

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.23.30.003

УДК 534.222.2+536.46+622.814

© А.В. Пинаев, П.А. Пинаев, 2022

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



ВЗРЫВ, ДЕТОНАЦИЯ В СМЕСЯХ МЕТАН–ВОДОРОД–ВОЗДУХ, МЕТАН–ВОДОРОД–ВОЗДУХ–ВЗВЕСЬ УГЛЯ

Экспериментально исследованы взрывные и детонационные волны в газовых двухтопливных смесях $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}$ и гетерогенных трёхтопливных смесях $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}/\text{Уголь}$. Опыты моделируют начальный этап взрыва в угольных шахтах, эксперименты выполнены в ударной трубе. Получены данные о динамике и структуре падающих взрывных и детонационных волн, отражённых детонационных и ударных волн. Проведён анализ влияния метана, водорода и угольной взвеси на параметры волн. Экспериментальные данные сопоставлены с расчётными равновесными термодинамическими параметрами детонации.

Ключевые слова: МЕТАН, ВОДОРОД, УГОЛЬНАЯ ВЗВЕСЬ, ВОЗДУХ, УДАРНАЯ ВОЛНА, ВЗРЫВНАЯ ВОЛНА, ДЕТОНАЦИЯ, ЭНЕРГИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ, ГОРЕНИЕ, МНОГОТОПЛИВНЫЕ СМЕСИ.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее часто взрывам в шахте предшествует выброс из породы угольного газа (метана и частично водорода с другими газами). При перемешивании угольного газа с воздухом достаточно слабой искры для воспламенения смеси и последующего образования волны горения, взрывной волны (ударной волны (УВ) с движущимися за фронтом продуктами сгорания) или детонации. Поток газа за волной, срывая со стенок частицы угля, со-

здаёт облако пыли. Угольная взвесь взрывоопасна при концентрации $\rho \geq \rho^* \approx 30\text{--}80 \text{ г/м}^3$ [1–3]. Взрывы метана, метана с угольной пылью и угольной пыли считаются основными видами взрывов в шахтах [1–4]. Чтобы исключить развитие катастрофы, взрывную или детонационную волну (ДВ) лучше гасить на стадии зарождения и распространения. Поэтому в работе исследованы взрывные и детонационные волны, начиная с момента их формирования. Смеси $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}$ и $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}/\text{Уголь}$

инициировали небольшим объёмом химически активной смеси, которую поджигали маломощной искрой.

Возбуждение и затухание сильных взрывных и детонационных волн в метано-воздушных и запылённых средах исследовали в [5–18]. В [13–15] удалось полностью погасить детонацию в метановых смесях с длиной зоны реакции (размером ячейки a) около 0,1 м с помощью инертной завесы кварцевого песка длиной в несколько метров (размер частиц завесы $\delta \sim 100$ мкм, среднеобъёмная плотность $\rho_s \geq 2-3$ кг/м³). Установлено [13–15], что если уменьшать δ и увеличивать a , то гасящие свойства завесы улучшаются, и нижний порог ρ_s снижается.

В [16] проанализирована возможность искрового зажигания компонентов угольного газа и угольной пыли в воздухе, а также оценена энергия инициирования сферической детонации. В [17, 18] при сопоставлении между собой параметров волн горения и детонации в бедных по метану смесях CH_4/Air и в тех же смесях метана с угольной пылью экспериментально доказано, что метан химически активнее угольной пыли.

Двухтопливные гетерогенные смеси $\text{CH}_4/\text{Air}/\text{Уголь}$ изучены меньше, чем смеси CH_4/Air , практически не исследованы трёхтопливные гетерогенные смеси $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}/\text{Уголь}$. В работе установлена возможность возбуждения детонации в смесях $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}$, $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}/\text{Уголь}$ в непосредственной близости от источника инициирования, изучена структура и параметры ДВ, определён сравнительный вклад в энерговыделение горючих газов и угольных частиц. Проанализировано влияние водорода на инициирование исследуемых смесей.

Для разработки мер безопасности при угледобыче большое значение имеет изучение не только падающих, но и отражённых волн (ОВ). По этой причине исследованию ОВ в работе уделено большое внимание.

ПОСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Готовые смеси $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}$ подавали в ударную трубу из баллона через редуктор, и затем контейнер с частицами кузбасского

угля размером 0–200 мкм и распылитель, установленный сверху трубы. Трубу (длина $L = 6,75$ м, диаметр $d = 70$ мм, $L/d \approx 96$) вакуумировали и заполняли газозвесью до $p_0 = 0,1$ МПа.

Массовый состав угля по фракциям 0–40; 40–64; 64–94; 94–140; 140–200 мкм равен соответственно 26,6; 9,3; 13,8; 16,6; 33,7 %. Среднеобъёмная концентрация частиц пыли в трубе $\rho \approx 95-560$ г/м³, элементный и химический состав угля приведён в [17, 18].

Газозвеси инициировали детонационными волнами с помощью двух коротких наклонных секций инициирования (СИ), расположенных вверху трубы. СИ заполняли смесью $\text{C}_2\text{H}_2+2,5\text{O}_2$ при начальном давлении $p_{0i} = 0,2-0,3$ МПа и инициировали искрой с энергией, меньшей 1 Дж. Удельная энергия инициирования газозвесей $w_i = 4q_i/\pi d^2 \approx 15,5-23,1$ МДж/м² (где q_i — энергия, выделяющаяся в СИ), температура продуктов детонации в СИ ~ 4000 К. Профили свечения с фотоумножителей ФЭУ1–ФЭУ3 и давления с пьезодатчиков Д1–Д8 [19] при взрыве и детонации регистрировали осциллографами. Ошибки измерения давления не превышали 5 %, скорости волн — 2 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В опытах исследовали метано-водородные смеси с избытком воздуха $\text{CH}_4+n\text{H}_2+k\text{Air}$ и те же газовые смеси с взвесью угля ($n = 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; k = 10,52; 12; \text{Air} = 0,21\text{O}_2+0,79\text{N}_2$). В исследуемом угле содержится 78,4 % углерода [17,18]. В наших опытах все газозвеси переобогащены углем по сравнению со стехиометрией на 1–2 порядка. Параметры детонации Чепмена – Жуге в газовых смесях и газозвесях для всех n и k рассчитаны в [20] по равновесной термодинамической модели при нормальных условиях.

