

DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.12.4.001

УДК 534.222.2+536.46+622

© А.В. Пинаев, П.А. Пинаев, 2019

А.В. ПИНАЕВ

д-р физ.-мат. наук, доцент,
главный научный сотрудник
Институт гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
г. Новосибирск
e-mail: avpin@ngs.ru



П.А. ПИНАЕВ

младший научный сотрудник
Институт лазерной физики СО РАН,
г. Новосибирск
e-mail: pavel_academ@mail.ru



ИЗУЧЕНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МЕТАНА И ВЗВЕСЕЙ ЧАСТИЦ УГЛЯ ПРИ ГОРЕНИИ, ВЗРЫВАХ И ДЕТОНАЦИИ

Представлены экспериментальные исследования дефлаграционных, взрывных и детонационных волн в газовых смесях CH_4/Air , CH_4/O_2 с взвесями в них частиц каменного угля размером $0\div 200$ мкм. Исследования выполнены в ИГиЛ СО РАН. Инициирование осуществлялось искрой с энергией 1 Дж либо детонационной волной с удельной энергией инициирования $3,88\div 27,6$ МДж/м³. Проведено сравнение структуры и параметров волн в бедных по метану смесях газов и в тех же газовых смесях с взвесью угольного порошка со среднеобъёмной плотностью от 20 до 700 г/м³. Выполнен структурный анализ исходного угольного порошка и порошка угля после воздействия на него высокотемпературных волн.

Ключевые слова: МЕТАН, УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ, ШАХТНЫЕ ВЗРЫВЫ, ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ, ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВНАЯ ВОЛНА, ДЕТОНАЦИЯ, РЕНТГЕНОГРАММЫ УГЛЯ.

Введение

Концентрация витающей угольной пыли в шахте ($\rho \leq 1$ г/м³) на 2–3 порядка меньше нижнего концентрационного предела взрываемости (30–80 г/м³) угольной пыли [1–3]. Угольная пыль накапливается в процессе добычи угля на стенках канала горной выработки. Взрывы метана, угольной пыли, метана и угольной пыли считаются основными видами

взрывов в шахтах. Первичные волны сжатия наиболее часто возникают при взрывах метановоздушных смесей в местах локального выброса метана из угольного пласта. После чего взрывная волна ударная волна (УВ) с движущимися на удалении от фронта продуктами сгорания) может, срывая угольную пыль по периметру канала, создать облако угольной пыли и воспламенить его [1–6]. Горение, взрыв и детонация в гибридных сис-

темах угольная пыль — CH_4/Air , Air изучены меньше, чем аналогичные процессы в метано-воздушных смесях.

В натурных взрывных экспериментах в шахтах начальный участок канала диаметром d от 1 до 3 м отделяют от остальной его части перегородкой из бумаги или полиэтилена и заполняют метаном. После перемешивания метана с воздухом смесь подрывают воспламенителем с энергией до нескольких кДж. Как правило, безразмерная длина заполненного метановоздушной смесью участка $\bar{L} = L/d \approx 3 \div 20$, взрывная волна не успевает перейти в детонацию и является околосвуковой [5–8]. За мембраной на длинной части канала взрывная волна замедляется при движении в воздухе и зонах с пассивными и активными средствами ослабления взрыва [5–10]. Для проведения таких исследований необходимы большие ресурсы времени, средств и инженерно-технического персонала.

Экспериментальному и теоретическому изучению процесса затухания и возбуждения взрывных и детонационных волн (ДВ) в запылённых средах посвящены, например, работы [11–21]. В квазистатических условиях взрывчатость угольной пыли исследуют в замкнутом объёме по методике п. 4.11 [22]. В [23] угольную пыль распыляли внутри герметичного сосуда объёмом около 4 л в воздухе при нормальных условиях и зажигали между электродами в центре камеры высоковольтным разрядом с энергией 1 кДж. В процессе горения пыли давление в сосуде плавно нарастало в течение примерно 35 мс до максимальной величины P_{max} (нескольких атмосфер), которая считалась давлением взрыва. Эксперименты по изучению взрывчатости угольной пыли в малом замкнутом объёме не моделируют взрыв пыли в протяжённом (открытом) цилиндрическом канале шахты.

Одна из важных и до конца не решённых задач взрывобезопасности — это выяснение сравнительной химической активности метана и угольной пыли при шахтных взрывах [24]. Для решения данной задачи достаточно в лабораторных опытах на ударной трубе сравнить между собой реакцию активность бедных по метану смесей и тех же гибридных смесей метана с угольной пылью. Цель настоящей работы — в газовых смесях $\text{CH}_4/$

Air , CH_4/O_2 с взвесьями мелкодисперсного угля получить экспериментальные данные о параметрах и структуре волн горения и детонации на начальной стадии их возбуждения при варьировании интенсивности инициирующей волны и концентрации взвеси.

Экспериментальная установка, методика эксперимента

Эксперименты проводили при температуре 16–18°C на вертикальной ударной трубе L 6,75 м, d 70 мм, $\bar{L} = L/d \approx 96$. Такая величина \bar{L} обычно достаточна для выхода на режим нормальной детонации. Перед опытом трубу вакуумировали и заполняли либо газовыми смесями (CH_4/O_2 , CH_4/Air), либо смесями тех же газов с взвесью мелкодисперсного угля (гибридными смесями). Взвесь угля создавали при прохождении газовой смеси через контейнер с порошком каменного угля и генератор пыли. Масса m и среднеобъёмная концентрация ρ частиц угольной пыли в трубе $0,6 \div 15,7$ г и $23 \div 700$ г/м³. Газовые смеси составляли по манометру класса 0,4 в баллоне ёмкостью 40 л. Инициирование волн горения и детонации осуществляли либо высоковольтной искрой с энергией $W_i \approx 1$ Дж, либо секциями инициирования (СИ), отделяемыми от рабочей секции (РС) лавсановыми диафрагмами. СИ заполняли смесью $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2$ при начальном давлении $p_{oi} = 0,05 \div 0,36$ МПа и инициировали искрой. После детонационного сгорания смеси в СИ выделялась энергия инициирования $W_i \approx 15 \div 106$ кДж (уд. энергия $w_i = 4W_i / \pi d^2 \approx 3,8 \div 27,6$ МДж/м²). Температура продуктов детонационного сгорания смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2$ около 4000 К, скорость взрывных волн на верхнем участке РС $1000 \div 1400$ м/с. Температура самовоспламенения угля 400 °С, горения — 470 °С.

