Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Пинаев Павел Александрович

ВЗРЫВ, ДЕТОНАЦИЯ, ПЛАМЯ В ГАЗОВЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЯХ С ВЗВЕСЯМИ СУЛЬФИДНЫХ, ИНЕРТНЫХ ИЛИ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Научный руководитель:
доктор физико–математических наук, доцент
Пинаев Александр Владимирович

Новосибирск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. МЕТОДИКА ПОСТАНОВКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 16

1.1 Описание экспериментальной установки 16

1.2 Исследование образцов сульфидных руд 21

1.3 Подготовка и исследование каменного угля 24

ГЛАВА 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН ВО ВЗВЕСЯХ СУЛЬФИДНЫХ РУД И В ИНЕРТНОЙ ПЫЛЕВОЙ ЗАВЕСЕ 26

2.1 Взрывчатость аэровзвесей сульфидных руд при динамическом нагреве, параметры и структура ударных волн в аэровзвесях сульфидных руд 26

2.2 О критических параметрах пылевой завесы, обеспечивающей гашение волны газовой детонации 36

Основные выводы и результаты по второй главе 49

ГЛАВА 3. СТРУКТУРА УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ГАЗОВЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЯХ, СОДЕРЖАЩИХ МЕТАН, ВОДОРОД И УГОЛЬНУЮ ПЫЛЬ 51

3.1 Взрыв, детонация, горение в газовых смесях CH_4/O_2, CH_4/воздух и гибридных смесях CH_4/O_2/уголь, CH_4/воздух/уголь, O_2/уголь 51

3.2 Детонационные волны в газовых смесях $CH_4/H_2/O_2$ и в трёхтопливных смесях $CH_4/H_2/O_2$/взвесь угля 63

3.3 Структура ударных и детонационных волн в газовых смесях CH_4/H_2/воздух и трёхтопливных смесях CH_4/H_2/воздух/взвесь угля 69

Основные выводы и результаты по третьей главе 83

ГЛАВА 4. ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗАКРЫТОМ КАНАЛЕ В СМЕСЯХ CH_4/ВОЗДУХ, CH_4/ВОЗДУХ/ВЗВЕСЬ УГЛЯ 86

4.1 Волны горения, движущиеся сверху вниз в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/взвесь угля в вертикальной закрытой трубе 86

4.2 Исследование распространения пламени в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/уголь в закрытом вертикальном канале 97

4.3 Исследование влияния добавок угольной взвеси на продольные колебания волн горения и НКПР пламени в метановоздушных смесях 106

4.4 Волны горения, движущиеся против направления силы тяжести в вертикальном закрытом канале в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/уголь 115

Основные выводы и результаты по четвертой главе 123

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 126

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 128

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В работе исследованы дефлаграционные, взрывные и детонационные волны, распространяющиеся по газовым смесям или взвесям пылевых частиц в газах. Если такие волны реакции возникают при транспортировке горючих смесей и добыче полезных ископаемых, то они приводят к пожарам, выделениям токсичных веществ, разрушениям конструкций и человеческим жертвам. Управление процессами воспламенения, горения и детонации горючих гомогенных и гетерогенных смесей актуально для уменьшения или предотвращения катастроф. В качестве одного из средств управления этими процессами в работе рассмотрено применение пылевых завес из химически инертных частиц. Волны реакции исследованы в условиях, близких к условиям подземной добычи сульфида железа и каменного угля. Это актуально для обеспечения безопасности и снижения техногенных аварий (только за последние 20 лет произошли аварии на шахтах Распадская, Зыряновская, Тайжина, Юбилейная и др.), а также для разработки и верификации численных моделей горения и детонации в газовых, гетерогенных и газоугольных средах.

При добыче сульфида железа (чаще пирита FeS_2) образуются мелкие частицы пыли, оседающие на всех поверхностях. Вблизи мест подрыва взрывчатого вещества (ВВ) по штреку распространяется взрывная волна, формирующая облако сульфидной пыли. Эта аэровзвесь может воспламениться от теплового и механического действия потока воздуха за фронтом ударной волны (УВ) и разлетающихся высокотемпературных (2000–3000°C) продуктов взрыва ВВ. Взрывы сульфидной пыли сопровождаются повышением давления, ярким пламенем и образованием чрезвычайно опасного для здоровья сернистого газа SO_2 (предельно допустимая концентрация SO_2 в воздухе $3{,}8\cdot10^{-4}$ % об.). Исследование окисления сульфидных руд обычно осуществляют при квазистационарном нагреве. Распространение УВ и взрывных волн в аэровзвесях сульфидных руд практически не исследовано. В работе выполнены эксперименты для выяснения условий и степени окисления пирита при сравнительно кратковременном ударноволновом воздействии на частицы, а также возможности воспламенения и возбуждения детонации за ударными и взрывными волнами в аэровзвесях частиц различных сульфидных руд.

Завесы из частиц инертной пыли использованы для ослабления волн горения, ударных и детонационных волн (ДВ) с целью обеспечения безопасности. Механизм затухания детонации заключается в потере кинетической и тепловой энергии из газового потока в твёрдые частицы в зоне реакции. С увеличением длины зоны реакции, гасящие свойства пылевой завесы усиливаются. Наиболее эффективно увеличивать длину зоны реакции можно, уменьшая

начальное давление p_0 газовой смеси. В литературе наблюдается дефицит достоверных данных о параметрах пылевой завесы, при которых происходит подавление ДВ. В работе исследовано затухание ДВ в запылённой газовой смеси при различных значениях p_0 и определены критические параметры пылевой завесы, обеспечивающие срыв и последующее подавление волны детонации. Под срывом детонации подразумевается расщепление фронта детонации на замороженную по химическим реакциям УВ и отстающую от неё зону реакции. Последующее подавление ДВ предполагает разрушение замороженной УВ и гашение пламени.