Здесь $a_{\text{H}_2} = n/(n+1)$ — мольная доля H_2 в смеси горючих газов CH_4 и H_2 ; $h = (k-k_{\text{st}})/k_{\text{st}}$ — коэффициент избытка воздуха в газовой смеси; $m_{\text{coal}}^{\text{st}}$, ρ_{st} — стехиометрические масса и концентрация взвеси угля в ударной трубе.

1. Смеси $\text{CH}_4+0,1\text{H}_2+10,52\text{Air}$; $(\text{CH}_4+0,1\text{H}_2+10,52\text{Air})/\text{Уголь}$. Для $n = 0,1$ и

$k = 10,52$ величины $a_{H_2} \approx 9,1 \%$, $k_{st} \approx 9,76 \%$, $h \approx 7,8 \%$, $m_{coal}^{st} \approx 0,23 \text{ г}$, $\rho_{st} \approx 8,8 \text{ г/м}^3$.

Если инициирование газовзвесей сравнительно слабое — в СИ $p_{oi} \leq 0,25 \text{ МПа}$ ($w_i \leq 19,3 \text{ МДж/м}^2$), то в смеси $CH_4+0,1H_2+10,52Air$ всегда регистрируется затухающая взрывная волна. Характерные осциллограммы давления и свечения приведены на рис. 1, где $\Delta p = p - p_0$. Здесь D_1 затухает от 1500 м/с до 1160 м/с , и зона свечения

постепенно удаляется от ударного фронта. Фронт свечения, регистрируемый ФЭУЗ в нижней части трубы, отстаёт от ударного фронта Д7 по времени на $\Delta t_{f7} \approx 440 \text{ мкс}$ (рис. 1), по расстоянию на $\Delta l_{f7} \approx 0,51 \text{ м}$. Началу свечения соответствует подъём давления за фронтом УВ (рис. 1, см. сигналы Д7 и ФЭУЗ). Отражённая волна — волна низкоскоростной детонации, её скорость $D_2 \approx 1475 \pm 60 \text{ м/с}$.

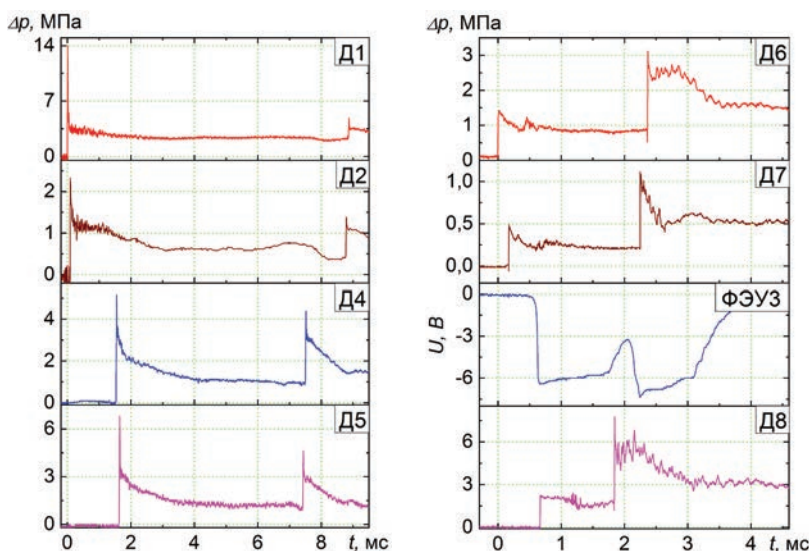


Рис. 1. Профили давления и свечения в смеси $CH_4+0,1H_2+10,52Air$, $p_{oi} = 0,25 \text{ МПа}$ ($w_i \approx 19,3 \text{ МДж/м}^2$); падающая волна — затухающая взрывная волна, ОВ — низкоскоростная ДВ, ФЭУЗ расположен напротив Д7 ($x = 5,49 \text{ м}$)

При бóльшей энергии инициирования ($p_{oi} = 0,3 \text{ МПа}$, $w_i \approx 23,1 \text{ МДж/м}^2$) в газовой смеси $n = 0,1$; $k = 10,52$ возбуждается детонация ($D_1 \approx 1715\text{--}1820 \text{ м/с}$). Во второй половине трубы падающая ДВ распространяется в спиновом режиме с частотой $f_{18} \approx 7,843 \text{ кГц}$. Отражённая волна — это ударная волна ($D_{28} \approx 870 \text{ м/с}$). В ОВ $f_{28} \approx 9,091 \text{ кГц}$ (на 13 % больше, чем в падающей ДВ). По акустической теории скорость звука $c = pdf/1,84$ [21]. Отсюда $c_{18} \approx 937 \text{ м/с}$, $c_{28} \approx 1087 \text{ м/с}$ (скорость звука и температура в ОВ выше, чем в падающей ДВ).

Такие же (как и в газовой смеси) режимы с падающей затухающей взрывной волной и самоподдерживающейся ДВ реализуются в смесях $(CH_4+0,1H_2+10,52Air)/\text{Уголь}$ при $p_{oi} = 0,25 \text{ МПа}$ и $0,3 \text{ МПа}$ соответственно. В газовзвесах при $p_{oi} = 0,25 \text{ МПа}$ взрывная вол-

на затухает медленнее, чем в газовой смеси. В затухающих взрывных волнах сгорание смесей неполное, поэтому отражённые волны в некоторых опытах могут быть детонационными ($D_2 \approx 1800\text{--}1400 \text{ м/с}$). Наблюдается такая закономерность: чем меньше $D_1(x)$, тем больше смеси недогорают, и, как следствие, — $D_2(x)$ отражённой волны выше. По этой причине в газовой смеси $D_2(x)$ больше, чем в угольной газовзвеси.