Профили свечения и давления в волнах сжатия регистрировали тремя четырехлучевыми осциллографами Tektronix TDS2014, сигналы на которые поступали с фотумножителей ФЭУ1 ÷ ФЭУ3 и пьезодатчиков ПД1 ÷ ПД8 через истоковые повторители с постоянной времени 0,5 ÷ 2 с. Датчики ПД1 ÷ ПД8 расположены от начала трубы на

расстояниях $x_i = 790, 910, 1825, 2860, 2980, 5290, 5490, 6049$ мм соответственно, ФЭУ1 установлен напротив ПД3, ФЭУ2 — на расстоянии $x = 2485$ мм, ФЭУ3 — напротив ПД7. Погрешности измерения давления не превышали 5 %, скорости волн — 1 %.

Приготовление угольного порошка, его состав

Куски каменного угля Кузбасса размером до 1 см измельчали 2 часа на галтовочной машине со стальными шариками диаметром от 10 до 40 мм. При отсеве угольного порошка через сито с ячейкой 500 мкм убиты частицы размером $> 0,5$ мм. После пробного отсева 100 г исходной фракции через набор сит 200, 140, 94 мкм получены 4 фракции угля с соответствующей весовой долей 41, 15, 20 и 16 г. Порошок и сита взвешивали на весах с по-

грешностью 0,1 г и исследовали с помощью микроскопа. Частицы менее 10 мкм не отсеиваются в остаток и присутствуют среди крупных частиц, а также на ситах (8 г), поэтому реальная доля частиц $200 \div 140$ и $140 \div 94$ мкм ниже приведённых выше значений. По этой причине исходный порошок отсеян через одно сито с ячейкой 200 мкм, получены фракции $200 \div 500$ мкм и $0 \div 200$ мкм. Фракция $200 \div 500$ мкм хорошо сыпется, фракция $0 \div 200$ мкм имеет плохую сыпучесть и склонна к конгломерации за счет связующей мелкой фракции. Все опыты проведены на угольном порошке $0 \div 200$ мкм. Генератор пыли обеспечивал равномерное поступление взвеси угля в трубу. Снимки с различным увеличением и элементный состав частиц каменного угля и примеси получены на сканирующем электронном микроскопе Merlin compact, Zeiss (рис. 1 и табл. 1, 2).

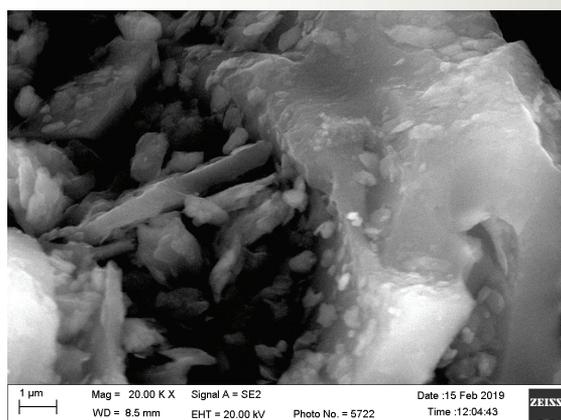


Рис. 1. Электронный микроскоп, фракция $0 \div 200$ мкм каменного угля, увеличение 20 000

Таблица 1

Средний массовый и атомный процент хим. элементов на частицах угля

Элемент	C	O	Si	Al	Ca	S	Cu	Fe	K	Mg	Na
% масс.	78,35	19,75	0,69	0,41	0,25	0,16	0,12	0,09	0,04	0,03	0,02
% атом.	83,44	15,79	0,31	0,19	0,08	0,06	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01

Таблица 2

Средний массовый и атомный процент химических элементов на частицах примеси

Элемент	C	O	Si	Fe	Al	Ca	Mg	K	Ti	Cu	P
% масс.	25,08	39,06	13,33	8,41	7,79	2,69	1,95	0,81	0,34	0,29	0,09
% атом.	36,98	43,79	8,41	2,69	5,13	1,18	1,43	0,36	0,13	0,08	0,05

Основные элементы угля — С, О, Si, Al, примеси — С, О, Si, Al, Fe, Ca, Mg. В примеси доля С убывает, а доли О, Si, Al, Fe, Ca и Mg возрастают по сравнению с углем.

Частицы угля и примеси исследованы на рентгеновском дифрактометре D8-Advance (излучение CuK α). Для каменного угля линии кристаллического углерода отсутствуют, в окрестности угла 26° присутствует широкое гало, соответствующее аморфному углероду. Кристаллические вещества в частицах примеси соответствуют линиям кварца (SiO $_2$), а также близким между собой линиям каолинита Al $_4$ [Si $_4$ O $_{10}$](OH) $_8$ и хлорита (Mg, Fe, Al) $_6$ (Al, Si) $_4$ O $_{10}$ (OH) $_8$ — компонентам глины. В большем количестве в образцах присутствует каолинит, так как содержание Si, Al заметно больше, чем Fe, Mg.

Результаты экспериментов

1.1. Детонация в бедной по горючему газовой смеси 0,081CH $_4$ + 0,919O $_2$. Расчётные параметры для этой газовой смеси при $p_0 = 0,10$ МПа — скорость детонации $D_0 \approx 1640$ м/с, размер ячейки (длины зоны реакции) $a \approx 30$ мм [25]. При иницировании исследуемой смеси волной газовой детонации с помощью СИ ($p_{oi} = 0,15$ МПа) в РС возбуждается ДВ, которая в верхней половине трубы ускоряется, в нижней части трубы распространяется практически в режиме Чепмена-Жуге. Скорости ДВ между ПД1 ÷ ПД8: $D_{12} \approx 1200$, $D_{24} \approx 1182$, $D_{45} \approx 1091$, $D_{67} \approx 1626$, $D_{78} \approx 1600$ м/с. Профили давления вблизи фронта имеют характерный для газовой детонации с химпиком вид. Отражённая от торца трубы ДВ становится ударной волной. Здесь и в дальнейших опытах скорость отражённой УВ возрастает ($D_{87} \approx 927$, $D_{76} \approx 952$ м/с) из-за изменения массовой скорости и давления встречного потока.

При более сильном иницировании ($p_{oi} = 0,2$ МПа, $w_i \approx 15,3$ МДж/м 2) волна распространяется с начала трубы с детонационной скоростью: $D_{12} \approx 1714$, $D_{24} \approx 1600$, $D_{45} \approx 1592$, $D_{67} \approx 1613$, $D_{78} \approx 1562$ м/с. Скорости отражённой УВ $D_{87} \approx 767$, $D_{76} \approx 816$ м/с.