Первичные волны сжатия в шахтах обычно возникают при воспламенении и взрывах смесей угольного газа (преимущественно метана с примесью водорода и др. газов) с воздухом вблизи мест случайного выброса угольного газа. Такая взрывная волна может сорвать угольную пыль со стенок канала, сформировать облако угольной пыли и воспламенить его. Нижний концентрационный предел взрываемости угольной пыли в воздухе $\rho_s \approx 30–80$ г/м^3[29]. Большинство аварий в угольных шахтах происходит из-за возникновения волн горения. При переходе горения в детонацию развивается наиболее катастрофичный и разрушительный процесс, требующий экспериментальных исследований. Для создания теоретических моделей и управления процессами горения, взрыва и детонации в гетерогенных смесях угольный газ/воздух/угольная взвесь необходимо определить сравнительный энергетический вклад метана и угольной взвеси в волнах детонации и горения [30]; исследовать влияние добавок водорода на воспламенение двух– и трёхтопливных смесей метан/водород/воздух и метан/водород/воздух/уголь; исследовать отражение взрывных волн от стенок канала; оценить нижние концентрационные пределы распространения (НКПР) пламени и исследовать устойчивость волн горения в зависимости от ориентации скорости пламени относительно вектора силы тяжести. Все эти данные необходимы также для разработки мер по обеспечению пожаро– и взврывобезопасности в шахтах при подземной добыче угля.

Степень разработанности темы исследования.

Сульфидная пыль с размерами частиц $l_s > 250$ мкм невзрывоопасна, но при $l_s \sim 1–10$ мкм возрастает вероятность её взрыва из-за увеличения площади поверхности. Нижний и верхний концентрационные пределы взрываемости аэровзвесей мелкой сульфидной пыли ~ 80 и 1800 г/м^3 соответственно, температура воспламенения ≈ 700–730K. Степень реагирования и самовозгорания сульфидных руд обычно определяют при медленном их нагревании [11–13]. Взрывчатость и степень окисления сульфидных руд при кратковременном динамическом нагреве изучена гораздо слабее, чем при квазистационарном нагреве Исследованию ударноволнового воздействия на взвеси сульфидных руд посвящена настоящая работа [14–16].

В [17–22] экспериментально и теоретически изучались процессы затухания газовой детонации в инертных запылённых средах. В [22] приведён анализ литературы и изложены

математические модели подавления детонации газовых смесей облаками мелких частиц. В настоящей работе и в [3–5] исследовано затухание ДВ в запылённой газовой смеси при различных значениях p_0, определены критические параметры пылевой завесы, обеспечивающие последовательно затухание, срыв и подавление детонации.

Воспламенение частиц угля исследуют при квазистационарном нагреве в закрытых сосудах (бомбах) небольшого объёма [23, 24]. В экспериментах, при условиях, близких к натурным, длинный участок канала диаметром 1–3 м покрывали слоем угольной пыли, а в короткий участок добавляли метан для образования стехиометрической метановоздушной смеси [10, 25, 26]. При подрыве газовой смеси в коротком канале возникала околозвуковая взрывная волна. В длинном канале исследовали эффективность средств ослабления [10, 25–28] этой взрывной волны и связующего инертного раствора, закрепляющего угольную пыль. Подобные исследования не дают информации о пламёнах, сверхзвуковых взрывных волнах и детонационных процессах в смесях метана и двухтопливных смесях метана с углем. В настоящей работе необходимые данные о распространении взрывных волн, детонации и волн горения в газовых и гетерогенных газоугольных смесях получены в экспериментах на ударных трубах. [29–34].

В России и за рубежом можно выделить коллективы, занимающиеся исследованиями горения или детонации в газовых или гетерогенных системах: Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, АО НЦ ВостНИИ (г. Кемерово), Национальный исследовательский Томский государственный университет, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Дальневосточный федеральный университет, Институт тепло– и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. Аналогичные исследования проводятся в Польше, Китае, США, Франции и др. странах.

Цель диссертационной работы:

Установить влияние физико–химических свойств (концентрации, дисперсности, химического состава) твёрдых частиц на параметры и закономерности распространения ударных и взрывных волн, волн детонации и горения в газовых и гетерогенных смесях, состоящих из газов (CH_4, H_2, Air, N_2, O_2) и взвесей инертных, сульфидных или угольных частиц.

Основные задачи исследования:

1. Определение изменения элементного и химического составов после прохождения ударных и взрывных волн по аэровзвесям сульфидных руд, а также параметров ударных и взрывных волн, при которых происходит воспламенение аэровзвесей сульфидных руд.

2. Экспериментальное определение условий срыва и полного затухания волн газовой детонации в инертных пылевых завесах при увеличении длины зоны реакции в волнах газовой детонации и уменьшении размера пылевых частиц δ.

3. Экспериментальное исследование взрывных и детонационных волн в смесях CH_4/O_2, CH_4/воздух, CH_4/O_2/уголь, CH_4/воздух/уголь, сравнение полученных данных с расчётами параметров детонации по термодинамической модели.

4. Изучение влияния добавок водорода в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/уголь на условия инициирования и параметры взрывных и детонационных волн, оценка сравнительного энергетического вклада метана и угольной взвеси в волнах детонации и горения.

5. Получение экспериментальных данных о зависимости НКПР пламени, скорости и устойчивости волн горения от направления их движения относительно вектора силы тяжести в газовых и газоугольных смесях.

Научная новизна:

1. Экспериментально показано, что детонация в аэровзвесях исследованных сульфидных руд с содержанием серы менее 32 % не возбуждается при действии взрывных волн с температурой $T \sim 4000$ K (открытый огонь) и УВ с температурой, превышающей T воспламенения сульфидов железа.