Типичные профили давления и свечения для ДВ в газугольной взвеси приведены на рис. 2 при $p_{oi} = 0,3 \text{ МПа}$. Здесь детонация распространяется в спиновом режиме ($f_{18} \approx 7,87 \text{ кГц}$, в ОВ $f_{28} \approx 8,91 \text{ кГц}$, $c_{18} \approx 941 \text{ м/с}$, $c_{28} \approx 1065 \text{ м/с}$). Скорость ДВ в конце трубы $D_{78} \approx 1786 \text{ м/с}$, для ОВ $D_{87} \approx 846 \text{ м/с}$. Свечение в ДВ по сравнению с детонацией в газовой

смеси практически не возрастает. В зоне реакции сгорает масса угля $m_{\text{coal}} \leq m_{\text{coal}}^{\text{st}}$ (где $m_{\text{coal}}^{\text{st}} \approx 0,23$ г). Поскольку величина $m_{\text{coal}}^{\text{st}}$ мала, то горение частиц угля вносит слабый

вклад в энерговыделение и не приводит к росту скорости ДВ, интенсивности свечения и температуры в зоне реакции по сравнению с газовыми смесями.

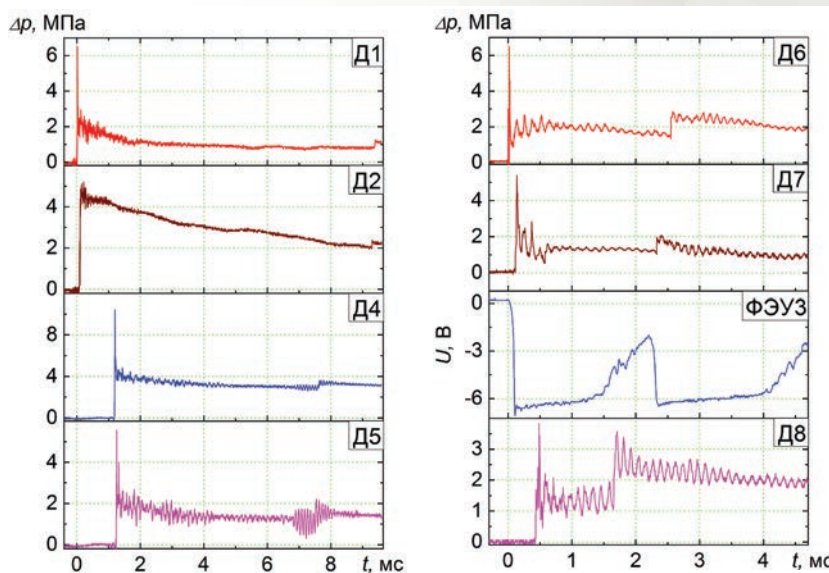


Рис. 2. Профили давления и сечения в смеси $(\text{CH}_4+0,1\text{H}_2+10,52\text{Air})/\text{Уголь}$, $\rho = 389$ г/м³, $p_{0i} = 0,3$ МПа ($w_i \approx 23,1$ МДж/м²); падающая волна — это ДВ, отражённая волна — УВ

В падающей детонационной волне в газовой смеси величина $D_1(x)$ на 10–100 м/с выше, чем в газозвесах (рис. 3). Это означает, что метан химически активнее угольной взвеси, газовый поток в газозвеси теряет энергию на разгон и нагрев частиц. В газозвесах

в верхней части трубы скорость $D_2(x)$ отражённой УВ примерно на 100 м/с меньше, чем в газовой смеси (см. рис. 3). Скорости $D_2(x)$ растут в обратном направлении из-за уменьшения скорости встречного потока газа.

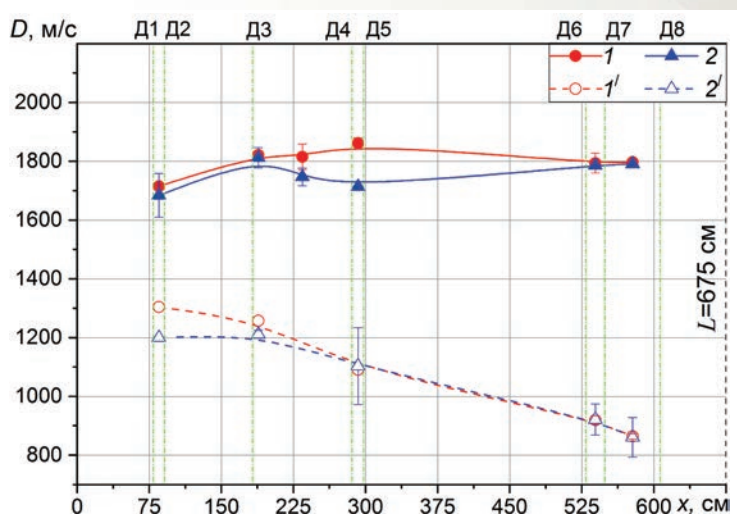


Рис. 3. Усреднённые скорости падающих детонационных (1, 2) и отражённых (1', 2') волн по длине трубы в смесях $\text{CH}_4+0,1\text{H}_2+10,52\text{Air}$ (1, 1') и $(\text{CH}_4+0,1\text{H}_2+10,52\text{Air})/\text{Уголь}$ (2, 2'), $\rho = 103\text{--}389$ г/м³; $p_{0i} = 0,3$ МПа ($w_i \approx 23,1$ МДж/м²)

Влияние ρ и w_i на два разных режима распространения падающих волн показано на рис. 4 и рис. 5. При меньшей $w_i \approx 19,3$ МДж/м² и $\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_{st}} \leq 12$ в первой половине трубы волна распространяется в детонационном режиме, а затем её скорость убывает до $D_1 \approx 1300$ м/с

(рис. 4). При более высоких значениях $\bar{\rho} \geq 17-22$ в трубе распространяется затухающая взрывная волна. Скорости отражённых волн выше для более медленных падающих волн сжатия. В этих случаях сгорание смесей неполное, и ОВ могут быть детонационными (см. рис. 4).

