

УДК 534.222.2+536.46+622.814

## ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ В СМЕСЯХ ГАЗОВ $\text{CH}_4/\text{Air}$ , $\text{CH}_4/\text{O}_2$ , $\text{O}_2$ С ВЗВЕСЯМИ КАМЕННОГО УГЛЯ

А. В. Пинаев, П. А. Пинаев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, avpin@ngs.ru

На вертикальной ударной трубе исследованы процессы горения, взрыва и детонации в гибридных системах: газовые смеси  $\text{CH}_4/\text{Air}$ ,  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2$  с взвесями частиц каменного угля размером до 200 мкм и среднеобъемной плотностью до  $700 \text{ г/м}^3$ . Проанализированы рентгенограммы исходного угольного порошка и образцов угля, подвергшихся воздействию высокотемпературных волн. Получены данные о структуре и параметрах волн в гибридных смесях и в тех же смесях газов без угольной взвеси. Показано, что в гибридных системах взвесь угля слабее влияет на параметры волн горения и детонации, чем метан, при этом метан в этих волнах химически активнее угольной пыли.

Ключевые слова: метан, угольная пыль, шахтные взрывы, горение, детонация, взрывобезопасность.

DOI 10.15372/FGV20200606

### ВВЕДЕНИЕ

При добыче каменного угля мелкодисперсная угольная пыль откладывается на стенках горизонтальной шахты. В воздухе канала шахты постоянно присутствует витающая угольная пыль, концентрация которой ( $\rho \leq 1 \text{ г/м}^3$ ) на  $2 \div 4$  порядка меньше нижнего концентрационного предела взрываемости ( $30 \div 80 \text{ г/м}^3$ ) угольной пыли [1–3]. Первичные волны сжатия чаще возникают при взрывах метановоздушных смесей вблизи мест случайного выброса метана. Такая взрывная волна (ударная волна (УВ) с движущимися за ней продуктами сгорания) может сорвать угольную пыль со стенок канала, создать облако угольной пыли и воспламенить его [1–5]. Горение, взрыв и детонация гибридных систем метановоздушные смеси — угольная пыль изучены слабее метановоздушных смесей.

В экспериментах [5] с условиями, близкими к условиям в шахтах, участок канала длиной  $l$  и диаметром  $d = 1 \div 3$  м отделяли от остальной, более длинной части канала тонкой бумажной или полиэтиленовой перегородкой и заполняли метаном. Метановоздушную смесь подрывали воспламенителем с энергией несколько килоджоулей. Обычно  $\Lambda = l/d \approx 3 \div 20$ , и взрывная волна не успевала перейти в детонацию [5]. За мембраной участок канала

покрывали слоем угольной пыли, наносили на часть поверхности угольной пыли связующий инертный раствор и размещали внутри канала средства ослабления взрыва [5–7]. Такие исследования чрезвычайно трудоемкие и затратные.

Затухание и возбуждение взрывных и детонационных волн (ДВ) в запыленных средах исследовали, например, в [8–22]. В [8, 9] для предотвращения и тушения пожаров предложен химико-кинетический способ. Чтобы обеспечить взрывобезопасность в шахте при динамических процессах, необходимо получить данные о химической активности метана и угольной пыли [23]. Для решения этой задачи достаточно в экспериментах на ударной трубе, которые гораздо менее трудоемкие, чем натурные испытания, сравнить между собой параметры волн горения и детонации в бедных по метану смесях и в тех же гибридных смесях метана с угольной пылью. Цель настоящей работы — получить в указанных выше системах экспериментальные данные о параметрах и структуре волн горения и детонации, начиная с момента их возбуждения, при различной энергии иницирования.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты выполнены при температуре  $16 \div 17 \text{ }^\circ\text{C}$  в вертикальной ударной трубе

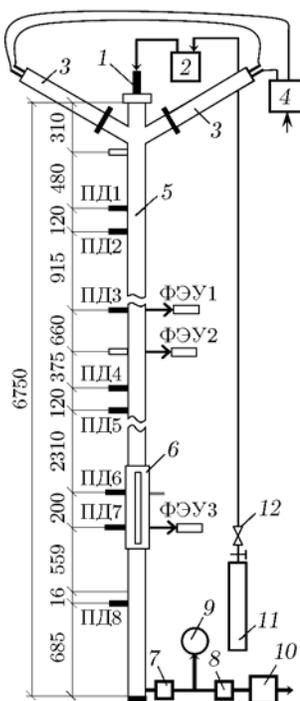


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 — генератор пыли, 2 — контейнер с порошком каменного угля, 3 — секции инициирования ( $d = 50$  мм,  $l_1 = 0.45$  м) с лавсановыми диафрагмами, 4 — источник высокого напряжения, 5 — рабочая секция ударной трубы ( $d = 70$  мм), 6 — оптическая секция, 7, 8 — шаровые вентили, 9 — мановакуумметр, 10 — форвакуумный насос, 11 — баллон объемом 40 л с газовой смесью, 12 — редуктор, ПД1 ÷ ПД8 — пьезодатчики, ФЭУ1 ÷ ФЭУ3 — фотоумножители

(рис. 1) размерами  $l = 6.75$  м,  $d = 70$  мм,  $\Lambda \approx 96$ . Такого значения  $\Lambda$  обычно достаточно для выхода на режим нормальной детонации. Трубу вакуумировали и заполняли бедными по метану (примерно на 10 %) газовыми смесями  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4/\text{Air}$  или кислородом, либо теми же газами с взвесью угля (гибридными смесями) до начального давления  $p_0 = 0.025 \div 0.1$  МПа. Газовые смеси подавали из баллона 11 через редуктор 12. Гибридную смесь создавали путем прохождения газовой смеси через контейнер 2 с порошком каменного угля и через генератор пыли 1. Масса и среднеобъемная концентрация частиц угольной пыли в трубе изменялись в диапазонах  $m = 0.6 \div 15.7$  г и  $\rho = 23 \div 700$  г/м<sup>3</sup>. Температуры самовоспламенения и горения угля равнялись соответственно 400 и 470 °С.

Волны горения и детонации инициирова-

ли либо искровыми разрядами с энергией  $e_i \approx 1$  Дж от высоковольтного источника 4 (в этом случае диафрагмы между секциями не устанавливали), либо с помощью секций инициирования (СИ) (3), отделяемых от рабочей секции (РС) 5 лавсановыми диафрагмами. СИ заполняли смесью  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$  при начальном давлении  $p_{0i} = 0.05 \div 0.36$  МПа и инициировали искровыми разрядами ( $e_i \approx 1$  Дж). При детонационном сгорании смеси в СИ выделялась энергия  $q_i \approx 15 \div 106$  кДж (удельная энергия инициирования  $w_i = 4q_i/\pi d^2 \approx 3.8 \div 27.6$  МДж/м<sup>2</sup>), температура продуктов сгорания  $\approx 4000$  К. Скорость взрывных волн, получаемых от СИ, на верхнем участке РС  $1000 \div 1400$  м/с.

При инициировании исследуемых в работе химически активных систем  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{уголь}$  искрой либо с помощью СИ в ударной трубе распространяется детонация. В опытах детонацию в этих системах возбуждали с помощью СИ (см. ниже § 3.1), поскольку в этом случае ДВ выходит на стационарный режим быстрее, чем при искровом инициировании. По параметрам стационарной детонации делалось заключение о реакционной активности газовых и гибридных систем.

Инициирование химически менее активных смесей  $\text{CH}_4/\text{Air}$  и  $\text{CH}_4/\text{Air}/\text{уголь}$  осуществляли двумя способами — искровым и с помощью СИ (см. ниже § 3.2). При инициировании искрой в ударной трубе распространяется волна горения, при инициировании этих же систем секциями инициирования — затухающие взрывные волны.

Профили свечения и давления в волнах сжатия регистрировали тремя 4-лучевыми осциллографами Tektronix TDS2014, сигналы на которые поступали с фотоумножителей ФЭУ1 ÷ ФЭУ3 и пьезодатчиков ПД1 ÷ ПД8 через истоковые повторители с постоянной времени  $0.5 \div 2$  с. Собственная частота пьезодатчиков 300 кГц, конструкция и методы тарировки датчиков описаны в [24–26]. Погрешности измерения давления не превышали 5 %, скорости волн — 1 %.