2. Экспериментально определены критические параметры пылевой завесы и параметры газовой смеси, при которых обеспечиваются срыв и полное гашение волны газовой детонации.

3. Экспериментально определен сравнительный энергетический вклад метана и угольной пыли в волнах детонации и горения; показано, что энерговыделение в основном определяется метаном, а не угольными частицами (сгорает не более 15–20 % угольной взвеси от стехиометрии).

4. Экспериментально исследованы взрывные и детонационные волны в газовых двухтопливных смесях $CH_4/H_2/O_2$ и гетерогенных трёхтопливных смесях $CH_4/H_2/O_2$/уголь, показано, что с увеличением доли водорода в смесях уменьшается их энергия инициирования.

5. В газовых и газоугольных смесях при инициировании сверху в закрытом вертикальном канале обнаружены и исследованы волны горения, распространяющиеся со знакопеременной скоростью.

6. Экспериментально обнаружено и исследовано влияние направления скорости волны горения относительно вектора силы тяжести и добавок угольной взвеси в смеси метан/воздух на развитие колебаний фронта пламени и на величину НКПР пламени.

Теоретическая значимость работы. Экспериментальные результаты исследования волн горения, взрывных и детонационных волн в реагирующих газовых и гетерогенных средах с

взвесями угольной пыли представляют значение для теории физики горения и взрыва. При изучении затухания волн газовой детонации в инертных пылевых завесах установлены параметры завесы, при которых происходят срыв и полное гашение детонационной волны. Результаты экспериментов могут быть использованы для разработки соответствующих теоретических моделей.

Данные по динамике распространения и профилям давлений волн горения и детонации в газовых и гетерогенных двухтопливных и трёхтопливных углесодержащих смесях необходимы для построения теоретических моделей явления и моделей химической и физической кинетики.

Обнаруженная неустойчивость фронта волн горения при движении пламени по направлению силы тяжести в виде колебаний пламени со знакопеременной скоростью, на порядок превышающей среднюю величину скорости пламени, представляет интерес для создания физических и теоретических моделей неустойчивости волн горения.

Экспериментальные результаты по исследованию зависимости параметров и НКПР пламени от направления скорости пламени относительно вектора силы тяжести полезны для построения теоретических моделей предела горения.

Практическая значимость работы. Результаты исследования волн горения и детонации в реагирующих газовых и гетерогенных средах с взвесями угольной пыли являются основой для разработки мероприятий по обеспечению безопасности работ в угольных шахтах.

Экспериментальные результаты исследования гашения детонационных волн в пылевых завесах применимы для обеспечения пожаровзрыво–безопасности в угольных шахтах.

В работе экспериментально установлено влияние добавок водорода в смесях метан/воздух, метан/воздух/угольная взвесь на инициирование и повышение взрывоопасности смесей. Поэтому при добыче угля необходимо контролировать содержание метана и водорода в выделяющемся угольном газе и добиваться снижения их содержания в шахте.

Экспериментально показано, что у пламен, движущихся снизу вверх, скорость распространения больше, а НКПР пламени меньше, чем для волн горения, движущихся горизонтально или сверху вниз. Это необходимо учитывать для снижения пожароопасности и поражающего действия пламени.

Методы исследований. Использование длинной (6,75 м) вертикальной ударной трубы, вакуумной техники для откачки ударной трубы; баллонов ёмкостью 40 л для составлений смесей газов. Изготовление и отладка генератора пыли, обеспечивающего равномерное поступление пыли в объём трубы. Применение электронного хронометра с погрешностью 0,1 мкс для измерения скоростей детонационных и взрывных волн. Изготовление и тарировка пьезодатчиков давления с дифференцирующими схемами и пьезодатчиков давления.

Использование галтовочной машины со стальными шариками диаметром 10–40 мм для измельчения угольных порошков; набора сит для получения порошков с определённой дисперсностью частиц.

Использование фотоэлектронных умножителей для измерения профилей и интенсивности свечения в волнах детонации и горения.

Регистрация сигналов с фотоумножителей и пьезодатчиков 4–лучевыми осциллографами Tektronix TDS2014.

Анализ снимков и спектра частиц сульфидных руд и угольных частиц на электронном сканирующем микроскопе MERLIN Compact, Zeiss и на рентгеновском дифрактометре D8–Advance (излучение CuKα) для определения элементного и химического состава порошков при ударноволновом и взрывном нагреве до и после опытов.

Оптическая съёмка волн горения цифровой монохромной камерой PHOTRON FASTCAM SA5, частота съёмки $F = 60 \div 1000$ кадр/с. Анализ кадров, построение графиков скорости волн по длине трубы.

Сравнение результатов эксперимента с расчётами по термодинамической модели.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальное доказательство слабой химической активности исследованных аэровзвесей сульфидных руд при динамическом нагреве в падающих и отражённых ударных волнах и результаты изменения элементного и химического состава сульфидных руд при динамическом нагреве.

2. Экспериментальные результаты затухания волн газовой детонации в пылевых инертных завесах при различных начальных давлениях и критические параметры пылевой завесы (среднеобъёмная плотность, размеры частиц и длина пылевого облака), обеспечивающие гашение волны детонации с длинной зоной реакции.

3. Параметры взрывных и детонационных волн в смесях CH_4/O_2, CH_4/воздух, CH_4/O_2/уголь, CH_4/воздух/уголь и сравнение полученных экспериментальных данных с термодинамическими расчётами параметров детонации.

4. Влияние добавок водорода в смесях CH_4/воздух/уголь на инициирование, параметры детонационных волн и сравнительный энергетический вклад метана и угольной взвеси в волнах детонации и горения, доказывающий преобладающую роль метана.