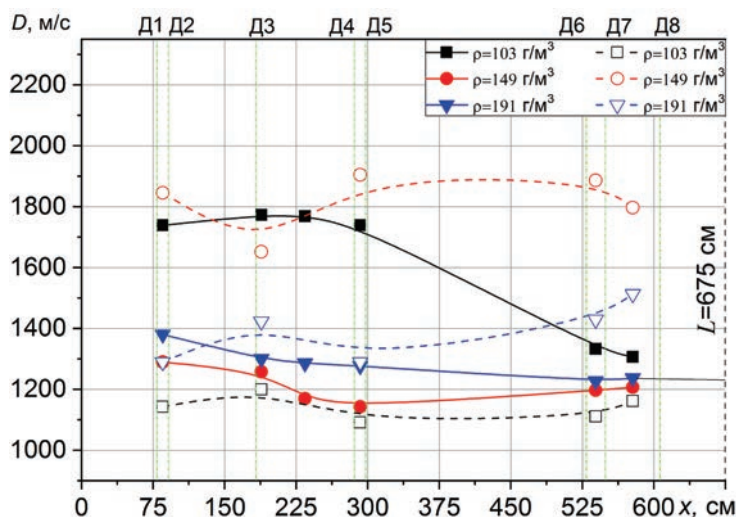


Рис. 4. Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях (CH₄+0,1H₂+10,52Air)/Уголь, $p_{oi} = 0,25$ МПа ($w_i \approx 19,3$ МДж/м²), $\rho = 103-191$ г/м³

При бóльшей $w_i \approx 23,1$ МДж/м² для всех исследованных ρ падающие волны распространяются в детонационном режиме (рис. 5). На начальном участке трубы $D_1 \approx 1600-1750$ м/с, скорости установившейся ДВ $D_1 \approx 1800$ м/с. Отражённые волны являются

ударными волнами, их скорости $D_2(x) \leq 1200$ м/с (см. рис. 5). Аналогично предыдущим опытам $D_2(x)$ возрастает в обратном направлении из-за уменьшения скорости встречного потока газа.

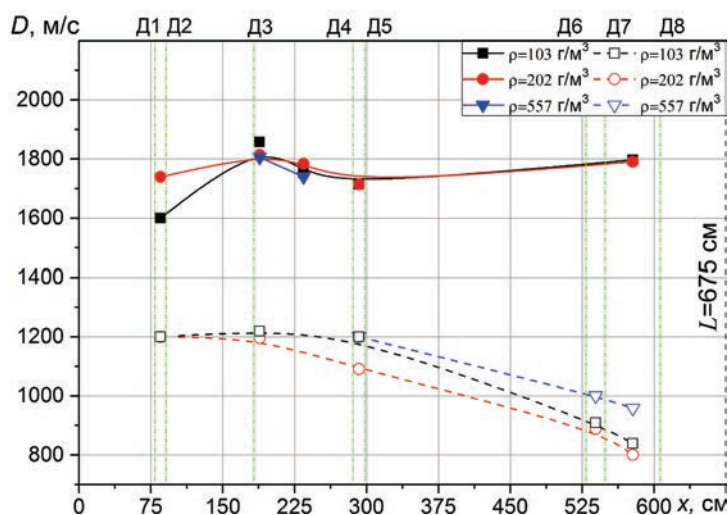


Рис. 5. Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях (CH₄+0,1H₂+10,52Air)/Уголь, $p_{oi} = 0,3$ МПа, $\rho = 103-557$ г/м³

В табл. 1 приведены некоторые параметры детонационной ячейки и критическая энергия смесей и детонационных волн. Здесь D_0 , a и E_3 — расчётные скорость детонации, размер детонационной ячейки и критическая энергия инициирования сферической детонации [20]; D_1 — экспериментальная скорость детонации.

Таблица 1

Параметры смесей и детонационных волн

Смесь	a_{H_2} , %	D_0 , м/с	a , мм	E_3 , МДж	D_1 , м/с
CH ₄ +10,52Air	0	1770	260	125	
CH ₄ +0,1H ₂ +10,52Air	9,1	1782	185	68,2	1800±15
CH ₄ +0,1H ₂ +10,52Air+0,159C (st)	9,1	1860	96	9,05	–
CH ₄ +0,1H ₂ +10,52Air+0,203Уголь (st)	9,1	1860	96	9,05	–
(CH ₄ +0,1H ₂ +10,52Air)/Уголь	9,1				1800±15
CH ₄ +0,2H ₂ +10,52Air	16,7	1794	140	27,0	1800±20
CH ₄ +0,2H ₂ +10,52Air+0,109C (st)	16,7	1847	91	7,12	–
CH ₄ +0,2H ₂ +10,52Air+0,139Уголь (st)	16,7	1847	91	7,12	–
(CH ₄ +0,2H ₂ +10,52Air)/Уголь	16,7				1810±15
CH ₄ +0,3H ₂ +10,52Air	23,1	1806	110	12,4	1810±15
CH ₄ +0,3H ₂ +10,52Air+0,06C (st)	23,1	1835	88	6,09	
CH ₄ +0,3H ₂ +10,52Air+0,0077Уголь (st)	23,1	1835	88	6,09	
(CH ₄ +0,3H ₂ +10,52Air)/Уголь	23,1				1805±10
CH ₄ +12Air	0	1715	435	990,0	
CH ₄ +0,5H ₂ +12Air	33,3	1781	101	8,39	1805±10
CH ₄ +0,5H ₂ +12Air+0,27C (st)	33,3	1896	43	0,62	
CH ₄ +0,5H ₂ +12Air+0,344Уголь (st)	33,3	1896	43	0,62	
(CH ₄ +0,3H ₂ +10,52Air)/Уголь	33,3				1810±15

В [20] термодинамические расчёты для газовзвесей проводились в предположении, что углерод (и уголь) находятся не в виде частиц, а подобно газу находятся в молекулярном виде. Поэтому для газовзвесей значения D_0 завышены, а E_3 занижены по сравнению с соответствующими данными для газовых смесей и экспериментальными данными D_1 (табл. 1).