## 2. УГОЛЬНЫЙ ПОРОШОК

Исходные куски (<1 см) каменного угля Кузбасса измельчали 2 ч на галтовочной машине со стальными шариками диаметром  $10 \div 40$  мм. Ситом с размером ячейки 500 мкм

убраны частицы более 0.5 мм. Из 100 г порошка фракции  $0 \div 500$  мкм ситами 200, 140 и 94 мкм получены фракции  $500 \div 200$ ,  $200 \div 140$ ,  $140 \div 94$  и  $0 \div 94$  мкм массой 41, 15, 20, 16 г соответственно, остаток на ситах — 8 г с размером частиц  $0 \div 10$  мкм. По массе фракций порошка угля можно примерно судить об их массовой доле. Фракции порошка и сита взвешивали на весах с погрешностью 0.1 г и исследовали на микроскопе.

Частицы размером менее 10 мкм не отсеиваются в остаток и всегда присутствуют среди крупных частиц и на ситах, поэтому реальная доля частиц во фракциях ниже указанных значений. Массовая доля полученных фракций с размерами менее 200 мкм мала, процесс отсева этих фракций трудоемкий. По этим причинам из порошка  $0 \div 500$  мкм через сито с ячейкой 200 мкм получены фракции  $200 \div 500$  и  $0 \div 200$  мкм. Опыты проведены с порошком угля  $0 \div 200$  мкм, эта фракция имеет плохую сыпучесть и склонна к конгломерации за счет связующей мелкой фракции. Генератор пыли 1 обеспечивал равномерное поступление этой фракции в трубу, что установлено взвешиванием угольного порошка в контейнере 2 (рис. 1) в различные моменты времени. Снимки и элементный состав частиц угля и примеси получены на сканирующем электронном микроскопе Merlin Compact, Zeiss. Частицы примеси на снимках обладают характерным блеском.

Основные элементы угля — С, О, Si, Al, Ca, S (среднее массовое содержание 78.35, 19.75, 0.69, 0.41, 0.25, 0.16 % соответственно), примеси — С, О, Si, Al, Fe, Ca, Mg (25.08, 39.06, 13.33, 8.41, 7.79, 2.69, 1.95 % соответственно). В примеси доля С убывает, а доли О, Si, Al, Fe, Ca и Mg возрастают по сравнению с углем.

Химический состав кристаллических веществ частиц угля и примеси определяли на рентгеновском дифрактометре D8-Advance (излучение  $\text{Cu } K_\alpha$ ). Для каменного угля линии кристаллического углерода отсутствуют, в окрестности угла  $26^\circ \text{C}$  присутствует широкое гало, соответствующее аморфному углероду. В частицах примеси кристаллические вещества соответствуют линиям кварца ( $\text{SiO}_2$ ) и близким между собой линиям каолинита  $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$  и хлорита  $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  — компонентам глины, в глине преобладает каолинит.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

#### 3.1. Детонация смесей $\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2$ , $(\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2)/\text{уголь}$ в рабочей секции

##### 3.1.1. $p_0 = 0.1$ МПа

**А.** Для бедной по горючему смеси  $\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2$  расчетная скорость детонации  $D_0 \approx 1640$  м/с, эффективная длина зоны реакции (размер детонационной ячейки)  $a \approx 30$  мм [27]. После детонационного сгорания смеси  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$  в СИ при  $p_{0i} = 0.15$  МПа ( $w_i \approx 11.5$  МДж/м<sup>2</sup>) и разрыва диафрагм в исследуемой газовой смеси возбуждается ускоряющаяся ДВ. Скорости волны на базах ПД1 ÷ ПД8:  $D_{12} \approx 1200$ ,  $D_{24} \approx 1182$ ,  $D_{34} \approx 1170$ ,  $D_{45} \approx 1263$ ,  $D_{67} \approx 1626$ ,  $D_{78} \approx 1600$  м/с. В нижней части трубы ДВ выходит на режим нормальной детонации, датчики регистрируют за ударным фронтом после скачка спад давления в зоне реакции (характерный химпик).

После отражения волны детонации от нижнего торца вверх по трубе распространяется УВ. Здесь и в дальнейших опытах из-за изменения массовой скорости и давления встречного потока скорость отраженной УВ возрастает ( $D_{87} \approx 927$ ,  $D_{76} \approx 952$  м/с).

При большей энергии инициирования ( $p_{0i} = 0.2$  МПа,  $w_i \approx 15.3$  МДж/м<sup>2</sup>) ДВ распространяется почти стационарно:  $D_{12} \approx 1714$ ,  $D_{24} \approx 1612$ ,  $D_{34} \approx 1592$ ,  $D_{45} \approx 1600$ ,  $D_{67} \approx 1570$ ,  $D_{78} \approx 1562$  м/с. Скорости отраженной УВ  $D_{87} \approx 767$ ,  $D_{76} \approx 816$  м/с. Характерные осциллограммы давления и свечения для этого опыта на нижнем участке трубы приведены на рис. 2,а. Здесь и далее скачок давления по вертикали для датчиков  $\Delta p = p - p_0$ .

**Б.** В РС в смесь  $\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2$  при  $p_0 = 0.1$  МПа для стехиометрии необходимо добавить 10.6 г углерода, в результате получится стехиометрическая смесь состава  $\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2 + 9.346\text{C}$ . Этому количеству углерода соответствует масса угольной взвеси  $m \approx 13.5$  г ( $\rho \approx 603$  г/м<sup>3</sup>). Опыты с гибридными системами выполнены в диапазоне  $27 \leq \rho \leq 260$  мг/м<sup>3</sup>.

При  $p_{0i} = 0.15$  МПа в гибридной смеси  $(\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2)/\text{уголь}$ ,  $\rho \approx 190$  г/м<sup>3</sup>, ДВ уже

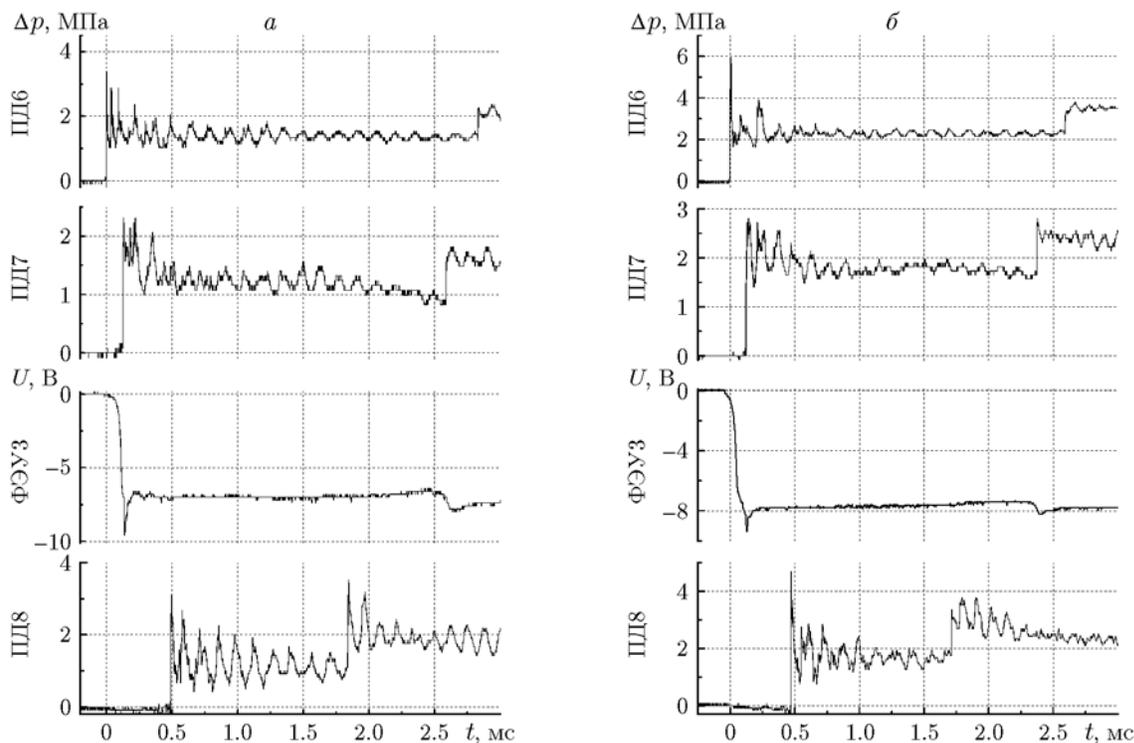


Рис. 2. Осциллограммы давления и свечения в ДВ,  $p_0 = 0.1$  МПа,  $p_{0i} = 0.2$  МПа,  $w_i \approx 15.3$  МДж/м<sup>2</sup>:

*a* — газовая смесь  $\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2$ ; *б* — гибридная смесь  $(\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2)/\text{уголь}$ ,  $\rho \approx 260$  г/м<sup>3</sup>,  $D_{12} \approx 1667$ ,  $D_{24} \approx 1681$ ,  $D_{34} \approx 1669$ ,  $D_{45} \approx 1622$ ,  $D_{67} \approx 1613$ ,  $D_{78} \approx 1643$  м/с

на начальном участке трубы, в отличие от газовой смеси, приобретает практически стационарную скорость:  $D_{12} \approx 1714$ ,  $D_{24} \approx 1639$ ,  $D_{34} \approx 1617$ ,  $D_{45} \approx 1714$ ,  $D_{67} \approx D_{78} \approx 1575$  м/с. Скорости отраженной от торца УВ  $D_{87} \approx 927$ ,  $D_{76} \approx 952$  м/с. Благодаря воспламенению и горению частиц угля, свечение в волне становится более интенсивным и длительным. Из-за неполного сгорания взвесь угля частично проявляет себя как химически инертная среда: в ДВ происходит потеря импульса, и скорость детонации в конце трубы становится меньше, чем в газовой смеси примерно на 20 м/с.

При более сильном иницировании ( $p_{0i} = 0.20$  МПа,  $w_i \approx 15.3$  МДж/м<sup>2</sup>) и  $\rho \approx 248 \div 260$  г/м<sup>3</sup> ДВ распространяется также практически стационарно:  $D_{12} \approx 1670 \pm 5$ ,  $D_{24} \approx 1652 \pm 20$ ,  $D_{45} \approx 1656 \pm 13$ ,  $D_{67} \approx 1614 \pm 5$ ,  $D_{78} \approx 1633 \pm 10$  м/с. Свечение на «полочке» в волне (длительность  $>3$  мс) возрастает по интенсивности примерно на 12 % по сравнению со свечением в газовой смеси (рис. 2,б). Скорости отраженной УВ  $D_{87} \approx 849 \pm 20$ ,  $D_{76} \approx 909 \pm 5$  м/с.

Из-за торможения потока газа на частицах угля давление на фронте ДВ в гибридной смеси возрастает при  $\rho \approx 190$  г/м<sup>3</sup> на  $14 \div 20$  % и при  $\rho \approx 248 \div 260$  г/м<sup>3</sup> на  $30 \div 70$  % по сравнению с давлением на фронте ДВ в газовой смеси  $\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2$ .

Из наших опытов следует, что горение угольных частиц начинается в зоне реакции ( $a \approx 30$  мм) и продолжается за ней. Но результирующее тепловыделение в зоне реакции по сравнению с газовой смесью практически не меняется, скорость детонации не возрастает. После отражения ДВ от торца трубы вверх по трубе распространяется УВ. По результатам измерений спектров на электронном микроскопе концентрации элементов на частице угля до и после опытов близки между собой и находятся внутри диапазона разброса данных.

После опытов увеличивается доля частиц примеси идеальной сферической формы размером от долей до десятков микрометров (рис. 3). Эти частицы успевают прогреться в волне детонации и расплавиться, после чего приобретают за счет сил поверхностного натяжения фор-

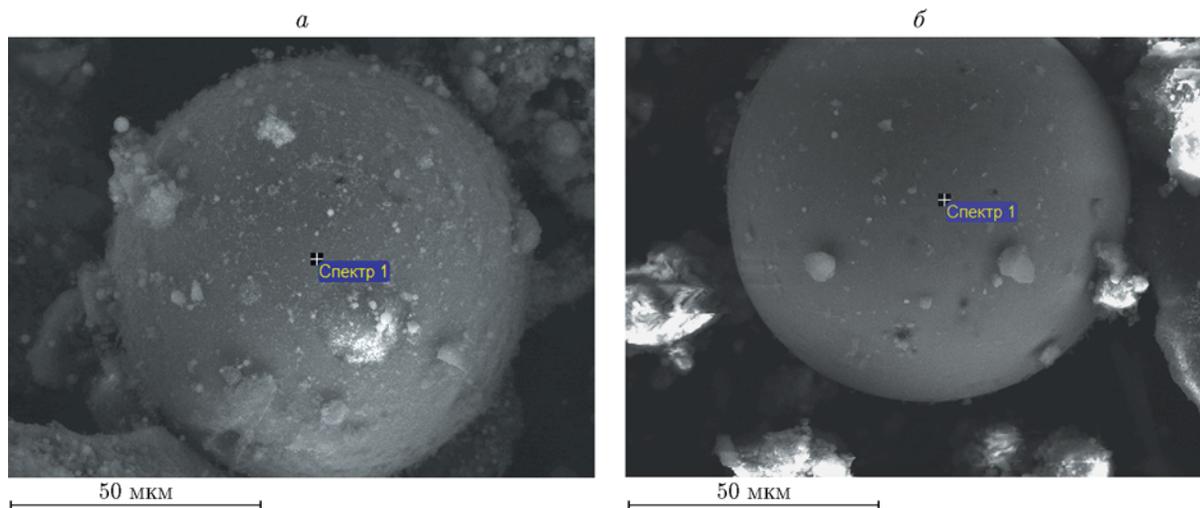


Рис. 3. Крупные ( $80 \div 85$  мкм) и мелкие ( $1 \div 2$  мкм) сферические частицы примеси в угле, образовавшиеся после воздействия на них ДВ:

гибридная смесь  $(\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2)/\text{уголь}$ ,  $a - \rho \approx 190 \text{ г/м}^3$ ,  $b - 260 \text{ г/м}^3$

му шара и сохраняют ее при остывании. Аналогичные сферические частицы наблюдаются и в описанных ниже опытах.

### 3.1.2. $p_0 = 0.025$ МПа

**А.** Для выяснения влияния длины зоны реакции на параметры детонации и степень выгорания частиц угля выполнены эксперименты при пониженных начальных давлениях в РС. Иницирование детонации в газовой смеси  $\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2$  осуществляли аналогично экспериментам при  $p_{0i} = 0.1$  МПа (см. § 3.1.1). Свечение за фронтом проходящей ДВ на нижнем участке трубы длится примерно 1.5 мс, что соответствует области размером 2.3 м (рис. 4, *a*, ФЭУЗ), здесь при  $p_0 = 0.025$  МПа  $a \approx 120$  мм — увеличивается обратно пропорционально  $p_0$ . Волна детонации распространяется в спиновом режиме с частотой вращения «головы»  $f \approx 7.41$  кГц (рис. 4, *a*, ПД6 ÷ ПД8). По этой частоте из соотношения  $c = \pi df / 1.84$  [28] можно оценить скорость звука в продуктах детонации:  $c_1 \approx 886$  м/с. Скорости ДВ по длине  $D_{12} \approx 1463$ ,  $D_{24} \approx 1632$ ,  $D_{34} \approx 1617$ ,  $D_{45} \approx 1579$ ,  $D_{67} \approx 1538$ ,  $D_{78} \approx 1554$  м/с. В отраженной УВ (скорости  $D_{87} \approx 710$ ,  $D_{76} \approx 724$  м/с) свечение усиливается (рис. 4, *a*, ФЭУЗ).

**Б.** При аналогичном иницировании гибридной смеси в ДВ свечение в зоне реакции и за ней усиливается по сравнению с газовой смесью из-за горения частиц угля, что приводит к увеличению времени горения и слия-

нию сигналов интенсивности свечения в падающей и отраженной волнах (рис. 4, *b*, ФЭУЗ). Здесь скорости фронта ДВ равны  $D_{12} \approx 1714$ ,  $D_{24} \approx 1667$ ,  $D_{34} \approx 1669$ ,  $D_{45} \approx 1710$ ,  $D_{67} \approx 1538$ ,  $D_{78} \approx 1554$  м/с, скорости отраженной УВ —  $D_{87} \approx 821$ ,  $D_{76} \approx 870$  м/с. Волна детонации выходит на одноголовый спиновый режим с частотой вращения  $f \approx 7.94$  кГц (рис. 4, *b*, ПД6 ÷ ПД8), скорость звука в продуктах детонации  $c_2 \approx 949$  м/с. К концу трубы скорость ДВ возрастает на 40 м/с. Температура за зоной реакции в гибридной смеси  $T_2 \approx T_1 \sqrt{c_2/c_1} \approx 1.15T_1$  примерно на 15 % превышает температуру  $T_1$  при детонации той же газовой смеси.