5. Неустойчивость волн горения, распространяющихся в вертикальном закрытом канале сверху вниз со знакопеременной скоростью, и экспериментальные результаты по определению зависимости НКПР пламени, величины скорости и устойчивости волн горения от направления скорости пламени относительно вектора силы тяжести.

Степень достоверности результатов обоснована:

Проведением большого количества опытов и полученной в них информации с фотоумножителей, пьезодатчиков, снимков с оптической цифровой камеры. Воспроизводимостью результатов в серии экспериментов с одинаковыми начальными условиями. Приготовлением фракций исследуемых порошков с помощью набора сит. Созданием в экспериментальной установке взвеси частиц с объёмной концентрацией, близкой к равномерной. Использованием современного оборудования и приборов – электронного сканирующего микроскопа, рентгеновского дифрактометра для определения элементного и химического состава частиц порошков до и после опытов. Использованием манометров с высоким классом точности при составлении газовых смесей и для контроля давления в трубе при вакуумировании и заполнении трубы исследуемыми смесями. Сопоставлением экспериментальных результатов с расчётной скоростью детонации Чепмена–Жуге для контрольных смесей.

Связь с программами и грантами

Диссертационная работа выполнена в рамках:

1. Госзаданий (исполнитель):

– Проект III.22.2.1., рег. номер АААА–А17–117021650060–7, «Детонационные и газодинамические процессы в гомогенных и гетерогенных средах как основа новых знаний и технологий», 2017–2020 гг.

– Проект 2.3.1.2.4., рег. номер 121121600293–2, «Неклассические процессы горения и детонации как основа новых фундаментальных знаний и технологий (2.3.1.2.4.)», 2021–2025 гг.

– Проект FWGG–2026–0002., рег. номер 126021717541–1, «Околокритические режимы горения и детонации: фундаментальные аспекты и новые приложения», 2026–2030 гг.

2. Договора № 316/3–141 на выполнение НИР «Оценка склонности руд и вмещающих пород к самовозгоранию и взрывчатости при условиях работы на глубинах более 1500 м», 2017 г., исполнитель.

3. Договоров в рамках Соглашения № 21–71–10034 от «27» июля 2021 г. о предоставлении гранта РНФ «Фундаментальные и прикладные исследования процессов распространения горения и взрыва в газовзвеси угольной пыли», исполнитель:

– №8479 от 14.10.2021 г. «Скорость распространения пламени в газовзвеси метан – угольная пыль»;

– №14058 от 31.10.2022 г. «Экспериментальное исследование особенностей распространения пламени в газовзвесях угольной пыли в канале с препятствиями»;

– №12235 от 23.10.2023 г. на выполнение НИР «Экспериментальное исследование ламинарного пламени углеметановоздушной смеси».

4. Грантов КНП (Крупный научный проект), исполнитель:

– Соглашение от 29.09.2020 № 075–15– 2020–806, рег. номер АААА–А20–120111690059–1 "Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий" (2020–2022 гг.);

– Соглашение от 24.04.2024 № 075–15–2024–543, рег. номер 124050300002–3 «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации в перспективных технологиях энергетики и двигателестроения» (2024–2026 гг.).

Личный вклад автора. Совместно с научным руководителем соискателем проведены постановки задач, экспериментов и выполнены эксперименты. Соискателем выполнены обработка и анализ экспериментальных результатов; постановка и обработка съёмок с помощью цифровой оптической камеры; проверка соответствия экспериментального оборудования поставленной задаче; сопоставление результатов эксперимента с данными, определенными по расчетной модели; разработка и сборка отдельных узлов экспериментальной установки.

Работы по теме диссертации [3, 4, 14, 57] опубликованы с соавторами Васильевым А.А., Моисеевой К.М., Крайновым А.Ю., Прууэлом Э.Р., Еременко А.А., Шапошником Ю.Н. В этих работах соискателем совместно с научным руководителем выполнены эксперименты, обработка и анализ результатов экспериментов проведены соискателем. На защиту вынесены результаты, полученные автором диссертации.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на следующих семинарах и научных конференциях:

24–th ICDERS Conference (ICDERS2013). July 28 – August 2, 2013, Taiwan.

Tenth International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (X ISHPMIE), Bergen, Norway, 10–14 June 2014.

Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых учёных «XXXV Сибирский теплофизический семинар», посвящённый 75–летию д.т.н., профессора В. И. Терехова, 27–29 августа 2019 г., Новосибирск.

XI Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» 9–12 ноября 2021 г., Новосибирск.

Всероссийская конференция «XXXIX Сибирский теплофизический семинар», посвящённый 90–летию академика А. К. Реброва. 28–31 августа 2023 г., Новосибирск.

Всероссийская конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения», приуроченная к 90–летию со дня рождения академика РАН Владимира Михайловича Титова, 18–21 сентября 2023 г., Новосибирск.

Горение топлива, теория, эксперимент, приложения: XII Всероссийская конференция с международным участием, Новосибирск, 11–14 ноября 2024 г., Новосибирск.

X Всероссийская конференция «Лаврентьевские чтения по математике механике и физике», посвященная 125–летию со дня рождения академика Михаила Алексеевича Лаврентьева. 25–29 августа 2025 г., Новосибирск.

Публикации. По материалам диссертации автором опубликовано 9 печатных работ в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, из них 6 – в журналах из перечня ВАК, 3 – в журналах Scopus и Web of Science. Всего по теме диссертации автором опубликовано 18 печатных работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников из 75 наименований, общий объем диссертационной работы составляет 138 страниц, включая 84 рисунка и 7 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень её разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, связь с программами и грантами, методология исследования, приведены положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов и приведена апробация результатов.

Глава 1 посвящена описанию методики постановки экспериментальных исследований.

