. 3), а точка в режиме горячего пламени — 870 г/м^3 при той же температуре инициирующего источника зажигания (кривая 2, рис. 3). Механизм распространения пламени по аэровзвеси в данном случае существенно отличается от газофазного холодного пламени идеальных систем и упрощенно может быть интерпретирован как эстафетная передача теплового импульса от одной угольной частицы к другой [14, 15]. В связи с этим он определяется намного большим числом параметров (дисперсный состав пыли, концентрация кислорода и теплопроводность газовой фазы, механизм и скорость горения угольной частицы и др.).

Холодные пламена являются основной формой нетеплового самоускоряющегося режима реакции. Для задач техники взрывобезопасности они важны лишь потому, что способны инициировать горячие пламена во взрывчатых системах, т. е. начинать цепочно-тепловой взрыв. Возможность инициирования горячего пламени при умеренных температурах определяет существующую опасность, поскольку рост давления на собственно холоднопламенной стадии обычно невелик.

Таким образом, проводя исследования по методике, рекомендованной ГОСТом, невозможно варьировать температурой источника зажигания, что значительно ограничивает представление о процессе воспламенения.

ВЫВОДЫ

Предложена методика определения критических условий распространения пламени в условиях равномерного распределения пылевого облака при варьировании температуры инициирующего источника зажигания. Она позволяет проводить более точное категорирование вещества, а значит, и производства по пожаровзрывоопасности с последующей разработкой соответствующих мероприятий.

Показана возможность возникновения так называемого холодного пламени при зажигании аэрозвеси угля и его перехода в горячее пламя при увеличении концентрации пыли, что имеет большое значение для теории техники взрывобезопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Романченко С. Б., Руденко Ю. Ф., Костеренко В. Н. Пылевая динамика в угольных шахтах. — М.: Горное дело, 2011. — 256 с.
2. Архипов В. А., Палеев Д. Ю., Патраков Ю. Ф., Усанина А. С. Определение краевого угла смачивания угольной поверхности // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 23–28.
3. Архипов В. А., Палеев Д. Ю., Патраков Ю. Ф., Усанина А. С. Определение смачиваемости угольной пыли // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 170–179.
4. Бакланов А. М., Валиулин С. В., Дубцов С. Н., Замашиков Н. Н., Клишин В. И., Конторович А. Э., Коржавин А. А., Онищук А. А., Палеев Д. Ю., Пуртов П. А. Наноаэрозольная фракция в техногенной угольной пыли и ее влияние на взрывоопасность пылеметановоздушных смесей // Докл. АН. Физ. химия. — 2015. — Т. 461. — № 3. — С. 295–299.
5. Торро В. О., Тациенко В. П., Ремезов А. В. Анализ схем проветривания выемочных полей на мощных пологих угольных пластах // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 15–22.
6. Папин А. В., Игнатова А. Ю., Неведров А. В., Черкасова Т. Г. Получение топливных брикетов из тонкодисперсных отходов угледобычи и углепереработки // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 43–49.
7. Михайлов В. Г., Коряков А. Г., Михайлов Г. С. Управление экологическими рисками в процессе добычи и переработки угля // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 83–91.
8. Кумыков В. Х., Кумыкова Т. М. Технология добычи и складирования пожароопасных руд // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 99–106.
9. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд.: Кн. 1 / Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Н. Г. и др. — М.: Химия, 1990. — 496 с.
10. ГОСТ 12.1.044-89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 144 с.
11. Bonner V. J. and Tipper C. F. Cool-flame combustion of hydrocarbons, 10th Symp. Combust. Pittsburgh: Combust. Inst., 1965. — P. 145–149.
12. Heand Schneider J. A. and Volanski C. Some aspects of the cool flame and low-temperature ignition of methane, Rev. Roum. Chim., 1973, Vol. 18, No. 2. — P. 195–201.
13. Barnard J. A. and Harwood B. A. Slow combustion and slow-flame behaviour of iso-octane, Combust. and Flame, 1973, Vol. 21, No. 3. — P. 354–356.
14. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980. — 478 с.
15. Айруни А. Т., Клебанов Ф. С., Смирнов О. В. Взрывоопасность угольных шахт. — М.: Горное дело, 2011. — 264 с.

*Поступила в редакцию 28/II 2019
После доработки 22/III 2019
Принята к публикации 28/V 2019*