2. Смесей (CH₄+nH₂+kAir)/Уголь. Основное внимание в данном разделе уделено измерению скорости волн по длине трубы в газовзвесах ($n = 0,2; 0,3; 0,5; k = 10,52; 12$) при различных

значениях p . В исследованных смесях профили давлений волн сжатия принципиально не отличаются от описанных выше. Расчётные и экспериментальные параметры смесей и детонационных волн приведены в табл. 1.

2.1. Смесей (CH₄+0,2H₂+10,52Air)/Уголь. Для этой газовзвеси $a_{H_2} \approx 16,7\%$, $k_{st} \approx 10\%$, $h \approx 5,2\%$, $m_{coal}^{st} \approx 0,16$ г, $\rho_{st} \approx 6,0$ г/м³. Режимы распространения волн зависят от энергии инициирования.

При $p_{oi} = 0,25$ МПа и $\bar{p} \approx 34,39$ падающие взрывные волны наиболее быстро уменьшают скорость на длине около 2 м от

$D_1 \approx 1550\text{--}1600$ м/с до $1200\text{--}1150$ м/с. Отражённые волны распространяются в режиме низкоскоростной детонации от значений $D_2 \approx 1600$ м/с до $1400\text{--}1500$ м/с.

При более сильном инициировании ($p_{oi} = 0,3$ МПа) в смесях с $\bar{\rho} \approx 16, 39, 64$ возбуждается детонация с практически постоянной скоростью. Начальные скорости ДВ $D_1 \approx 1850\text{--}1900$ м/с, установившиеся скорости в конце трубы $D_1 \approx 1750\text{--}1850$ м/с. Из-за увеличения доли водорода на начальном участке трубы D_1 выше примерно на 200 м/с

соответствующих значений скорости ДВ при $n = 0,1$. Отражённые волны являются ударными волнами ($D_2 \approx 800\text{--}1300$ м/с).

2.2. Смеси (CH₄+0,3H₂+10,52Air)/Уголь.

Здесь $a_{H_2} \approx 23,1$ %, $k_{st} \approx 10,24$ %, $h \approx 2,8$ %, $m_{coal}^{st} \approx 0,086$ г, $\rho_{st} \approx 3,26$ г/м³. Экспериментальные скорости ДВ близки к расчётным значениям. При $p_{oi} = 0,3$ МПа в конце трубы значения $D_1 \approx 1700\text{--}1800$ м/с (рис. 6). Здесь $44 \leq \bar{\rho} \leq 52$, отражённые волны — это ударные волны ($D_2 \approx 850\text{--}1350$ м/с).

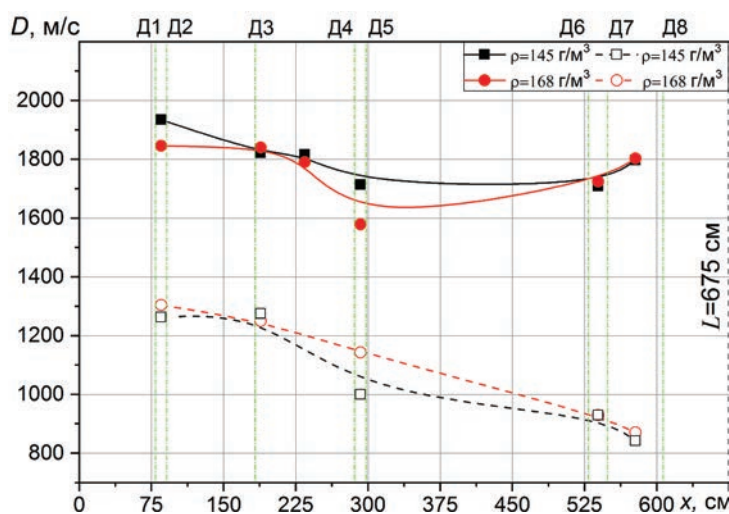


Рис. 6. Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях (CH₄+0,3H₂+10,52Air)/Уголь, $p_{oi} = 0,3$ МПа, $\rho = 145\text{--}168$ г/м³

Для газовых смесей $k = 10,52$, $n = 0,1; 0,2; 0,3$ расчётные значения критической энергии инициирования сферической детонации $E_3 = 68,2; 27,0; 12,4$ МДж соответственно [20]. С ростом n в три раза D_0 увеличивается на 1,3 %, размер ячейки уменьшается на 41 % и существенно — в 5,5 раз уменьшается E_3 . Из приведённых данных (см. табл. 1) видно, что с ростом a_{H_2} наиболее заметно уменьшается E_3 , т. е. облегчается инициирование детонации.

Для стехиометрических смесей с углеродом при $k = 10,52; n = 0,1; 0,2; 0,3$ значения $E_3 = 9,05; 7,12; 6,09$ МДж соответственно.

2.3. Смеси (CH₄+0,5H₂+12Air)/Уголь. В смеси CH₄+12Air $E_3 = 990$ МДж. Для смеси CH₄+0,5H₂+12Air $a_{H_2} \approx 33,3$ %, $k_{st} \approx 10,71$ %, $h \approx 12$ %. Для смеси с H₂, $n = 0,5$ величина E_3 уменьшилась более чем на два порядка по

сравнению с той же смесью без водорода (см. табл. 1).

Для стехиометрической смеси с углем — CH₄+0,5H₂+12Air+0,344Уголь, в объёме трубы $m_{coal}^{st} \approx 0,34$ г, $\rho_{st} \approx 12,86$ г/м³.