Глава 2 посвящена исследованию ударных и детонационных волн во взвесях сульфидных руд и в инертной пылевой завесе.

В разделе 2.1 исследованы четыре образца природных сульфидных руд, определён атомарный состав руд и массовый процентный состав химических соединений. Установлено, что воспламенение и горение аэровзвесей частиц руд происходит благодаря пирротину Fe_7S_8. Проанализирована реакционная способность образцов руд при квазистационарном нагреве от 20 до 1000 °C. В вертикальной ударной трубе изучена взрывчатость аэровзвесей сульфидных руд в ударных и взрывных волнах, параметры и структура ударных волн.

В разделе 2.2 изучено затухание волн газовой детонации в пылевых завесах из химически инертных частиц кварцевого песка δ = 250÷600, 120÷250 и 90÷120 мкм и объёмной концентрацией $\rho_s \approx 2{,}2 \div 3{,}5$ г/л. Исследованы закономерности формирования пылевой завесы по длине ударной трубы. Установлено, каким образом происходит затухание волн газовой детонации с уменьшением начального давления, уменьшением размера частиц и возрастанием концентрации пыли. Определены критические параметры пылевой завесы (среднеобъёмная плотность, длина пылевого облака и размеры частиц), обеспечивающие срыв и гашение волны детонации. Обнаружен немонотонный характер уменьшения скорости детонационной волны в

пылевой завесе, когда в процессе затухания волны детонации за её передним фронтом возникает вторичная детонация, и ДВ временно усиливается.

Глава 3 посвящена исследованию структуры ударных и детонационных волн в газовых и гетерогенных смесях, содержащих метан, водород и угольную пыль.

В разделе 3.1 изучены взрыв, детонация и горение в газовых смесях CH_4/O_2, CH_4/воздух и в двухтопливных гетерогенных смесях (ДГС) CH_4/O_2/уголь, CH_4/воздух/уголь, O_2/уголь. Опыты проведены с порошком угля размером 0÷200 мкм. Снимки и элементный состав частиц угля и примесей получены на сканирующем электронном микроскопе. Химический состав кристаллических веществ частиц угля и примесей определяли на рентгеновском дифрактометре D8–Advance. В указанных выше смесях при различной энергии инициирования получены экспериментальные данные о параметрах и структуре волн горения и детонации, начиная с момента их возбуждения. Установлено, что в ДГС метан химически более активен, чем угольная взвесь. В ДГС с химически активной газовой смесью могут распространяться стационарные детонационные волны, с менее активной газовой смесью – затухающие взрывные волны, параметры которых зависят от энергии инициирования. Детонация в смеси O_2/уголь не возбуждается.

В разделе 3.2 исследованы детонационные волны в газовых смесях $CH_4/H_2/O_2$ и в слабо изученных трёхтопливных смесях $CH_4/H_2/O_2$/взвесь угля. Установлено влияние на параметры взрывных и детонационных волн метана, водорода и частиц угля. Проведено сравнение экспериментальных параметров детонации с соответствующими расчётными термодинамическими параметрами детонации Чепмена–Жуге. Исследованы отражённые волны, определены их параметры. Показано, что водород в смесях $CH_4/H_2/O_2$ уменьшает энергию инициирования, газовая смесь становится более взрывоопасной.

В разделе 3.3 исследована структура ударных и детонационных волн в газовых смесях CH_4/H_2/воздух и трёхтопливных смесях CH_4/H_2/воздух/взвесь угля. Установлен сравнительный вклад в энерговыделение горючих газов и угольных частиц. В частности, исследована роль водорода при инициировании и сгорании метановоздушных и гибридных смесей. Наряду с падающими волнами при различной энергии инициирования изучены отражённые волны сжатия. Из–за существенного недогорания угля в зоне реакции параметры детонации в газовзвесях возрастают незначительно по сравнению с газовыми смесями, на параметры ДВ определяющее влияние оказывают метан и водород, а не взвесь угля. При отражении затухающей взрывной волны из-за недогорания горючих компонентов смесей возбуждается либо низкоскоростная, либо высокоскоростная детонация, поэтому взрывные волны представляют такую же опасность, как и детонационные волны.

С увеличением доли водорода наиболее существенно уменьшается энергия инициирования и облегчается инициирование смесей CH_4/H_2/air и CH_4/H_2/air/уголь, что повышает опасность взрыва и детонации этих смесей. В зоне реакции ДВ сгорает примерно 1,2–9,7 % от взвешенного в трубе угля. Основная часть из перешедшего в газ угля (80–97 %) газифицируется и выделяет летучие при нагревании частиц угля в падающих детонационных, взрывных и отражённых волнах.

В главе 4 исследованы волны горения в вертикальном закрытом канале в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/взвесь угля. Рассмотрены случаи инициирования смесей сверху и снизу трубы (волны горения распространяются соответственно сверху – вниз и снизу – вверх).

В разделе 4.1 изучены волны горения, движущиеся сверху вниз в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/взвесь угля в вертикальной закрытой трубе. Определены частоты продольных колебаний пламени по сигналам свечения с фотоумножителей. В ДГС метан/воздух/уголь частота колебаний ниже, чем в газовых смесях из-за уменьшения скорости звука в газовзвесях по сравнению с газовыми смесями. В исследованных смесях измерены скорости пламён по длине трубы.

Горение угольных частиц повышает энерговыделение, но скорость волны горения при этом практически не изменяется. Осреднённая скорость пламени по длине трубы уменьшается от нескольких десятков метров в секунду до значений порядка 1 м/с. В газовых смесях и в ДГС с помощью видеокамеры обнаружено сложное возвратно–поступательное движение пламени со знакопеременной скоростью, обусловленное влиянием силы тяжести. Определены частоты таких колебаний, мгновенные и осреднённые скорости пламен.