На частицах угля и частицах примеси значения концентраций элементов до опыта и после прохождения ДВ находятся внутри диапазона разброса данных.

## 3.2. ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ В ГАЗОВЫХ $\text{CH}_4/\text{Air}$ И ГИБРИДНЫХ $\text{CH}_4/\text{Air}/\text{УГОЛЬ}$ СИСТЕМАХ

### 3.2.1. Горение

#### в секции иницирования и рабочей секции

**А.** Рабочая секция и секции иницирования заполнены смесью  $\text{CH}_4 + 10.52\text{Air}$ , диафрагмы в трубе отсутствуют, иницирование осуществляли искрой с энергией  $e_i \approx 1$  Дж. Расчетные детонационные параметры для газовой смеси  $\text{CH}_4 + 10.52\text{Air}$  при  $p_0 = 0.1$  МПа:  $D_0 = 1770$  м/с,  $a \approx 260$  мм, давление в плоскости Чепмена — Жуге  $p_{CJ} = 1.66$  МПа [27]. Эта смесь

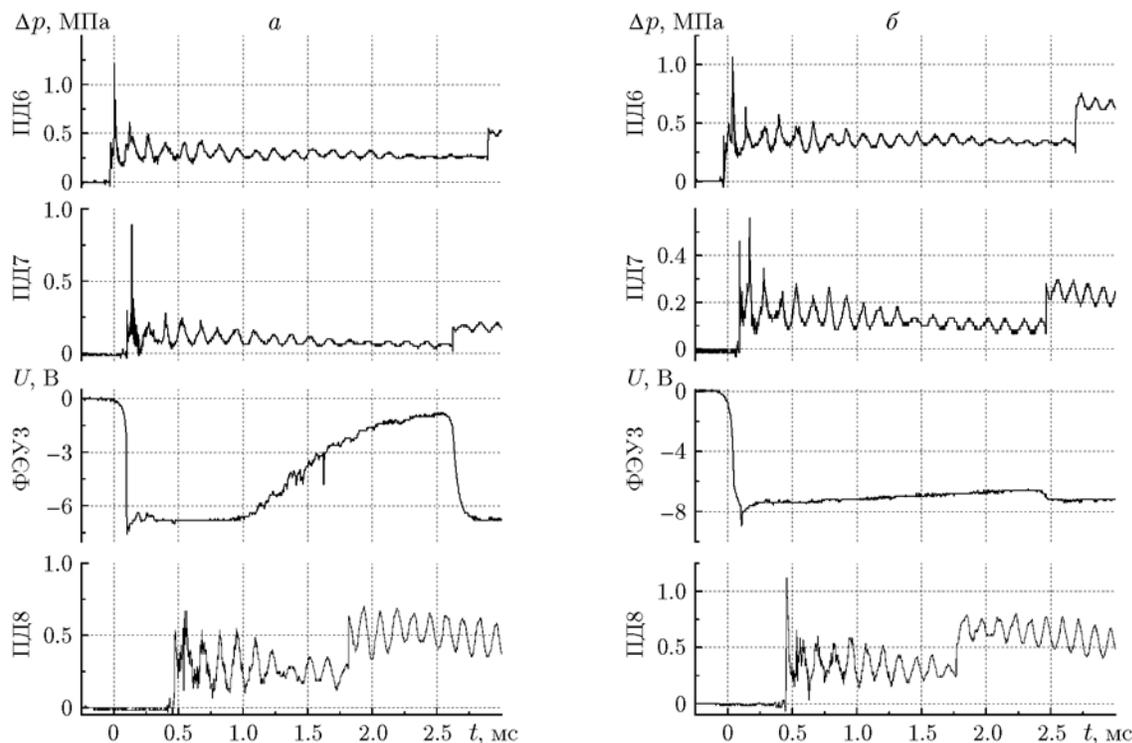


Рис. 4. Осциллограммы давления и свечения в ДВ,  $p_0 = 0.025$  МПа,  $p_{0i} = 0.1$  МПа,  $w_i \approx 7.7$  МДж/м<sup>2</sup>:

*a* —  $\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2$ ; *б* —  $(\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2)/\text{уголь}$ ,  $\rho \approx 80$  г/м<sup>3</sup>

примерно на 10 % беднее по метану, чем стехиометрическая метановоздушная смесь  $\text{CH}_4 + 9.524\text{Air}$ . В трубе диаметром  $d = 70$  мм стационарная детонация не распространяется даже в спиновом режиме, поскольку  $\pi d < a$ .

При  $p_0 = 0.05$  МПа смесь искрой не инициируется. С увеличением давления до  $p_0 = 0.085$  МПа пламя начинает распространяться по трубе в околоредельном режиме. При  $p_0 = 0.1$  МПа пламя устойчиво движется в трубе, волны сжатия опережают фронт пламени. Свечение в волне горения слабое и длится приблизительно 70 ÷ 200 мс. Скорости фронта пламени  $D_{24} \approx 325$ ,  $D_{34} \approx 260$ ,  $D_{45} \approx 120$ ,  $D_{67} \approx 0.91 \div 1.25$ ,  $D_{78} \approx 1.44$  м/с, отраженная волна отсутствует.

**Б.** В гибридной смеси  $(\text{CH}_4 + 10.52\text{Air})/\text{уголь}$  ( $\rho \approx 100 \div 546$  г/м<sup>3</sup>) при тех же условиях опытов и  $p_0 = 0.1$  МПа интенсивность свечения в волне горения возрастает более чем на порядок, волны сжатия к концу трубы становятся круче, чем в газовой смеси. Скорости фронта пламени  $D_{24} \approx 13$ ,  $D_{34} \approx 10 \div 13$ ,  $D_{67} \approx 1.43 \div 1.82$ ,  $D_{78} \approx 1.15 \div 1.37$  м/с. В гибридной смеси скорость

пламени на верхнем участке трубы меньше, чем в аналогичной газовой смеси.

По измерениям спектров на электронном микроскопе концентрации элементов на частицах угля до и после опытов находятся внутри диапазона разброса данных.

### 3.2.2. Взрывные волны в рабочей секции, $p_0 = 0.1$ МПа

**А.** Газовую смесь  $\text{CH}_4 + 10.52\text{Air}$  при  $p_0 = 0.1$  МПа в РС инициировали с помощью СИ, заполненной смесью  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$  при  $p_{0i} = 0.1$  МПа. При таком более мощном, чем в § 3.2.1, инициировании в РС распространяется затухающая взрывная волна. Между ФЭУ1 и ФЭУ2 скорость фронта пламени 600 м/с, свечение отстает на этом участке от фронта УВ на 450 мкс. В нижней части трубы на ФЭУ3 пламя удаляется от фронта УВ уже на 4 мс. Скорости фронта взрывной волны  $D_{12} = 1000 \div 1043$ ,  $D_{24} = 878 \div 886$ ,  $D_{34} = 835 \div 885$ ,  $D_{45} = 828 \div 857$ ,  $D_{67} = 769 \div 810$ ,  $D_{78} = 767 \div 788$  м/с. В отраженной волне, распространяющейся по горячему газу, реализует-