1.2. Детонация в гибридной смеси (0,081CH $_4$ + 0,919O $_2$) / уголь. Стехиометрическому составу соответствует смесь 0,081CH $_4$ + 0,919O $_2$ + 0,757С. В объёме РС ударной трубы при $p_0 = 0,10$ МПа для стехиометрии необходимо 10,6 г углерода, что соответствует массе угольной взвеси $m \approx 13,5$ г ($\rho \approx 603$ г/м 3). В отличие от газовой смеси ДВ в гибридной смеси на начальном участке при $p_{oi} = 0,15$ МПа приобретает практически стационарную скорость. Свечение в волне из-за горения частиц угля более интенсивное и длительное по сравнению с газовой смесью 0,081CH $_4$ + 0,919O $_2$ (рис. 2). Из-за неполного сгорания взвесь угля проявляет себя частично как химически инертная среда: в ДВ происходит потеря импульса, скорость детонации в конце трубы примерно на 20 м/с меньше, чем в газовой смеси. Скорости отражённой от торца трубы УВ $D_{87} \approx 927$, $D_{76} \approx 952$ м/с.

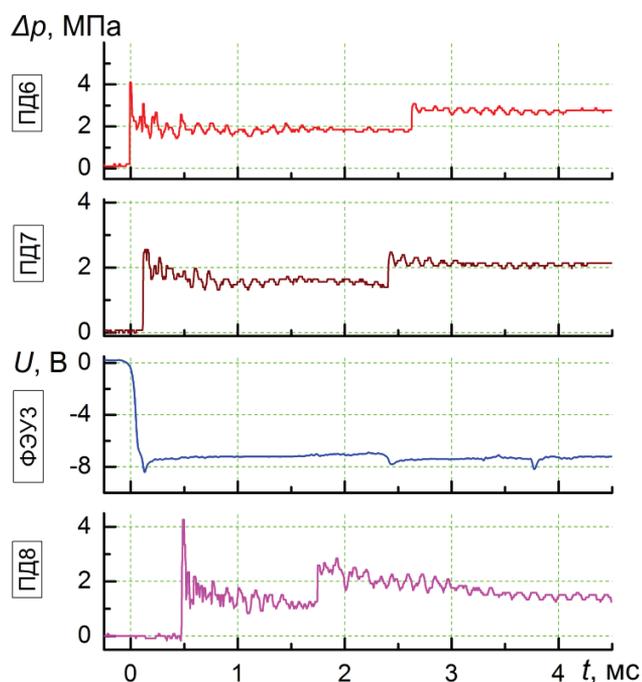


Рис. 2. Осциллограммы давления и свечения, гибридная смесь (0,081CH $_4$ + 0,919O $_2$) / уголь, $\rho \approx 190$ г/м 3 ; $p_0 = 0,10$ МПа, $p_{oi} = 0,15$ МПа, $w_i \approx 11,5$ МДж/м 2 , $D_{24} \approx 1639$, $D_{45} \approx 1714$, $D_{67} \approx D_{78} \approx 1575$ м/с

В опытах с более сильным иницированием ($p_{oi} = 0,20$ МПа, $w_i \approx 15,3$ МДж/м 2) при $\rho = 248$ –260 г/м 3 ДВ распространяется также практически стационарно: $D_{12} \approx 1670 \pm 5$,

$D_{24} \approx 1652 \pm 20$, $D_{45} \approx 1656 \pm 13$, $D_{67} \approx 1614 \pm 5$, $D_{78} \approx 1633 \pm 11$ м/с. Свечение в волне детонации превышает по интенсивности и длительности (> 3 мс) свечение в газовой смеси. Скорости отражённой ударной волны $D_{87} \approx 849 \pm 20$, $D_{76} \approx 909 \pm 5$ м/с.

Горение частиц угля конкурирует с горением метана, но результирующее тепловыделение в зоне реакции существенно не меняется, скорость детонации не возрастает. Отражённая от торца трубы волна — УВ. После опытов увеличивается доля частиц примеси с идеальной сферической формой размером от долей до десятков микрометров. Вероятно, эти частицы успевают прогреться в волне детонации и расплавиться. После чего они приобретают форму шара за счёт сил поверхностного натяжения и сохраняют форму при остывании. Из спектральных измерений следует, что концентрации элементов на частицах угля до и после опытов близки между собой и находятся внутри диапазона разброса данных.

1.3. Низкие давления, детонация в газовой смеси $0,081\text{CH}_4 + 0,919\text{O}_2$. Чтобы выяснить влияние длины зоны реакции на параметры детонации и степень выгорания частиц угля, выполнены эксперименты при пониженных $p_0 = 0,025$ МПа ($a \approx 120$ мм — увеличивается обратно пропорционально p_0). На осциллограммах первые пики свечения в течение 0,25–0,75 мс соответствуют реакции метана с

кислородом. Свечение в зоне реакции ДВ на нижнем участке трубы длится примерно 0,7 мс, т. е. светящаяся область имеет протяжённость около 1 м. Скорости ДВ: $D_{12} \approx 1463$, $D_{24} \approx 1632$, $D_{45} \approx 1579$, $D_{67} \approx 1492$, $D_{78} \approx 1606$ м/с; скорости отражённой УВ: $D_{87} \approx 747$, $D_{76} \approx 784$ м/с. Волна детонации через 2,5 м выходит на одноголовый спиновый режим с частотой вращения $f \approx 7,41$ кГц, из соотношения $c = \pi df / 1.84$ [26] скорость звука в продуктах детонации $c_1 \approx 886$ м/с.

1.4. Низкие давления, детонация в гибридной смеси $(0,081\text{CH}_4 + 0,919\text{O}_2)$ / уголь. В гибридной смеси свечение в зоне реакции и за ней усиливается из-за горения частиц угля, что приводит к слиянию двух пиков свечения и увеличению времени горения (рис. 3а, б). Здесь скорости фронта ДВ: $D_{12} \approx 1791$, $D_{24} \approx 1726$, $D_{45} \approx 1622$, $D_{67} \approx 1575$, $D_{78} \approx 1643$ м/с, скорости отражённой УВ: $D_{87} \approx 833$, $D_{76} \approx 909$ м/с. Скорость ДВ в конце трубы возрастает примерно на 40 м/с. Волна детонации во второй половине трубы выходит на одноголовый спиновый режим с частотой вращения $f \approx 7,94$ кГц, для которой скорость звука в продуктах детонации $c_2 \approx 949$ м/с. Температура за зоной реакции в гибридной смеси $T_2 \approx T_1 \sqrt{c_2/c_1} \approx 1.15 T_1$ возрастает примерно на 15 % по сравнению с температурой T_1 при детонации в той же газовой смеси.