Благодаря увеличению доли водорода в газовой смеси (CH₄+0,5H₂+12Air)/Уголь даже при более слабом инициировании ($p_{oi} = 0,25$ МПа) распространяется стационарная ДВ (рис. 7, $\bar{\rho} \approx 11$). Здесь начальная скорость детонации $D_1 \approx 1750$ м/с, в конце трубы $D_1 \approx 1800$ м/с. Отражённая волна является ударной волной, её скорость $D_2 \approx 1200\text{--}1000$ м/с.

Если плотность угольной взвеси выше ($\bar{\rho} \approx 28$), то падающая ДВ вначале замедляется примерно на 500 м/с, но затем через 2 м распространяется в режиме низкоскоростной детонации со скоростью $D_1 \approx 1300$ м/с

(рис. 7). Т. е. угольная взвесь с возрастанием $\bar{\rho}$ начинает вести себя как инертная пылевая завеса. Учитывая результаты [13], можно предположить, что при концентрациях угольной пыли $\rho \geq 2-3 \text{ кг/м}^3$

($\bar{\rho} \geq 155-230$) произойдёт полное гашение ДВ в исследованных газозвесах. Отражённая волна здесь — это волна низкоскоростной детонации ($D_2 \approx 1500-1400 \text{ м/с}$).

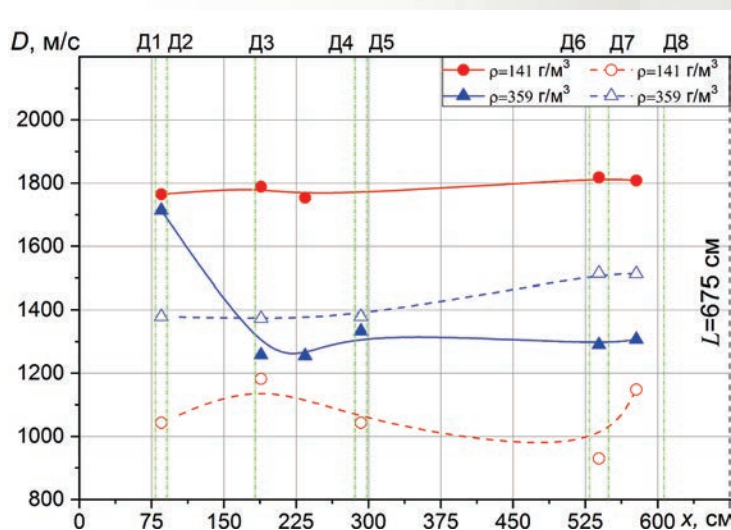


Рис. 7. Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях $(\text{CH}_4+0,5\text{H}_2+12\text{Air})/\text{Уголь}$, $p_{0i} = 0,25 \text{ МПа}$, $\rho = 141, 359 \text{ г/м}^3$

При более сильном инициировании $p_{0i} = 0,3 \text{ МПа}$ в газозвесах возбуждаются практически стационарные детонационные волны $D_1 \approx 1800 \pm 50 \text{ м/с}$ (рис. 8), здесь $12 \leq \bar{\rho} \leq 38$. Отражённые волны в этих

опытах — это ударные волны ($D_2 \approx 850-1250 \text{ м/с}$), скорость УВ возрастает в обратном направлении из-за замедления встречного потока газа.

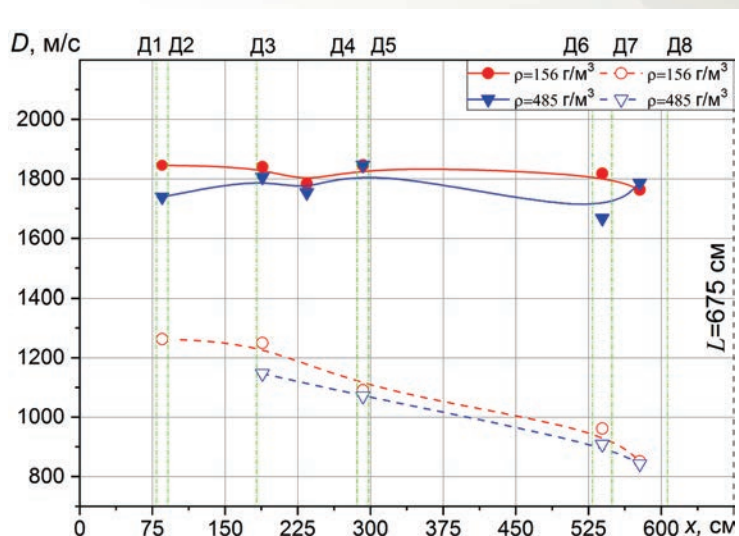


Рис. 8. Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях $(\text{CH}_4+0,5\text{H}_2+12\text{Air})/\text{Уголь}$, $p_{0i} = 0,3 \text{ МПа}$, $\rho = 156-485 \text{ г/м}^3$

После опыта измеряли давление в трубе p_2 , массу m_0 угольных частиц, поступивших в трубу (по расходу угольного порошка в контейнере), массу m_1 осевшего на нижний фланец угля, а также массу m_2 угольного порошка на стенках трубы, протирая трубу и взвешивая ветошь три раза.

В смесях $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}$ во взрывных и детонационных волнах давление после опыта p_2 понижается на 0,012–0,06 МПа за счёт конденсации водяного пара (см. рис. 9,

$\rho = 0$). В смесях $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Air}/\text{Уголь}$ за фронтом волн при горении частиц угля дополнительно образуются CO и CO_2 . Поэтому p_2 выше p_0 на 0,01–0,016 МПа (рис. 9). Величина p_2 возрастает линейно от концентрации взвеси из-за увеличения доли мелких частиц угля, конкурирующих в процессе горения с метаном. С увеличением концентрации H_2 в смесях 1–3 величина p_2 уменьшается благодаря росту мольной доли H_2O (см. рис. 9).