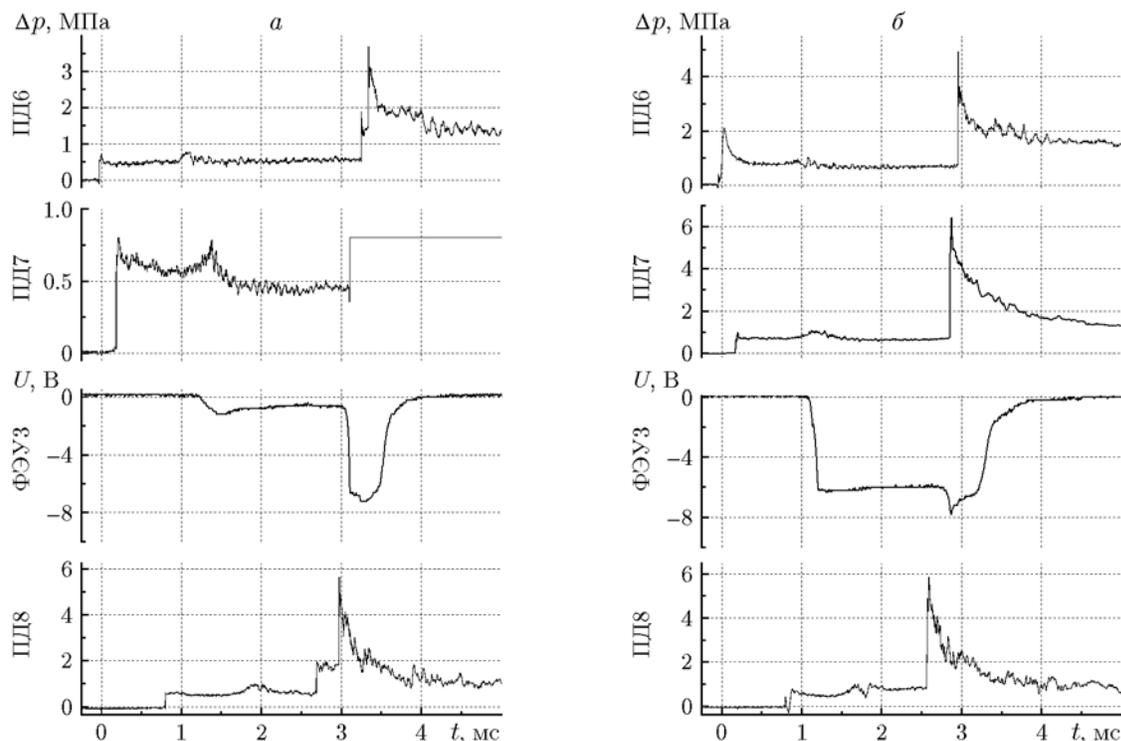


Рис. 5. Осциллограммы давления и свечения,  $p_0 = 0.1$  МПа:

*a* —  $\text{CH}_4 + 10.52\text{Air}$ ,  $p_{0i} = 0.2$  МПа; *б* —  $(\text{CH}_4 + 10.52\text{Air})/\text{уголь}$ ,  $p_{0i} = 0.2$  МПа,  $\rho \approx 530$  г/м<sup>3</sup>

ся режим стационарной низкоскоростной детонации:  $D_{87} \approx 1265 \div 1515$ ,  $D_{76} \approx 1290 \div 2000$ ,  $D_{54} \approx 1200 \div 2000$ ,  $D_{43} \approx 1150 \div 1620$ ,  $D_{42} \approx 1170 \div 1575$ ,  $D_{21} \approx 1200 \div 1500$  м/с. Начало свечения в ДВ практически совпадает с передним ударным фронтом волны.

С увеличением мощности инициирования ( $p_{0i} = 0.2$  МПа,  $w_i \approx 15.3$  МДж/м<sup>2</sup>) при  $p_0 = 0.1$  МПа в ударной трубе распространяется более сильная взрывная волна:  $D_{12} = 1200 \div 1333$ ,  $D_{24} = 1083 \div 1178$ ,  $D_{34} \approx 1035 \div 1089$ ,  $D_{45} = 1043 \div 1091$ ,  $D_{67} = 910 \div 930$ ,  $D_{78} = 905 \div 927$  м/с. Газовая смесь так же, как и при  $p_{0i} = 0.1$  МПа, сгорает не полностью, и в отраженной волне на нижнем участке трубы (рис. 5, *a*) реализуется низкоскоростная детонация со скоростью  $D_{87} \approx 1369 \div 1513$ ,  $D_{76} \approx 1429 \div 1600$  м/с и свечением на фронте. На верхнем участке трубы низкоскоростная ДВ распространяется примерно с постоянной скоростью:  $D_{54} \approx 1412 \div 1145$ ,  $D_{43} \approx 1362 \div 1669$ ,  $D_{42} \approx 1445 \div 1696$ ,  $D_{21} \approx 1470 \div 1500$  м/с.

**Б.** Гибридную смесь  $(\text{CH}_4 + 10.52\text{Air})/\text{уголь}$  инициировали, как и выше, газовой смесью  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$  с помощью

СИ. При начальных условиях ( $p_{0i} = 0.1$  МПа,  $p_0 = 0.1$  МПа) в гибридной смеси  $(\text{CH}_4 + 10.52\text{Air})/\text{уголь}$  ( $\rho \approx 23 \div 230$  г/м<sup>3</sup>) свечение за взрывной волной возрастает более чем на порядок по сравнению с предыдущим случаем, благодаря горению частиц угля. Однако, поскольку на верхнем участке трубы пламя отрывается от переднего ударного фронта примерно на 0.3 м, горение угля начинается в начальной области пламени. Из-за значительного отставания зоны реакции от фронта УВ волна не ускоряется. Скорости фронта волн по длине в гибридной смеси ниже, чем в аналогичной газовой смеси:  $D_{12} \approx 1000 \div 1200$ ,  $D_{24} \approx 882 \div 942$ ,  $D_{34} \approx 841 \div 885$ ,  $D_{45} \approx 857 \div 889$ ,  $D_{67} \approx 769 \div 909$ ,  $D_{78} \approx 757 \div 772$  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 встречается с отраженной от торца трубы волной. Фактически отраженная волна является низкоскоростной ДВ и распространяется снизу вверх со скоростью, меньшей, чем в газовой смеси:  $D_{87} \approx 1322 \div 1337$ ,

$D_{76} \approx 1\,333 \div 1\,429$ ,  $D_{54} \approx 1\,263 \div 1\,333$ ,  $D_{42} \approx 1\,193 \div 1\,423$ ,  $D_{21} \approx 1\,333 \div 942$  м/с.

При более мощном инициировании ( $p_{0i} = 0.2$  МПа) в гибридной смеси ( $\rho \approx 8 \div 530$  г/м<sup>3</sup>) происходят качественные и количественные изменения и резко усиливается свечение за фронтом волны (см. рис. 5, б). Взрывная волна также является затухающей, но скорости волн возрастают по сравнению со случаем инициирования при  $p_{0i} = 0.1$  МПа:  $D_{12} \approx 1\,200 \div 1\,333$ ,  $D_{24} \approx 1\,054 \div 1\,089$ ,  $D_{34} \approx 1\,005 \div 1\,089$ ,  $D_{45} \approx 1\,000 \div 1\,091$ ,  $D_{67} \approx 901 \div 917$ ,  $D_{78} \approx 885 \div 927$  м/с.

В нижней части трубы за фронтом УВ формируется волна сжатия со свечением. Отраженная волна является детонационной и распространяется с более высокой, чем при  $p_{0i} = 0.1$  МПа, скоростью:  $D_{87} \approx 1\,513 \div 1\,983$ ,  $D_{76} \approx 1\,429 \div 2\,000$  м/с, и наблюдается мощное свечение во фронте отраженной ДВ. На верхнем участке трубы скорость ДВ  $D_{54} \approx 1\,412 \div 1\,500$ ,  $D_{43} \approx 1\,522 \div 1\,630$ ,  $D_{42} \approx 1\,444 \div 1\,696$ ,  $D_{21} \approx 1\,500 \div 1\,520$  м/с. Здесь нижним параметрам скорости отраженной волны соответствует наименьшая концентрация угольной взвеси —  $\rho \approx 8$  г/м<sup>3</sup>. При столь низкой концентрации параметры падающей и отраженной волн определяются газовой смесью  $\text{CH}_4 + 10.52\text{Air}$ .

Угольная смесь горит в падающей и отраженной от нижнего торца трубы детонационных волнах. Параметры второй отраженной волны, распространяющейся от верха к низу трубы при  $\rho \approx 23 \div 230$  г/м<sup>3</sup> и  $p_{0i} = 0.1$  МПа:  $D_{12} \approx 1\,714 \div 2\,014$ ,  $D_{67} \approx 1\,797 \div 1\,982$ ,  $D_{78} \approx 1\,818 \div 2\,000$  м/с. Вторая отраженная волна при  $\rho \geq 23$  г/м<sup>3</sup> также является детонационной, она поддерживается за счет реакции горения угольных частиц. Однако при  $\rho \approx 8$  г/м<sup>3</sup> угольная взвесь практически не влияет на скорости второй отраженной волны:  $D_{12} \approx 860$ ,  $D_{24} \approx 890$  м/с, которые соответствуют УВ без энерговыделения.

Параметры первой взрывной волны в газовой и гибридной смесях возрастают с увеличением энергии инициирования. Во всех опытах с взвесьями угля при  $\rho \geq 23$  г/м<sup>3</sup> скорость отраженной ДВ на  $400 \div 600$  м/с больше, чем в аналогичной газовой смеси при тех же начальных условиях. Первая и вторая отраженные волны являются детонационными. В гибридных смесях значительная часть угля оседает на нижний фланец и наблюдается частичное сгорание угля. Доля сгоревшего угля обычно не превы-

шает  $20 \div 30$  % и зависит от величины  $\rho$ .