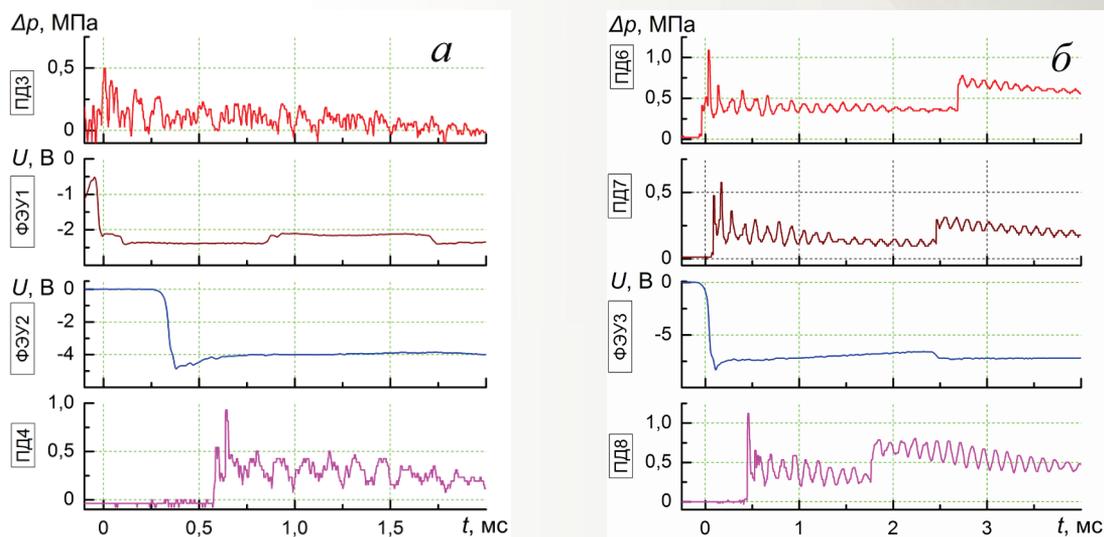


Рис. 3. Осциллограммы давления и свечения, гибридная смесь ($\text{CH}_4 + 10,52\text{Air}$) / уголь, $p_0 = 0,025$ МПа, $\rho \approx 126$ г/м³, $p_{oi} = 0,1$ МПа, $w_i \approx 7,7$ МДж/м²

2.1. Волны горения в РС и СИ, газовая смесь $\text{CH}_4 + 10,52\text{Air}$ (диафрагм нет), инициирование искрой. Расчётные детонационные параметры для смеси при $p_0 = 0,1$ МПа: $D_0 = 1770$ м/с, $a = 259$ мм, давление в плоскости Чепмена–Жуге $P_{CJ} = 1,66$ МПа [25]. Эта смесь примерно на 10 % беднее по метану, чем стехиометрическая метановоздушная смесь $\text{CH}_4 + 9,524\text{Air}$. В трубе d 70 мм стационарная детонация распространяться не может даже в спиновом режиме, поскольку $\pi d < a$. При $p_0 = 0,05$ МПа смесь искрой не иницируется, при $p_0 = 0,085$ МПа пламя начинает распространяться в околоредельном режиме, $D < 1$ м/с. При $p_0 = 0,1$ МПа пламя устойчиво распространяется в трубе, волны сжатия опережают фронт пламени. Свечение в волне горения слабое и длится приблизительно 70–200 мс. Скорости фронта пламени $D_{24} \approx 325$, $D_{45} \approx 120$, $D_{67} \approx 0,91$ – $1,25$, $D_{78} \approx 1,44$ м/с, отражённая волна отсутствует.

2.2. Волны горения в РС и СИ, гибридная смесь ($\text{CH}_4 + 10,52\text{Air}$) / уголь (диафрагм нет), инициирование искрой. В гибридной смеси интенсивность свечения в волне горения возрастает более чем на порядок, волны сжатия к концу трубы становятся круче, чем в газовой смеси. Скорости фронта пламени $D_{25} \approx 13$, $D_{35} \approx 10$ – 15 , $D_{78} \approx 1,82$, $D_{89} \approx 1,15$ м/с.

2.3. Взрывные затухающие волны в газовой смеси $\text{CH}_4 + 10,52\text{Air}$. Инициирование газовой смесью $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$ с помощью СИ. При таком мощном инициировании по РС распространяется затухающая по длине трубы взрывная волна. Между ФЭУ1 и ФЭУ2 скорость фронта пламени $D_{nn} = 600$ м/с, свечение отстаёт на этом участке от фронта УВ на 450 мкс. В нижней части трубы на ФЭУ3 пламя отстаёт от УВ уже на 4 мс.

В отражённой волне, распространяющейся по горячему газу, реализуется режим стационарной низкоскоростной детонации: $D_{87} \approx 1264$, $D_{76} \approx 1290$, $D_{42} \approx 1168$, $D_{21} \approx 1200$ м/с. Начало свечения в ДВ практически совпадает с передним ударным фронтом волны.

С увеличением мощности иницииро-

вания ($p_{oi} = 0,2$ МПа, $w_i \approx 15,3$ МДж/м²) при $p_0 = 0,1$ МПа в ударной трубе формируется более сильная взрывная волна, $D_{12} = 1200$, $D_{24} = 1083$, $D_{45} = 1043$, $D_{67} = 930$, $D_{78} = 927$ м/с. Газовая смесь также сгорает не полностью, отражённая волна — это волна низкоскоростной детонации ($D_{87} \approx 1369$, $D_{76} \approx 1429$ м/с, $D_{54} \approx 1412$, $D_{42} \approx 1444$, $D_{21} \approx 1500$ м/с), свечение начинается на её фронте.