В разделе 4.2 исследованы режимы и определены диапазоны концентраций, в которых находятся НКПР пламени в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/уголь в закрытом вертикальном канале. Состав смесей изменяли с шагом 0,5 % (об.) метана. Слабое инициирование смесей осуществляли искрой, более сильное – открытым внешним огнём. Установлено отсутствие волн горения в вертикальном канале в бедных метановоздушных смесях при об. концентрации метана α = 5,0; 5,5 %; в вертикальной трубе при инициировании сверху НКПР пламени метана $6 \geq \alpha^* > 5{,}5$ %.

С помощью оптической съёмки в ДГС с содержанием метана 6,0 % (об.) обнаружены два режима распространения пламени – с короткой и длинной областью свечения. Пламя с коротким свечением движется в среднем равномерно. Во втором режиме, при большей концентрации угольной взвеси, пламя совершает продольные колебания со знакопеременной скоростью и распространяется быстрее короткого пламени. Результаты указывают на влияние направления силы тяжести на зажигание и процесс горения смесей и низкий по сравнению с метаном (как и в волнах детонации) энергетический вклад угольных частиц.

Раздел 4.3 посвящён исследованию влияния добавок угольной взвеси на продольные колебания волн горения и НКПР пламени в метановоздушных смесях. Горение смесей инициировали сверху искрой или открытым огнём. Изучена возможность воспламенения газовых смесей αCH_4/воздух и ДГС αCH_4/воздух/уголь вблизи критического значения α^* (НКПР пламени метана). Приведена физическая модель распространения пламени со знакопеременной скоростью. Для сравнения результатов опыты проведены в длинной вертикальной трубе и в горизонтальной трубке.

В горизонтальной трубке ламинарное пламя распространяется в газовых смесях с $\alpha \geq$ 6,0 % (об.) и в газоугольных смесях с $\alpha \geq 5{,}5$ % (об.). Добавки угольной взвеси уменьшают НКПР пламени, усиливают яркость, но слабо влияют на скорость пламени. Осреднённые скорости ламинарного пламени в газовых смесях и в ДГС возрастают с увеличением объёмной доли метана. В горизонтальной трубке в газовых смесях наблюдаются слабые продольные колебания скорости фронта пламени.

В разделе 4.4 исследованы волны горения, движущиеся против направления силы тяжести в вертикальном закрытом канале в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/взвесь угля. Волны горения инициировали снизу трубы искрой или открытым огнём. Волны горения не возбуждаются в смесях 5,5 %CH_4/воздух при их инициировании снизу, но возбуждаются в ДГС 5,5 %CH_4/воздух/уголь. В ДГС 5,5 %CH_4/воздух/уголь волна горения с ярким свечением распространялась по всей длине трубы, – горит не только метан, но и часть угля. Поверхность фронта пламени неровная, неплоская, волна горения (ВГ) устойчива и распространяется без продольных колебаний вдоль трубы. В газовых смесях и в ДГС при $\alpha = 6{,}0$ % волны горения распространялись по всей длине трубы. Скорости волн, движущихся вверх больше, чем скорости волн, движущихся вниз. При движении пламени снизу вверх НКПР пламени метана для ДГС: $5{,}0 < \alpha^{*}\uparrow \leq 5{,}5$ % (об.), и $\alpha^{*}\uparrow < \alpha^{*}\downarrow$ ($\alpha^{*}\downarrow$ и $\alpha^{*}\uparrow$ – значения НКПР пламени метана, распространяющегося соответственно вниз и вверх).

В ДГС 9,5 %CH_4/воздух/уголь из-за горения частиц угля интенсивность свечения приблизительно на порядок выше, чем в стехиометрической газовой смеси 9,5 %CH_4/воздух. Но величина скорости пламени в ДГС почти по всей длине трубы меньше, чем в газовой смеси, потому что основная часть угольной пыли проявляет себя как инертная пылевая завеса.

ГЛАВА 1. МЕТОДИКА ПОСТАНОВКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Описание экспериментальной установки

Опыты проводили в закрытой сверху и снизу вертикальной ударной трубе длиной $L = 6{,}75$ м, диаметром $d = 70$ мм, ($L/d \approx 96$ такой величины обычно достаточно для выхода на режим нормальной детонации). Взрывные и детонационные волны возбуждали в секциях инициирования (СИ), которые отделены от рабочей секции лавсановыми диафрагмами. Длина СИ 0,9 м и диаметр 50 мм. Трубу и СИ перед опытом откачивали форвакуумным насосом. На рисунке 1.1.1 представлена общая схема экспериментальной установки и расположение отдельных узлов, элементов и датчиков.

СИ заполняли стехиометрической смесью $C_2H_2+2{,}5O_2$ до начального давления $p_{0i} = 0{,}05 \div 0{,}5$ МПа и инициировали искровыми разрядами ($e_i \approx 1$ Дж). При детонационном сгорании смеси в СИ выделялась энергия $q_i \approx 15 \div 150$ кДж (уд. энергия инициирования $w_i = 4q_i / \pi d^2 \approx 3{,}8 \div 38$ МДж/м^2), температура продуктов сгорания ~ 4000K. При тех же w_i в угольном штреке $d_C = 3$ м значения $Q_i = w_i \pi d_C^2 / 4 \approx 26{,}8$ и 268 МДж (такая энергия выделяется при детонации 6,3 и 63 кг тротила соответственно). Температура самовоспламенения и горения угля соответственно 400 и 470 °C.