Выполненные нами опыты показали, что сравнительно кратковременное сжигание мелкодисперсного угля в волнах горения, взрывных и детонационных волнах по эффективности уступает более длительному по времени методу сжигания угля в котельных и печах.

### 3.3. Низкоскоростная детонация смеси ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$ )/уголь в рабочей секции

**А.** В газовой смеси  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$  горючее и окислитель находятся в стехиометрическом соотношении, расчетные параметры детонации Чепмена — Жуге:  $D_0 = 1\,867$  м/с,  $a \approx 83$  мм [27]. Эта смесь интересна тем, что ее параметры детонации близки к параметрам детонации смеси  $\text{CH}_4 + 11.346\text{O}_2$  (см. § 3.1), но в смеси  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$  нет свободного (лишнего) кислорода. Это позволяет напрямую сравнить реакционную активность метана и угольной пыли в гибридной системе. Смесью инициировали с помощью СИ, заполненной смесью  $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2$ . Опытным путем установлено оптимальное начальное давление в СИ —  $p_{0i} = 0.25$  МПа, при котором ДВ распространяется по всей трубе практически стационарно:  $D_{12} \approx 1\,765 \div 1\,935$ ,  $D_{24} \approx 1\,848 \div 1\,857$ ,  $D_{34} \approx 1\,822 \div 1\,848$ ,  $D_{45} \approx 1\,714 \div 1\,875$ ,  $D_{67} \approx 1\,818 \div 1\,852$ ,  $D_{78} \approx 1\,831 \div 1\,855$  м/с. Профили давления в ДВ имеют характерный химпик: скачок на ударном фронте и последующий спад давления примерно в два раза в конце зоны реакции (рис. 6, а). Начало сигнала свечения практически совпадает с ударным фронтом. Экспериментально измеренная по профилям давления длина зоны реакции  $37 \div 56$  мм. Частота пульсаций свечения и давления в ДВ  $f \approx 7.81 \div 8.13$  кГц. Отраженная волна — это УВ с прямоугольным профилем давления,  $D_{87} \approx 871 \div 878$ ,  $D_{76} \approx 909 \div 917$  м/с (рис. 6, а).

**Б.** Из описанных выше в работе опытов с гибридными смесями следует, что метан химически более активен и сгорает быстрее, чем угольная взвесь, поэтому логично ожидать, что в смеси ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$ )/уголь угольная взвесь будет себя вести как инертная завеса, исследованная в работах [10, 11]. Однако результаты экспериментов оказались не совсем однозначными.

В опытах наблюдалась такая закономерность. Если скорость ДВ к концу трубы спадала примерно до  $1\,300 \div 1\,500$  м/с, то отраженная волна также являлась волной низко-

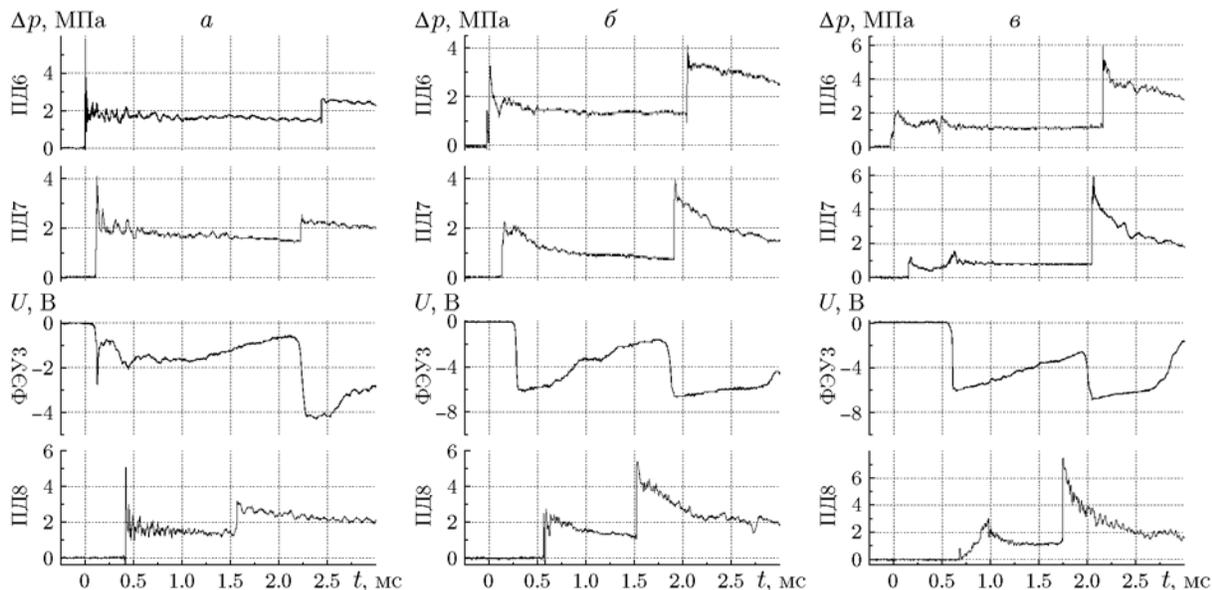


Рис. 6. Осциллограммы давления и свечения в падающих детонационных и отраженных волнах,  $p_0 = 0.1$  МПа,  $p_{0i} = 0.25$  МПа,  $w_i \approx 19.2$  МДж/м<sup>2</sup>:

*а* — газовая смесь  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$ ; *б, в* — гибридная смесь  $(\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2)/\text{уголь}$ ,  $\rho \approx 180$  (*б*),  $515$  г/м<sup>3</sup> (*в*)

скоростной детонации с химпиком и распространялась примерно с такой же скоростью  $D_{87} \approx 1495 \div 1370$  м/с,  $D_{76} \approx 1470 \div 1430$  м/с (рис. 6, *б*). Но если волна затухала еще сильнее до  $D_{78} \approx 1100$  м/с ( $\rho \approx 515$  г/м<sup>3</sup>), то после ее отражения возбуждалась сильная ДВ ( $D_{87} \approx 1898$ ,  $D_{76} \approx 1818$  м/с) с «химпиком» (рис. 6, *в*). При этом начало зоны свечения в отраженной волне практически совпадало с передним фронтом детонации.

В падающей ДВ в конце трубы зона реакции отрывается от переднего фронта на  $150 \div 500$  мкс ( $20 \div 55$  см), профиль давления вблизи переднего фронта неустойчивый, в начальной области светящейся зоны пламени давление плавно возрастает (рис. 6, *б, в*).

При тех же параметрах инициирующего источника, как в § 3.3, А ( $p_{0i} = 0.25$  МПа,  $w_i \approx 19.2$  МДж/м<sup>2</sup>), и при  $\rho \approx 179 \div 515$  г/м<sup>3</sup> скорость детонации на начальном участке ( $x \leq 0.85$  м) на  $270 \div 430$  м/с меньше, чем в газовой смеси (рис. 7). При  $x \approx 2.3$  м скорость волны уменьшается до  $D \approx 1150 \div 1300$  м/с. Если  $\rho < 500$  г/м<sup>3</sup>, то на длине  $2.3 < x \leq 3$  м ДВ ускоряется на  $50 \div 350$  м/с, но затем снова замедляется вплоть до координаты  $x \approx 4.8$  м. После  $x > 4.8$  м волна ускоряется на  $30 \div 100$  м/с.