2.4. Взрывные затухающие волны в гибридной смеси ($\text{CH}_4 + 10,52\text{Air}$) / уголь. Инициирование газовой смесью $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$ с помощью СИ. При тех же условиях ($p_{oi} = 0,1$ МПа, $p_0 = 0,1$ МПа) в гибридной смеси ($\text{CH}_4 + 10,52\text{Air}$) / уголь ($m \approx 6,0$ г, $\rho \approx 229$ г/м³) свечение за взрывной волной благодаря горению частиц угля возрастает более чем на порядок по сравнению с предыдущим случаем. Однако из-за отрыва пламени от переднего ударного фронта на верхнем участке трубы примерно на 30 см горение угля начинается примерно в этой же области и не приводит к ускорению волны. Скорости фронта волн по длине: $D_{12} \approx 1000$, $D_{24} \approx 882$, $D_{45} \approx 857$, $D_{67} \approx 909$, $D_{78} \approx 757$ м/с. Отрыв пламени от фронта с расстоянием увеличивается, но внизу трубы за передним ударным фронтом формируется пологая волна сжатия с мощным свечением в ней. Эта волна сжатия движется к переднему фронту, и она встречается с отражённой от торца трубы волной. Отражённая волна — это низкоскоростная ДВ ($D_{87} \approx 1337$, $D_{76} \approx 1429$, $D_{42} \approx 1423$ м/с).

При более мощном инициировании ($p_{oi} = 0,2$ МПа) в гибридной смеси происходят качественные и количественные изменения и резко усиливается свечение за фронтом волны (см. рис. 4). Скорость волны увеличивается: $D_{12} \approx 1200$, $D_{24} \approx 1089$, $D_{45} \approx 1091$, $D_{67} \approx 917$, $D_{78} \approx 927$ м/с. Внизу трубы формируется за фронтом УВ волна сжатия со свечением. Отражённая волна является детонационной — $D_{87} \approx 1983$, $D_{76} \approx 2000$ м/с, наблюдается мощное свечение во фронте отражённой ДВ. На верхнем участке трубы скорость отражённой ДВ $D_{54} \approx 1522$, $D_{42} \approx 1444$, $D_{21} \approx 1500$ м/с.

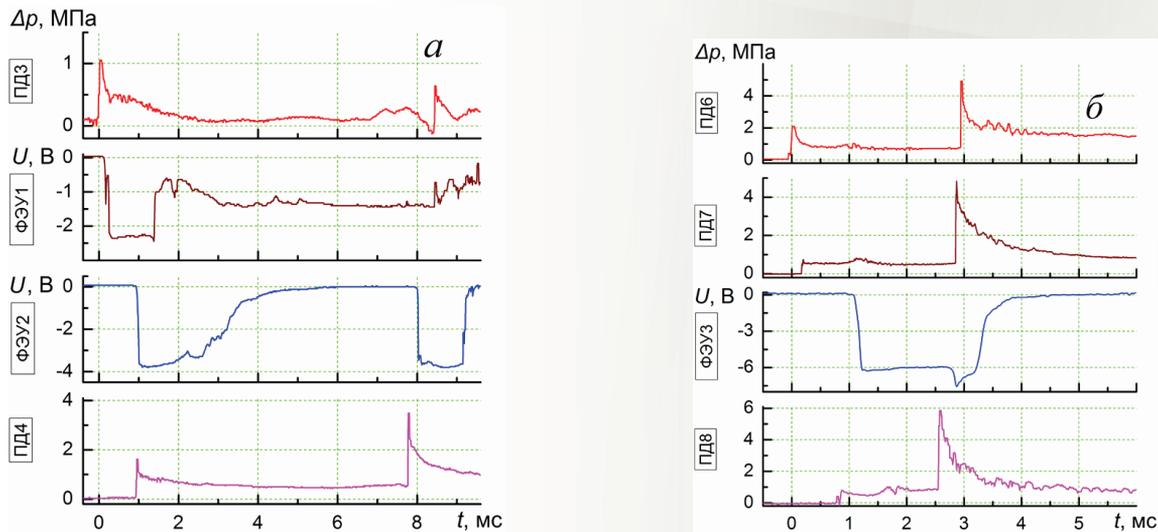


Рис. 4. Осциллограммы давления и свечения, гибридная смесь ($\text{CH}_4 + 10,52\text{Air}$) / уголь, $p_0 = 0,1$ МПа, $\rho \approx 530$ г/м³, $p_{oi} = 0,2$ МПа

Во всех опытах с взвесями угля скорость отражённой детонационной волны на 400–600 м/с больше, чем в аналогичной газовой смеси при тех же начальных условиях. В гибридных смесях значительная часть угля оседает на нижний фланец и наблюдается частичное сгорание угля. Доля сгоревшего угля обычно не превышает 20–30 % и зависит от величины его среднеобъёмной плотности.

3.1. Детонация в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$. Инициирование газовой смесью $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$ с помощью СИ. В газовой смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$ горючее и окислитель находятся в стехиометрическом соотношении, расчётные параметры детонации Чепмена-Жуге: $D_0 = 1867$ м/с, $a \approx 83$ мм [25]. Опытным путём установлено оптимальное для инициирования этой смеси начальное давление в СИ $p_{oi} = 0,25$ МПа, при котором ДВ распространяется по всей трубе практически стационарно: $D_{12} \approx 1765\text{--}1935$, $D_{24} \approx 1848\text{--}1857$, $D_{45} \approx 1714\text{--}1875$, $D_{67} \approx 1818\text{--}1852$, $D_{78} \approx 1831\text{--}1855$ м/с. Профили давления в ДВ имеют характерный хиппик (рис. 5а) (скачок на ударном фронте и последующий спад давления примерно в 2 раза в конце зоны реакции). Экспериментально измеренная по профилям давления длина зоны реакции 37–56 мм. Частота пульсаций свечения и

давления в ДВ $f \approx 7,81\text{--}8,13$ кГц. Отражённая волна — это УВ с прямоугольным профилем давления, $D_{87} \approx 871\text{--}878$, $D_{76} \approx 909\text{--}917$ м/с (рис. 5а).

3.2. Низкоскоростная и затухающая детонация в гибридной смеси ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$) / уголь. Из всех описанных выше опытов с гибридными смесями следует, что метан химически более активен, чем угольная взесь. Поэтому логично ожидать, что в смеси ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$) / уголь с увеличением концентрации угольная взесь будет реагировать гораздо слабее метана и проявит себя в большей степени как инертная завеса. Для проходящей ДВ это предположение нашло подтверждение, но для отражённой волны всё не так однозначно.