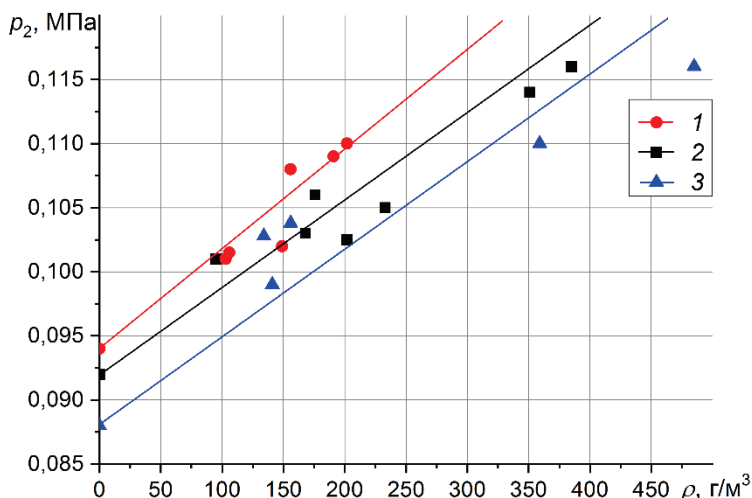


Рис. 9. Давление после опыта в зависимости от ρ , $p_{0i} = 0,25; 0,3$ МПа. Смесей $(\text{CH}_4+n\text{H}_2+10,52\text{Air})/\text{Уголь}$, $n = 0,1$ (1), 0,2 (2), 0,5(3)

Массу угля, перешедшую в газовую фазу, определяли из выражения $m_{\text{CG}} = m_0 - m_1 - m_2$. Зависимость m_{CG} от ρ линейная (рис. 10).

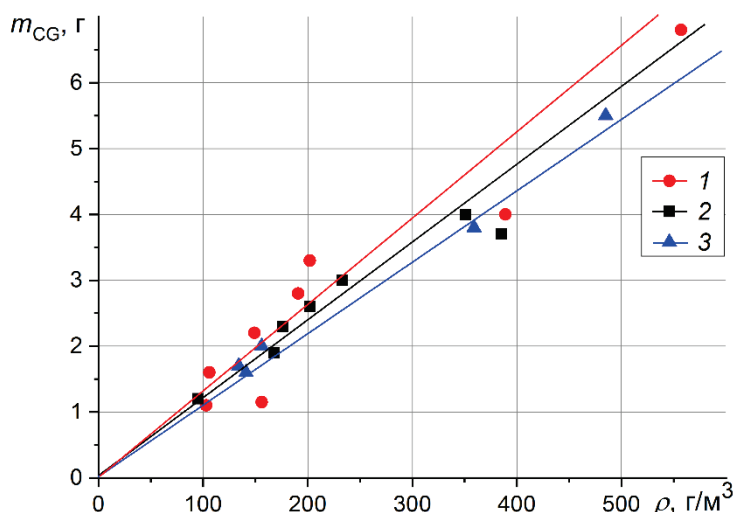


Рис. 10. Масса угля, перешедшего в газовую фазу, в зависимости от ρ , $p_{0i} = 0,25; 0,3$ МПа. Смесей $(\text{CH}_4+n\text{H}_2+10,52\text{Air})/\text{Уголь}$, $n = 0,1$ (1), 0,2 (2), 0,5(3)

Здесь $0,36 \leq m_{CG}/m_0 \leq 0,62$, среднее по всем опытам значение $\langle m_{CG}/m_0 \rangle \approx 0,47$. Поскольку $m_0 > m_{CG} > m_{coal}^{st}$, где $m_{coal}^{st} \approx 0,23; 0,16$ и $0,34$ г при $n = 0,1; 0,2; 0,5$ соответственно, то в зоне реакции ДВ сгорает m_{coal}^{st} — лишь небольшая часть взвешенного в трубе угля. Существенно большая доля угля (78,8–97,4 %) газифицируется и выделяет летучие при нагревании в падающих и отраженных волнах.

ВЫВОДЫ

Получены данные о параметрах и структуре взрывных и детонационных волн в смесях $CH_4/H_2/Air$ и в газовзвесьях $CH_4/H_2/Air/Уголь$.

Параметры детонации в исследованных газовзвесьях возрастают незначительно по сравнению с газовыми смесями. На параметры ДВ определяющее влияние оказывают не взвесь угля, а метан и водород.

При отражении затухающей взрывной волны возбуждается либо низкоскоростная, либо высокоскоростная детонация. Поэтому затухающие взрывные волны могут представлять такую же опасность, как и детонационные волны.

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.: Горное дело, 2012. Серия Библиотека горного инженера. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 10. 464 с.
3. Айруни А.Т., Клебанов Ф.С., Смирнов О.В. Взрывоопасность угольных шахт. М.: Горное дело, 2011. Серия «Библиотека горного инженера». Т. 9 «Рудничная аэрология». Кн. 2. 264 с.
4. Палеев Д.Ю., Васенин В.Н., Костеренко В.Н. и др. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. М.: Горное дело, 2011. Серия Библиотека горного инженера. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 3. 312 с.
5. Wolinski M., Wolanski P. Gaseous detonation processes in presence of inert particles // Arch. Combust. 1987. Vol. 7. No. 3/4. P. 353–370.
6. Bouchet R., Laffite P. L'extinction des ondes par les substances pulvérisees // C.R.A.S. 1958. Vol. 246. P. 1858–1861.
7. 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.
8. Kauffmann C.W., Wolanski P., Arisoy A. et al. Dust, hybrid and dusty detonation // AIAA Progress in Astronautics, and Aeronautics. 1984. Vol. 94. P. 221–239.
9. Wolanski P., Liu J.C., Kauffmann C.W. et al. The effects of inert particles on methane-air detonations // Archivum Combustionis. 1988. Vol. 8. No. 1. P. 15–32.