При угледобыче наиболее активной и взрывоопасной считается стехиометрическая метановоздушная смесь, при н. у. размер ячейки которой $a_{st} \approx 0{,}3$ м. Приняв диаметр канала шахты $d_k \approx 5$ м, получим $d_k/a_{st} \approx 17$. Для смеси $CH_4+2O_2+N_2$ при н. у. расчётная скорость детонации Чепмена–Жуге $D_{CJ} = 2225$ м/с, $\pi = p_{CJ}/p_0 = 25{,}5$, $a \approx 4$ мм [37]. Для нашей экспериментальной установки параметр $d/a \approx 17{,}5$. Таким образом, $d/a \approx d_k/a_{st}$ и выполнено геометрическое подобие.

Газовые смеси чистого метана (99,99 %) с Air/O_2/H_2/ составляли по манометрам 0,4 класса точности в баллонах объёмом 40 л и выдержкой для лучшего перемешивания. Волны горения в метановоздушных смесях инициировали искровым разрядом или открытым огнём.

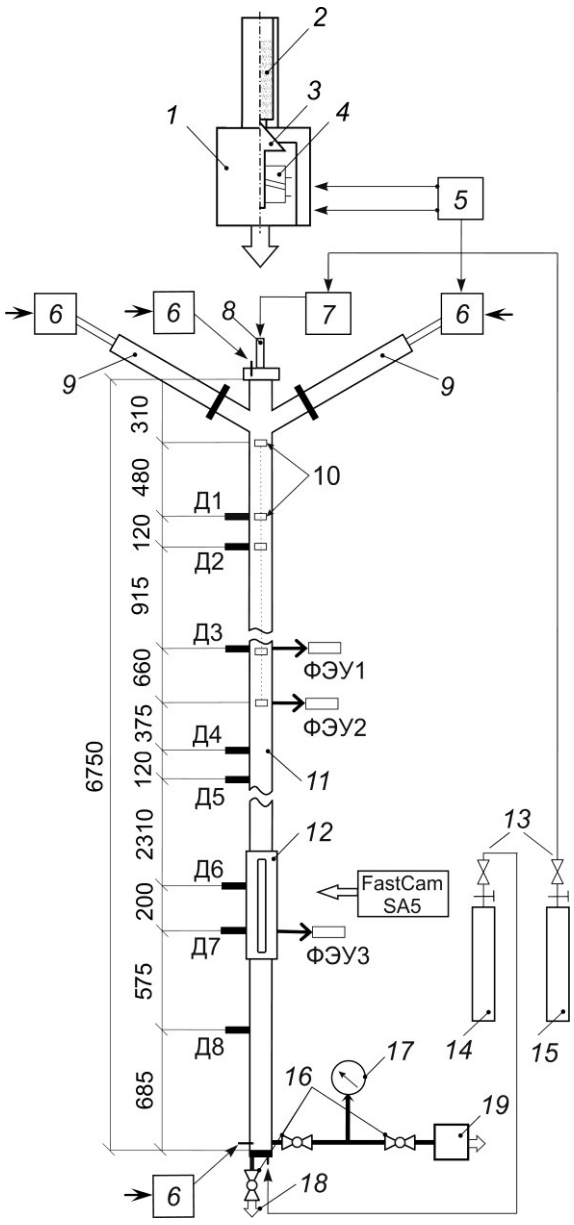


Рисунок 1.1.1 – Общая схема экспериментальной установки: 1 – корпус клапана пылевзвеси; 2 – контейнер для песка; 3 – запирающий конус; 4 – электромагнит; 5 – электронное реле времени; 6 – источник высокого напряжения; 7 – контейнер с рудой; 8 – генератор пыли (распылитель); 9 – секции инициирования; 10 – пьезодатчики (1÷5) хронометра; 11 – рабочая секция ударной трубы; 12 – оптическая секция; 13 – редукторы; 14 – баллон 40 л со стехиометрической метановоздушной смесью; 15 – баллон 40 л с воздухом или со стехиометрической смесью, или αCH_4/воздух; 16 – шаровые вентили; 17 – мановакуумметр; 18 – нижний клапан; 19 – форвакуумный насос; Д1÷Д9 – пьезодатчики; ФЭУ1÷ФЭУ3 – фотоумножители; FastCam SA5 – скоростная монохромная видеокамера

Профили давления и скорости волн сжатия по длине трубы регистрировали пьезодатчиками Д1÷Д9, конструкция и методы тарировки датчиков описаны в [35, 36]. Давление и свечение регистрировали тремя 4–лучевыми осциллографами Tektronix TDS2014. Сигналы с

пьезодатчиков предварительно поступали на истоковые повторители на полевых транзисторах с сопротивлением входа $R \approx 10^9$ Ом и блоком конденсаторов C_n. Величины постоянной времени пьезодатчиков $\tau = RC_{0n} \approx 1$ с, здесь $C_{0n} = C_n + C_c + C_{ps}$, где C_c и C_{ps} – ёмкости входного кабеля и датчика соответственно. Собственная частота пьезодатчиков 300 кГц, конструкция и методы тарировки датчиков описаны в [35, 36, 48]. Погрешности измерения давления не превышали 5 %, скорости волн – 2 %.

Съёмку свечения осуществляли скоростной монохромной видеокамерой PHOTRON FASTCAM SA5 через щель 10×290 мм оптической секции трубы. Частота съёмки $F = 250 \div 1000$ кадр/с, максимальное время выдержки $St \leq 1/F$, начало оптической щели – $x = 5{,}225$ м. По снимкам с видеокамеры были измерены скорости фронта волны горения с погрешностью менее 10 %.

Для создания ДГС газовые смеси равномерно подавали из баллона *15* через редуктор *13*, контейнер *7* и генератор пыли *8* в предварительно вакуумированную ударную трубу *11*. При заполнении трубы смесью возникает сложное вихревое течение газа, которое увлекает частицы угля и выравнивает их распределение по длине трубы (как и давление газа). Ниже приведены особенности методики для каждого раздела.