При тех же параметрах иницирующего источника, что в разделе 3.1 ($p_{oi} = 0,25$ МПа, $w_i \approx 19,2$ МДж/м²) и $\rho \approx 179 \div 515$ г/м³ в конце трубы зона реакции отстаёт от переднего фронта ДВ на 150–500 мкс (20–55 см), профиль давления вблизи фронта неустойчивый, в области пламени давление плавно возрастает (рис. 5б, в). Наблюдается закономерность: если скорость ДВ к концу трубы спадает до 1300–1500 м/с, то отражённая волна также является волной низкоскоростной детона-

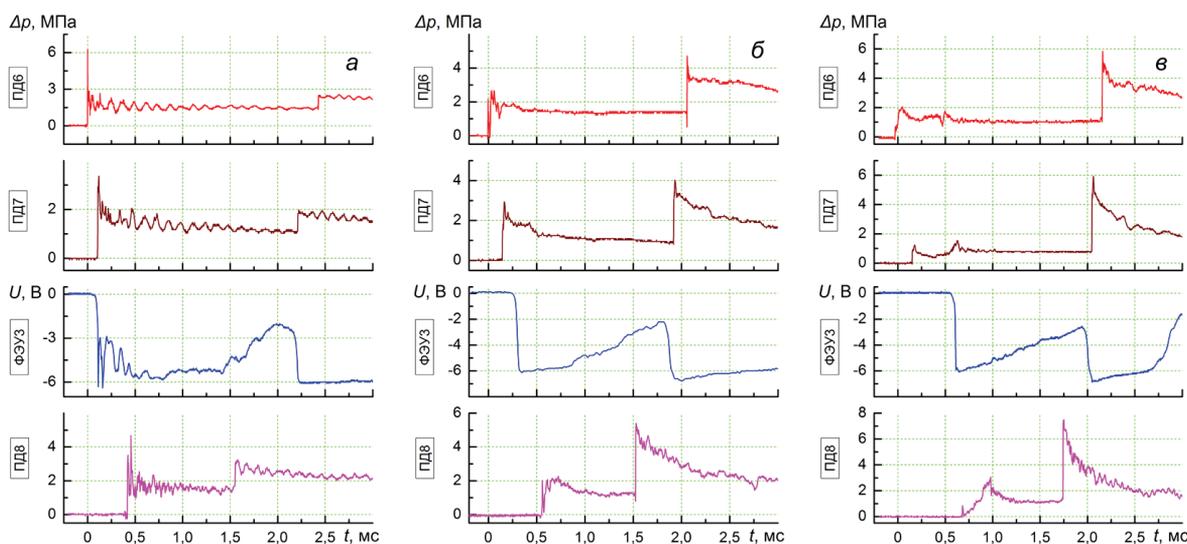


Рис. 5. Осциллограммы давления и свечения в падающих детонационных и отражённых волнах. Газовая смесь $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$ (а), гибридная смесь $(\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2) / \text{уголь}$ (б, в), $p_0 = 0,1$ МПа; $\rho \approx 248$ (б), 515 (в) г/м³, $p_{oi} = 0,25$ МПа, $w_i \approx 19,2$ МДж/м²

ции и распространяется примерно с такой же скоростью $D_{87} \approx 1495\text{--}1370$ м/с, $D_{76} \approx 1470\text{--}1430$ м/с (рис. 5б, рис. 6). Но если волна затухает сильнее до $D_{78} \approx 1100$ м/с (рис. 6, 3), то после её отражения возбуждается сильная ДВ ($D_{87} \approx 1898$, $D_{76} \approx 1818$ м/с) с профилем давления в виде «химпика» (рис. 5в). При этом зона реакции в отражённой волне начинается практически от фронта детонации.

Скорость детонации в гибридной смеси на начальном участке ($x \leq 0,85$ м) на 270–430 м/с меньше, чем в газовой смеси. При $x \approx 2,3$ м скорость волны ещё уменьшается до значений $D \approx 1150\text{--}1300$ м/с. Скорости волны по длине трубы $D_{12} \approx 1500 \div 1510$, $D_{24} \approx 1345 \div 1219$, $D_{34} \approx 1294 \div 1150$, $D_{45} \approx 1333 \div 1142$, $D_{67} \approx 1266 \div 1111$, $D_{78} \approx 1369 \div 1095$ м/с (рис. 6).

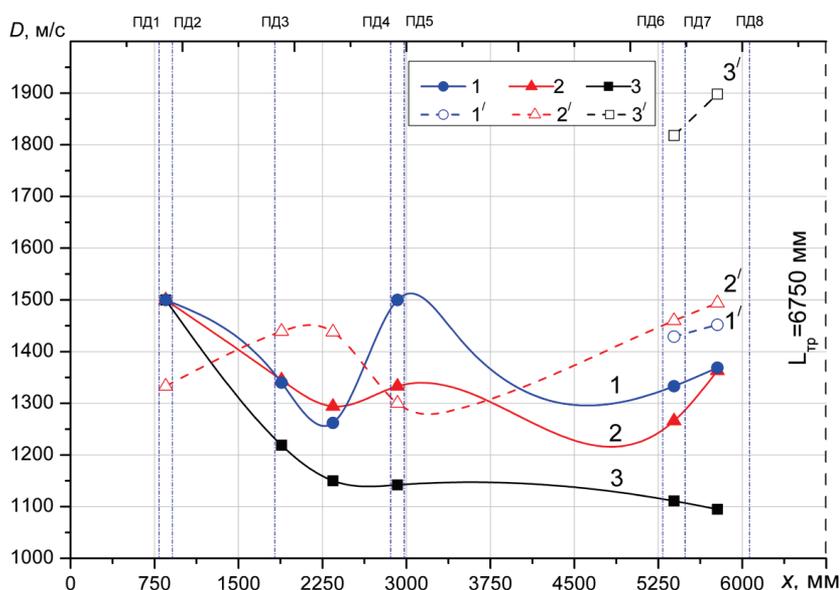


Рис. 6. Экспериментальные скорости падающих (1–3) и отражённых (1'–3') детонационных волн по длине трубы. Гибридная смесь $(\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2) / \text{уголь}$, $p_0 = 0,1$ МПа, $p_{oi} = 0,25$ МПа, $w_i \approx 19,2$ МДж/м²; $\rho \approx 248$ (1, 1'), 179 (2, 2'), 515 (3, 3') г/м³

Таким образом, угольная пыль ослабляет детонационную волну в газовой стехиометрической смеси и, по-видимому, при плотностях взвеси $\rho > 500 \text{ г/м}^3$ взвесь ослабит волну настолько, что произойдёт полное гашение ДВ. При отражении волны возбуждается либо низкоскоростная, либо высокоскоростная детонация в зависимости от степени затухания падающей волны.

Выводы

1. Экспериментально определены параметры и структура волн детонации и горения в бедных по горючему смесях метана с кислородом и воздухом, а также в гибридных системах газовая смесь — взвесь мелкодисперсного каменного угля.