Скорости волны по длине трубы при

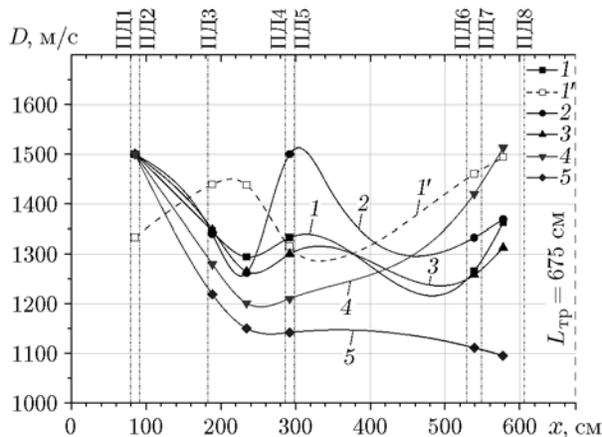


Рис. 7. Экспериментальные скорости падающих (1–5) и отраженной (1') ДВ по длине трубы,  $p_0 = 0.1$  МПа,  $p_{0i} = 0.25$  МПа,  $w_i \approx 19.2$  МДж/м<sup>2</sup>:

гибридная смесь  $(\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2)/\text{уголь}$ ,  $\rho \approx 179$  (1, 1'), 248 (2), 252 (3), 500 (4), 515 г/м<sup>3</sup> (5)

$p_{0i} = 0.25$  МПа и  $\rho \approx 179 \div 515$  г/м<sup>3</sup>:  $D_{12} \approx 1500 \div 1510$ ,  $D_{24} \approx 1345 \div 1219$ ,  $D_{34} \approx 1294 \div 1150$ ,  $D_{45} \approx 1333 \div 1142$ ,  $D_{67} \approx 1266 \div 1111$ ,  $D_{78} \approx 1369 \div 1095$  м/с. Если плотность угольной взвеси возрастает до  $\rho \approx 515$  г/м<sup>3</sup>, то скорость ДВ монотонно затухает по длине трубы от  $D_{12} \approx 1500$  м/с до  $D_{78} \approx$

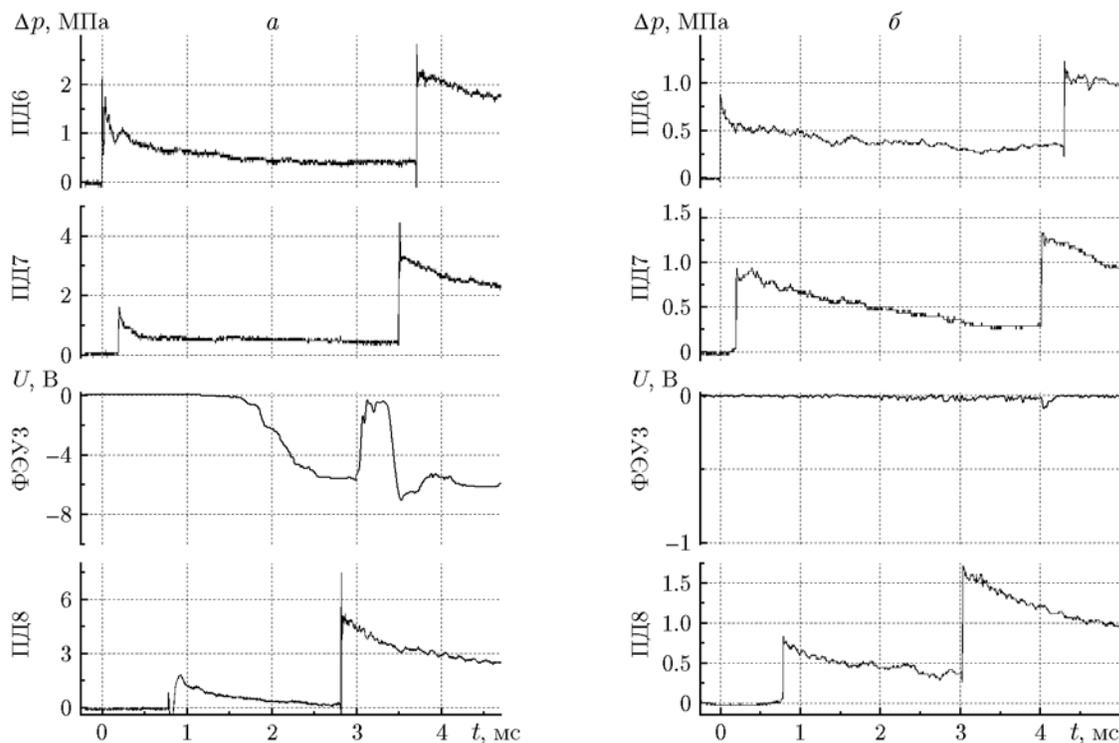


Рис. 8. Осциллограммы давления и свечения во взрывной и отраженной волнах,  $p_0 = 0.1$  МПа,  $p_{0i} = 0.36$  МПа ( $w_i \approx 27.6$  МДж/м<sup>2</sup>):  
 а — гибридная смесь O<sub>2</sub>/уголь,  $m \approx 7.2$  г,  $\rho \approx 275$  г/м<sup>3</sup>; б — воздух

1 100 м/с (см. рис. 7).

Таким образом, угольная пыль ослабляет ДВ в газовой стехиометрической смеси, при отражении волны возбуждается либо низкоскоростная, либо высокоскоростная детонация в зависимости от степени затухания падающей волны. Возможно, что при плотностях взвеси  $\rho > 500$  г/м<sup>3</sup> угольная взвесь ослабит волну настолько, что произойдет полное гашение ДВ.

### 3.4. Взрывные волны в смеси O<sub>2</sub>/уголь в рабочей секции, $p_0 = 0.1$ МПа

Гетерогенную смесь O<sub>2</sub>/уголь инициировали с помощью СИ газовой смесью C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> + 2.5O<sub>2</sub>. В объеме РС при атмосферном давлении кислорода для стехиометрии необходимо 12.77 г углерода, что соответствует массе угольной взвеси  $m \approx 16.3$  г ( $\rho \approx 726$  г/м<sup>3</sup>). Опыты проведены при  $\rho \approx 230 \div 698$  г/м<sup>3</sup>,  $p_{0i} = 0.25 \div 0.36$  МПа,  $w_i \approx 19.2 \div 27.6$  МДж/м<sup>2</sup>.

Значениям  $p_{0i} = 0.25 \div 0.36$  МПа соответствуют скорости взрывных волн  $D_{12} \approx 1\,200 \div 1\,500$ ,  $D_{24} \approx 1\,116 \div 1\,345$ ,  $D_{34} \approx 1\,084 \div 1\,247$ ,  $D_{45} \approx 1\,043 \div 1\,200$ ,  $D_{67} \approx$

$851 \div 1\,053$ ,  $D_{78} \approx 846 \div 976$  м/с. То есть взрывные волны в гетерогенной смеси O<sub>2</sub>/уголь являются затухающими.

В верхней половине трубы свечение noticeably усиливается через 1 ÷ 1.5 м от фронта взрывной волны, но затем прекращается через 4 ÷ 7 м. При этом время свечения уменьшается с ростом плотности взвеси. Угольная пыль воспламеняется за фронтом взрывной волны, и это пламя распространяется с возрастающим отставанием в 1 ÷ 2 м от ударного фронта взрывной волны. Горение угля при этом не увеличивает давление во взрывной волне.

По сигналам с ФЭУЗ и ПД8 можно установить, что светящиеся продукты реакции в нижней половине трубы ( $x \approx 5.5$  м) отстают от переднего ударного фронта на 1 ÷ 1.7 м (рис. 8, а). В отраженной волне начало свечения практически совпадает с ударным фронтом (сигналы ФЭУЗ и ПД7 на рис. 8, а), скорости отраженных волн  $D_{87} \approx 537 \div 913$ ,  $D_{76} \approx 663 \div 1\,136$  м/с.

Угольная взвесь даже при таких сильных параметрах инициирования ( $p_{0i} = 0.36$  МПа) очень слабо реагирует с кислородом за фрон-

том взрывной волны, детонация в гетерогенной смеси  $O_2$ /уголь не возбуждается.

В опытах, в которых угольная пыль отсутствует, а РС заполнена воздухом ( $p_0 = 0.1$  МПа,  $p_{0i} = 0.36$  МПа), скорости первичной (от СИ) взрывной волны  $D_{12} \approx 1224 \div 1333$ ,  $D_{24} \approx 1242 \div 1246$ ,  $D_{34} \approx 1091 \div 1200$ ,  $D_{45} \approx 1203 \div 1205$ ,  $D_{67} \approx 998 \div 1003$ ,  $D_{78} \approx 975 \div 986$  м/с. Пламя от взрывной волны из СИ не достигает оптической секции (рис. 8, б). Скорости отраженных ударных волн —  $D_{87} \approx 575 \div 581$ ,  $D_{76} \approx 697 \div 714$  м/с, примерно на 300 м/с ниже, чем в гетерогенной смеси  $O_2$ /уголь. В верхней половине трубы светящиеся продукты газовой детонации, вылетающие из СИ, движутся вблизи фронта взрывной волны, и их свечение длится в 2 ÷ 3 раза больше (около 12.5 мс), чем в гетерогенной смеси  $O_2$ /уголь.