С увеличением доли водорода уменьшается энергия инициирования и облегчается инициирование смесей $CH_4/H_2/Air$ и газовзвесей $CH_4/H_2/Air/Уголь$. Наличие водорода в шахте даже в небольших количествах повышает опасность взрыва и детонации газовзвесей $CH_4/H_2/Air/Уголь$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основную опасность в угольных шахтах представляют газовые взрывчатые смеси метана (и водорода) с воздухом. Эти смеси способны взрываться и детонировать как в падающих, так и в отражённых волнах на длине в несколько метров. Взвеси угольной пыли химически менее активны, чем газовые смеси. Для обеспечения взрывобезопасности шахт следует добиваться полного гашения детонационных волн в момент зарождения взрыва с помощью, например, инертных пылевых завес с объёмной плотностью не менее $2\text{--}3$ кг/м³.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020).

-
10. 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. Vol. 19. P. 648–655.
 11. 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. Vol. 30. P. 2361–2368.
 12. 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.
 13. Pinaev A.V., Vasilev A.A., Pinaev P.A. Suppression of gas detonation by a dust cloud at reduced mixture pressures // *Shock Waves*. 2015. Vol. 25. No. 3. P. 267–275.
 14. 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.
 15. Васильев А.А., Пинаев А.В., Троцюк А.В., Фомин П.А., Трубицын А.А., Трубицына Д.А. Полное подавление волн горения и детонации пылевой завесой // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2015. № 4. С. 12–21.
 16. 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? // *ФГВ*. 2017. Т. 53. № 1. С. 11–18.
 17. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Изучение сравнительной химической активности метана и взвесей частиц угля при горении, взрывах и детонации // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2019. № 4. С. 5–16.
 18. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Волны горения и детонации в смесях газов CH_4/Air , CH_4/O_2 , O_2 с взвесями каменного угля // *ФГВ*. 2020. Т. 56. № 6. С. 56–68.
 19. Лямин Г.А., Пинаев А.В., Лебедев А.С. Пьезоэлектрики для измерения импульсных и статических давлений // *ФГВ*. 1991. Т. 27. № 3. С. 94–103.
 20. 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.
 21. 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.2022.23.30.003

UDC 534.222.2+536.46+622.814

© A.V. Pinaev, P.A. Pinaev, 2022

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

EXPLOSION, DETONATION IN METHANE-HYDROGEN-AIR, METHANE-HYDROGEN-AIR-COAL SLURRY MIXTURES

Explosion and detonation waves in gas dual-fuel mixtures of CH₄/H₂/Air and heterogeneous triple-fuel mixtures CH₄/H₂/Air/Coal have been experimentally investigated. Experiments simulate the initial stage of explosion in coal mines, experiments are performed in a shock tube. Data were obtained on the dynamics and structure of incident explosive and detonation waves, reflected detonation and shock waves. Analysis of influence of methane, hydrogen and coal suspension on wave parameters was carried out. Experimental data are compared with the calculated equilibrium thermodynamic parameters of detonation.

Keywords: METHANE, HYDROGEN, COAL SUSPENSION, AIR, SHOCK WAVE, BLAST WAVE, DETONATION, INITIATION ENERGY, COMBUSTION, MULTI-FUEL MIXTURES.

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 «Mining aerology ». Book 2. 264 p. [In Russ.].
4. Paleev D.Yu., Vasenin I.M., Kosterenko V.N. et al. 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. Wolinski M., Wolanski P. Gaseous detonation processes in presence of inert particles // Arch. Combust. 1987. Vol. 7. No. 3/4. P. 353–370.
6. Bouchet R., Laffite P. L'extinction des ondes par les substances pulvérisées // C.R.A.S. 1958. Vol. 246. P. 1858–1861.
7. 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.
8. Kauffmann C.W., Wolanski P., Arisoy A. et al. Dust, hybrid and dusty detonation // AIAA Progress in Astronautics, and Aeronautics. 1984. Vol. 94. P. 221–239.
9. Wolanski P., Liu J.C., Kauffmann C.W. et al. The effects of inert particles on methane-air detonations // Archivum Combustionis. 1988. Vol. 8. No. 1. P. 15–32.
10. 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. Vol. 19. P. 648–655.
11. 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. Vol. 30. P. 2361–2368.
12. 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.].
13. Pinaev A. V., Vasilev A. A., Pinaev P. A. Suppression of gas detonation by a dust cloud at reduced mixture pressures // Shock Waves. 2015. Vol. 25. No.3. P. 267–275.
14. Pinaev A.V., Vasiliev A.A., Pinaev P.A. On the critical parameters of a dust curtain providing complete damping of a gas detonation wave // Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti]. 2016. No. 2. P. 113–120. [In Russ.].
15. Vasiliev A.A., Pinaev A.V., Trotsyuk A.V., Fomin P.A., Trubitsyn A.A., Trubitsyna D.A. Complete suppression of gorenje waves and detonation by a dust curtain // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti]. 2015. No. 4. P. 12–21. [In Russ.].

16. 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 [Fizika goreniya i vzryva]. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 11–18. [In Russ.].

17. Pinaev A V, Pinaev P.A. The study of the comparative chemical activity of methane and coal particle suspensions during gorenje, explosions and detonation // Bulletin of the Scientific Center for Safety of work in the coal industry [Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti]. 2019. No. 4. P. 5–16. [In Russ.].

18. Pinaev A V, Pinaev P.A. Gorenje and detonation waves in mixtures of gases CH_4/Ar , CH_4/O_2 , O_2 with coal suspensions // FGV [Fizika goreniya i vzryva]. 2020. Vol. 56. No. 6. P. 56–68. [In Russ.].

19. Lyamin G.A., Pinaev A.V., Lebedev A.S. Piezoelectrics for measuring pulse and static pressures // FGV [Fizika goreniya i vzryva]. 1991. Vol. 27, No. 3. P. 94–103. [In Russ.].

20. 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.].

21. 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.].