2. За фронтом волн горения, взрывных и детонационных волн происходит воспламенение и горение частиц угля. Увеличение длины зоны реакции в газовых смесях способ-

ствует увеличению степени сгорания частиц угля и усилению волн сжатия.

3. В гибридных исследованных системах горение угля конкурирует с горением метана, но метан химически активней угля. Параметры детонации и тепловыделение в зоне реакции возрастают незначительно по сравнению с газовыми смесями, температура в зоне реакции увеличивается не более чем на 15 %. На параметры волн горения и детонации определяющее влияние оказывает метан, а не углерод угля.

4. Угольная пыль ослабляет детонационную волну в газовой стехиометрической смеси, при отражении волны возбуждается либо низкоскоростная, либо высокоскоростная детонация в зависимости от степени ослабления волны.

5. Доля сгоревшего угля в волнах горения, взрывных и детонационных волнах не превышает 20–30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cybulski W. Coal dust explosions and their suppression. Warsaw, 1976. 583 p.
2. Лебецки К.А., Романченко С.Б. Пылевая взрывоопасность горного производства. М.: Изд-во «Горное дело», Серия Библиотека горного инженера, 2012. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 10. 464 с.
3. Айруни А.Т., Клебанов Ф.С., Смирнов О.В. Взрывоопасность угольных шахт. М.: Изд-во «Горное дело», Серия «Библиотека горного инженера», 2011. Т. 9 «Рудничная аэрология». Кн. 2. 264 с.
4. Палеев Д.Ю., Васенин И.М., Костеренко В.Н. и др. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. М.: Изд-во «Горное дело», Серия Библиотека горного инженера, 2011. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 3. 312 с.
5. Шолль Э.В., Виманн В. Подавление взрывов в подземных выработках автоматическими заслонами системы BVS // Глюкауф-форшунгсхэфте. 1979. № 1. С. 38–46.
6. Джигрин А.В. Анализ действующих в угольных шахтах систем локализации взрывов и оценка эффективности их применения // Отчёт о НИР, ЗАО «МВК по ВД при АГН». М., 2014. 91 с.
7. Протокол испытания автоматических систем взрывоподавления-локализации взрывов АСВП-ЛВ.1М разработки ЗАО «МВК по ВД при АГН» по заказу испытания компании «Шандунская компания Ли Е по шахтным автоматическим системам и оборудованию». 2011. 9 с.
8. Guideline for the compilation of a mandatory code of practice for the prevention of coal dust explosions in underground coal mines. 2002. Department of Mineral Resources of South Africa.
9. Джигрин А.В., Горлов Ю.В., Чигрин В.Д. Автоматическая система взрывоподавления — локализации взрывов метановоздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. 2003. № 8. С. 22–26.
10. Горлов Ю.В., Постников В.И. Повышение эффективности локализации взрывов метановоздушной смеси и угольной пыли // Материалы Межд. конф. «Проблемы ускорения научно-технического прогресса в отраслях горного производства». Люберцы, 2002. С. 330–336.

11. Pinaev A.V., Vasil'ev A.A., Pinaev P.A. Suppression of gas detonation by a dust cloud at reduced mixture pressures // *Shock Waves*. 2015. V. 25. No. 3. P. 267–275.
12. Пинаев А.В., Васильев А.А., Пинаев П.А. О критических параметрах пылевой завесы, обеспечивающих полное гашение волны газовой детонации // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2016. № 2. С. 113–120.
13. Wolinski M., Wolanski P. Gaseous detonation processes in presence of inert particles // *Arch. Combust.* 1987. V. 7. N3/4. P. 353–370.
14. Bouchet R., Laffite P. L'extinction des ondes par les substances pulverisees // *C.R.A.S.* 1958. V. 246. P. 1858–1861.
15. Laffite P., Bouchet R. Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders // 7-th Symposium (Intern.) on Combustion, Butterworth, London, 1958. P. 504–508.
16. Kauffmann C.W., Wolanski P., Arisoy A. et al. Dust, hybrid and dusty detonation // *AIAA Progress in Astronautics, and Aeronautics*. 1984. V. 94. P. 221–239.
17. Wolanski P., Liu J.C., Kauffmann C.W. et al. The effects of inert particles on methane-air detonations // *Archivum Combustionis*. 1988. V. 8. № 1. P. 15–32.
18. Chen Z., Fan B., Jiang X. Suppression effects of powder suppressant on the explosions of oxyhydrogen gas // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2006. V. 19. P. 648–655.
19. Dong J., Fan B., Xie B., Ye J. Experimental investigation and numerical validation of explosion suppression by inert particles in large-scale duct // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005. V. 30. P. 2361–2368.
20. Фёдоров А.В., Фомин П.А., Фомин В.М., Тропин Д.А., Чен Дж.-Р. Физико-математическое моделирование подавления детонации облаками мелких частиц // Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2011. 156 с.
21. Васильев А.А., Пинаев А.В., Фомин П.А., Троцюк А.В., Васильев В.А., Трубицын А.А., Трубицына Д.А. Оценки условий возбуждения и гашения взрывных волн при шахтных взрывах // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2016. № 2. С. 91–105.
22. ГОСТ 12.1.044-489 (ИСО 4589-84) ССБТ. Пожароопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. Доступ из справ.-правовой системы «Тех-эксперт».
23. Сазонов М.С., Голоскоков С.И. Исследование взрывчатости угольной пыли различного дисперсного состава // *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2019. № 1. С. 5–13.
24. Васильев А.А., Пинаев А.В., Трубицын А.А., Грачёв А.Ю., Троцюк А.В., Фомин П.А., Трилис А.В. Что горит в шахте: метан или угольная пыль? // *Физика горения и взрыва*. 2017. Т. 53. № 1. С. 11–18.
25. Васильев А.А., Васильев В.А. Расчётные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2016. № 2. С. 8–39.
26. Войцеховский Б.В., Митрофанов В.В., Топчиян М.Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1963. 168 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.12.4.001

UDC 534.222.2 + 536.46 + 622

© A.V. Pinaev, P.A. Pinaev, 2019

A.V. PINAEV

Doctor Phys.-Math. Sciences, Associate Professor
Chief Researcher,
M.A. Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS
e-mail: avpin@ngs.ru

P.A. PINAEV

Junior Researcher
Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk
e-mail: pavel_academ@mail.ru

RESEARCH OF COMPARATIVE CHEMICAL ACTIVITY OF METHANE AND COAL PARTICLE SUSPENSIONS DURING COMBUSTION, EXPLOSIONS AND DETONATION

Experimental research of deflagration, blasting and detonation waves in gas mixtures of CH₄/Air, CH₄/O₂, with slurries of coal particles of 0÷200 μm are presented. The researches were carried out in Institute of Hydrodynamics SB RAS. Initiation was carried out by a spark with energy of 1 J, or a detonation wave with specific energy of initiation 3,8÷27,6 of MDzh/sq.m. Structure and parameters of waves in methane-poor gas mixtures and in the same gas mixtures are compared with coal powder suspension with average density from 20 to 700 g/m³. Structural analysis of initial coal powder and coal powder after exposure to high-temperature waves was performed.