В стехиометрической смеси  $O_2$ /С для случая, когда углерод находится в газовой и конденсированной фазах с возрастанием доли газовой фазы от нуля до стехиометрии, расчетная скорость детонации  $D_0 \approx 2050 \div 3780$  м/с [27]. Соответствующая этой фазовой доле углерода расчетная температура продуктов детонации  $T_0 \approx 4000 \div 8700$  К. Из наших экспериментов следует, что смесь  $O_2$ /уголь нельзя считать гомогенной и отождествлять углерод в угле с углеродом в газовой или конденсированной фазе (как в [27]). Параметры взрывной волны в гетерогенной смеси  $O_2$ /уголь и воздухе оказываются близкими. Скорость отраженной волны в гетерогенной смеси примерно на 300 м/с выше, чем в воздухе или кислороде (без угольной пыли). В отраженной волне наблюдается частичное сгорание наиболее мелких частиц угля и летучих, образовавшихся за фронтом падающей взрывной 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 в гибридных системах происходит воспламенение и горение частиц угля. Увеличение длины зоны реакции в газовых смесях способствует увеличению степени сгорания частиц угля и усилению волн сжатия.

3. В гибридных системах с химически активной газовой смесью могут распространяться стационарные детонационные волны, в гибридных системах с менее активной газовой смесью — затухающие взрывные волны, параметры которых зависят от энергии инициирования.

4. В гибридных исследованных системах горение угля конкурирует с горением метана, но метан химически активнее угля. На параметры волн горения и детонации определяющее влияние оказывает метан, а не углерод угля.

5. В гибридных системах параметры детонации и результирующее тепловыделение в зоне реакции возрастают незначительно по сравнению с газовыми смесями, температура в зоне реакции увеличивается не более чем на 15 %.

6. Угольная пыль ослабляет детонационную волну в газовой стехиометрической смеси, и по гибридной смеси распространяется низкоскоростная детонация. При отражении волны низкоскоростной детонации возбуждается либо низкоскоростная, либо высокоскоростная детонация в зависимости от степени ослабления волны.

7. Угольная взвесь за фронтом взрывной волны слабо реагирует с кислородом, детонация в гетерогенной смеси  $O_2$ /уголь не возбуждается. Параметры взрывной волны в гетерогенной смеси  $O_2$ /уголь и воздухе оказываются близкими, несмотря на воспламенение угольной взвеси. Скорость отраженной волны в гетерогенной смеси примерно на 300 м/с выше, чем в газе.

8. Доля сгоревшего угля в волнах горения, взрывных и детонационных волнах после прохождения по угольной взвеси дополнительно нескольких отраженных волн не превышает 20 ÷ 30 %. Сжигание мелкодисперсного угля в волнах горения, взрывных и детонационных волнах менее эффективно, чем более длительное по времени сжигание угля в котельных агрегатах и печах.

9. Моделирование взрывных и детонационных процессов в гибридных смесях необходимо выполнять с учетом динамики, теплообмена, воспламенения и горения отдельных частиц угля за ударным фронтом. Термодинамические расчеты параметров детонации гибридных газугольных систем в предположении, что углерод находится в газовой и конденсированной фазах, дают существенно завышенные по срав-

нению с экспериментом параметры детонации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Cybulski W.** Coal Dust Explosions and Their Suppression. — Warsaw, 1976.
2. **Лебецки К. А., Романченко С. Б.** Пылевая взрывоопасность горного производства. — М.: Горное дело, 2012. — (Сер. Библиотека горного инженера. Т. 6: Промышленная безопасность. Кн. 10). — ISBN 978-5-905450-23-5.
3. **Айруни А. Т., Клебанов Ф. С., Смирнов О. В.** Взрывоопасность угольных шахт. — М.: Горное дело, 2011. — (Сер. Библиотека горного инженера. Т. 9: Рудничная аэрология. Кн. 2). — ISBN 978-5-9950-0131-7.
4. **Палеев Д. Ю., Васенин И. М., Костеренко В. Н. и др.** Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. — М.: Горное дело, 2011. — (Сер. Библиотека горного инженера. Т. 6: Промышленная безопасность. Кн. 3). — ISBN 978-5-905450-24-2.
5. **Шольв Э. В., Виманн В.** Подавление взрывов в подземных выработках автоматическими заслонами системы BVS // Глюкауф-форшунгсхейте. — 1979. — № 1. — С. 38–46.
6. **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 пром-ти. — 2003. — № 8. — С. 22–26.
7. **Горлов Ю. В., Постников В. И.** Повышение эффективности локализации взрывов метановоздушной смеси и угольной пыли // Материалы междунар. конф. «Проблемы ускорения научно-технического прогресса в отраслях горного производства». — Люберцы, 2002. — С. 330–336.
8. **Азатян В. В.** Кинетические аспекты химических способов предотвращения и тушения пожаров // Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д. И. Менделеева. — 1985. — № 1. — С. 4–12.
9. **Азатян В. В.** Химическое управление цепным горением — перспективный метод предотвращения возгораний и взрывов метановоздушных смесей // Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — 2016. — № 2. — С. 40–44.
10. **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, N 3. — P. 267–275. — DOI: 10.1007/s00193-014-0543-2.
11. **Пинаев А. В., Васильев А. А., Пинаев П. А.** О критических параметрах пылевой завесы, обеспечивающих полное гашение волны газовой детонации // Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — 2016. — № 2. — С. 113–120.
12. **Wolinski M., Wolanski P.** Gaseous detonation processes in presence of inert particles // Arch. Combust. — 1987. — V. 7, N 3/4. — P. 353–370.
13. **Bouchet R., Laffite P.** L'extinction des ondes par les substances pulvérisées // C. R. Acad. Sci. — 1958. — V. 246. — P. 1858–1861.
14. **Laffite P., Bouchet R.** Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders // 7th Symp. (Int.) on Combustion, Butterworth, London. — 1958. — P. 504–508.
15. **Kauffmann C. W., Wolanski P., Arisoy A., et al.** Dust, hybrid and dusty detonation // AIAA Progr. Astronaut. and Aeronaut. — 1984. — V. 94. — P. 221–239.
16. **Wolanski P., Liu J. C., Kauffmann C. W., et al.** The effects of inert particles on methane-air detonations // Archiv. Combust. — 1988. — V. 8, N 1. — P. 15–32.
17. **Chen Z., Fan B., Jiang X.** Suppression effects of powder suppressant on the explosions of oxyhydrogen gas // J. Loss Prev. Process Ind. — 2006. — V. 19. — P. 648–655.
18. **Dong J., Fan B., Xie B., Ye J.** Experimental investigation and numerical validation of explosion suppression by inert particles in large-scale duct // Proc. Combust. Inst. — 2005. — V. 30. — P. 2361–2368.
19. **Федоров А. В., Фомин П. А., Фомин В. М., Тропин Д. А., Чен Дж.-Р.** Физико-математическое моделирование подавления детонации облаками мелких частиц. — Новосибирск: ИГАСУ (Сибстрин), 2011. — ISBN 978-5-7795-0517-8.
20. **Васильев А. А., Васильев В. А., Пинаев А. В., Троцюк А. В., Фомин П. А.** Газодинамические параметры горения и детонации смесей метан — воздух — угольная пыль // XIV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену, 10–13 сентября 2012, Минск, Беларусь: тр. форума. — Т. 2, ч. 2. — С. 422–425.
21. **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 // Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — 2015. — № 4. — С. 12–21.
22. **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 // Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — 2016. — № 2. — С. 91–105.
23. **Васильев А. А., Пинаев А. В., Трубицын А. А., Грачев 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.
24. **Пинаев А. В.** Измерение давления за фронтом волны детонации в гетерогенной системе газ-

- пленка // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 1. — С. 105–111.
25. **Лямин Г. А., Пинаев А. В., Лебедев А. С.** Пьезоэлектрики для измерения импульсных и статических давлений // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 3. — С. 94–103.
26. **Пинаев А. В., Лямин Г. А.** Пьезоэлектрические датчики давления, методы их тарировки // ПТЭ. — 1992. — № 2. — С. 236–239.
27. **Васильев А. А., Васильев В. А.** Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли // Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — 2016. — № 2. — С. 8–39.
28. **Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е.** Структура фронта детонации в газах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1963.

*Поступила в редакцию 18.12.2019.*

*После доработки 21.02.2020.*

*Принята к публикации 01.06.2020.*

---