Keywords: METHANE, COAL DUST, MINE EXPLOSIONS, EXPLOSION SAFETY, COMBUSTION, BLAST WAVE, DETONATION, COAL X-RAYS.

REFERENCES

1. Cybulski W. Coal dust explosions and their suppression. Warsaw, 1976. 583 p.
2. Lebecki K.A., Romanchenko S.B. Dust Explosion of Mining Production. M.: Mining, Series Library of Mining Engineer, 2012. Vol. 6 «Industrial Safety». Book 10. 464 p. (In Russ.).
3. Ayruni A.T., Klebanov F.C., Smirnov O.V. Explosion of coal mines. M.: Mining, Series Library of Mining Engineer, 2011. Vol. 9 «Miner aerology». Book 2. 264 p. (In Russ.).
4. Paleev D.Yu., Vasenin I.M., Kosterenko V.N. etc. Shock waves during explosions in coal mines. M.: Mining, Series Library of Mining Engineer, 2011. Vol. 6 «Industrial Safety». Book 3. 312 p. (In Russ.).
5. Scholl E.V., Vimann V. Suppression of explosions in underground workings by automatic flaps of the BVS // Glucauf-forschungshefte system. 1979. No. 1. P. 38–46. (In Russ.).
6. Jigrin A.V. Analysis of explosion localization systems operating in coal mines and evaluation of their efficiency // Report on SRW, CJSC «MIC on HP at AGN». M., 2014. 91 p. (In Russ.).
7. Test Report of Automatic Explosion Suppression-Containment Systems ASVP-LV.1M Development of CJSC «MIC on HP at HP» on the order of Shandun Company Lee E on Mine Automatic Systems and Equipment Test, 2011. 9 p. (In Russ.).
8. Guideline for the compilation of a mandatory code of practice for the prevention of coal dust explosions in underground coal mines. 2002. Department of Mineral Resources of South Africa.
9. Jigrin A.V., Gorlov Yu.V., Chigrin V.D. Automatic explosion suppression system — localization of methane-air mixture explosions and coal dust in underground mining mines of coal mines // Industrial Safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2003. № 8. P. 22–26. (In Russ.).
10. Gorlov Yu.V., Postnikov V.I. Increasing the efficiency of localization of methane-air mixture explosions and coal dust // Problems of accelerating scientific-technological progress in mining industries. 2002. P. 330–336. (In Russ.).
11. Pinaev A.V., Vasilev A.A., Pinaev P.A. Suppression of gas detonation by a dust cloud at reduced mixture pressures // Shock Waves. 2015. V. 25. No. 3. P. 267–275.

12. Pinayev A.V., Vasilyev A.A., Pinayev P.A. On Critical Parameters of Dust Curtain Ensuring Complete Suppression of Gas Detonation Wave // Bulletin of the Scientific Center for Coal Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2016. No 2. P. 113–120. (In Russ.).

13. Wolinski M., Wolanski P. Gaseous detonation processes in presence of inert particles // Arch. Combust. 1987. V. 7. No. 3/4. P. 353–370.

14. Bouchet R., Laffite P. L'extinction des ondes par les substances pulverisees // C.R.A.S. 1958. V. 246. P. 1858–1861.

15. Laffite P., Bouchet R. Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders // 7-th Symposium (Intern.) on Combustion, Butterworth, London, 1958. P. 504–508.

16. Kauffmann C.W., Wolanski P., Arisoy A. et al. Dust, hybrid and dusty detonation // AIAA Progress in Astronautics, and Aeronautics. 1984. V. 94. P. 221–239.

17. Wolanski P., Liu J.C., Kauffmann C.W. et al. The effects of inert particles on methane-air detonations // Archivum Combustionis. 1988. V. 8. No. 1. P. 15–32.

18. Chen Z., Fan B., Jiang X. Suppression effects of powder suppressant on the explosions of oxyhydrogen gas // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2006. V. 19. P. 648–655.

19. Dong J., Fan B., Xie B., Ye J. Experimental investigation and numerical validation of explosion suppression by inert particles in large-scale duct // Proceedings of the Combustion Institute. 2005. V. 30. P. 2361–2368.

20. Fedorov A.V., Fomin P.A., Fomin V.M., Tropin D.A., Chen J.-R. Physical and mathematical modeling of detonation suppression by clouds of small particles // Novosibirsk: NGASU (Sibstrin). 2011. 156 p. (In Russ.).

21. Vasiliev A.A., Pinaev A.V., Fomin P.A., Trotsyuk A.V., Vasiliev V.A., Trubitsyn A.A., Trubitsina D.A. Assessment of the conditions for the excitation and suppression of blast waves during mine explosions // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2016. No. 2. P. 91–105. (In Russ.).

22. GOST 12.1.044-489 (ISO 4589-84) SSBT. Fire hazard of substances and materials. The nomenclature of indicators and methods for their determination. Access from the Tekhekspert reference system. (In Russ.).

23. Sazonov M.S., Goloskokov S.I. The study of coal dust explosives of various disperse composition // Bulletin of the Scientific Center of VostNII industrial and environmental safety [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2019. No. 1. P. 5–13. (In Russ.).

24. Vasiliev A.A., Pinaev A.V., Trubitsyn A.A., Grachev A.Yu., Trotsyuk A.V., Fomin P.A., Trilis A.V. What burns in the mine: methane or coal dust? // FGV. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 11–18. (In Russ.).

25. Vasiliev A.A., Vasiliev V.A. The calculated and experimental parameters of combustion and detonation of mixtures based on methane and coal dust // Bulletin of the Scientific Center for Work Safety in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2016. No. 2. P. 8–39. (In Russ.).

26. Wojciechowski B.V., Mitrofanov V.V., Topchiyan M.E. The structure of the detonation front in gases. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS, 1963. 168 p. (In Russ.).