В разделе 2.1. исследуется взрывчатость сульфидных руд в ударных и детонационных волнах. Для формирования аэровзвеси руды, воздух равномерно подавали из баллона *15* через редуктор *13*, контейнер с порошком руды *7* и генератор пыли *8* сверху трубы, вытесняя воздух через нижний клапан *18*. После заполнения трубы аэровзвесью клапан закрывался, и газовую смесь в СИ инициировали искрой от высоковольтного источника *6*. Положение датчиков ФЭУ1 напротив Д2, установлен дополнительный пьезодатчик напротив ФЭУ2 (общее количество датчиков 9).

В разделе 2.2 исследуется гашение детонационных волн инертными частицами. Взрывные и детонационные волны возбуждали с помощью секций инициирования СИ *9*, отделяемых от рабочей секции (РС) *11* лавсановыми диафрагмами. По длине трубы устанавливали пьезодатчики *10* с микросхемами, формирующими синхроимпульсы в момент прихода возмущений давления с амплитудой большей 0,02 МПа. Синхроимпульсы использовали для измерения скорости фронта волны с помощью электронного хронометра, регистрирующего промежутки времени с погрешностью 0,1 мкс. В нижней половине трубы находились пьезодатчики Д4÷Д8 и световоды фотоумножителей для регистрации соответственно профилей давления и свечения (ФЭУ1 напротив Д3, ФЭУ2 ниже датчика Д8 на 55 мм).

Клапан пылевой взвеси *1* и электронное реле времени *5* служили для создания взвеси пыли и инициирования детонации в момент времени, когда столб пыли достигал нижнего торца трубы. Клапан *1* состоял из цилиндрического контейнера *2* с сыпучей пористой средой (песком), конуса

3, запирающего нижнее отверстие цилиндра, и электромагнита *4*. В момент запуска реле конус втягивался в электромагнит и открывал отверстие цилиндра. Пыль из контейнера, скатываясь с конуса, уже на расстоянии 0,3 м от генератора пыли равномерно распределялась по сечению трубы [5]. Момент запирания цилиндра задавался электронным реле *5* с помощью электромагнита и блока управления. Закономерности падения пыли изучали в работе [5].

В разделе 3.1. исследуются процессы детонации, взрыва и горения в газовых смесях (CH_4/O_2, CH_4/Air, O_2) и гибридных ДГС. Смеси подавали в предварительно вакуумированную ударную трубу *11*. Взрывные и детонационные волны возбуждали с помощью секций инициирования СИ *9*, отделяемых от рабочей секции РС *11* лавсановыми диафрагмами. Волны горения инициировали искровыми разрядами от высоковольтного источника *6* (в этом случае диафрагмы между секциями не устанавливали). Расположение регистрирующих датчиков согласно общей схеме экспериментальной установки, представленной на рисунке 1.1.1.

В разделе 3.2. и 3.3. исследуются детонационные волны в газовых смесях $CH_4/H_2/O_2$ и в трёхтопливных смесях $CH_4/H_2/O_2$/взвесь угля. В этих и следующих разделах, после опытов производили взвешивание оставшегося в контейнере угольного порошка, количества осевшей угольной пыли на нижнем фланце и на стенках трубы (взвешивая ветошь до и после протирки трубы). Эти измерения позволили установить концентрацию частиц пыли в опыте и долю сгоревшего угля. Расположение регистрирующих датчиков согласно общей схеме экспериментальной установки, представленной на рисунке 1.1.1.

В разделе 4.1. исследуются волны горения, движущиеся сверху вниз в смесях CH_4/Air и ДГС. Вместо СИ были установлены заглушки. Исследуемые смеси инициировали сверху электрической искрой от высоковольтного источника *6*. Для лучшего воспламенения бедной по метану смеси CH_4+13,286Air сверху добавляли 0,5–2 л стехиометрической смеси CH_4/Air. Расположение регистрирующих датчиков согласно общей схеме экспериментальной установки, представленной на рисунке 1.1.1.

В разделе 4.2. исследуются волны горения, движущиеся сверху вниз в смесях CH_4/Air и ДГС вблизи НКПР. Вместо СИ были установлены заглушки. Исследуемые смеси инициировали сверху электрической искрой от высоковольтного источника *6* или внешним открытым огнём. Расположение ФЭУ3 напротив Д6, остальные ФЭУ согласно общей схеме экспериментальной установки, представленной на рисунке 1.1.1.

В разделе 4.3. проводится сравнение процесса горения смесей CH_4/Air и ДГС в вертикальной ударной трубе и горизонтальной трубке. Кварцевую горизонтальную трубку длиной 90 см, внутренним диаметром 30,5 мм, толщиной стенки 2,5 мм перед опытом продували газовыми смесями в течение 3–5 с. Для создания ДГС смеси αCH_4/Air равномерно подавали в трубку через редуктор *13*, контейнер с угольным порошком *7* и распылитель *8*, расположенный

на правом конце трубки. Смеси поджигали внутри трубки у открытого левого конца раскалённой нихромовой спиралью. После опыта с газовзвесями стенки трубки очищали ветошью. Расположение регистрирующих датчиков согласно общей схеме экспериментальной установки, представленной на рисунке 1.1.1.

В разделе 4.4. исследуются волны горения, движущиеся снизу вверх, против направления силы тяжести в смесях CH_4/Air и ДГС. Смеси из баллона *15* через редуктор *13*, контейнер *7* и генератор пыли *8* подавали в предварительно вакуумированную ударную трубу *11*. Вместо СИ были установлены заглушки. Исследуемые смеси инициировали снизу электрической искрой от высоковольтного источника *6* или внешним открытым огнём от сгорания стехиометрической CH_4/Air смеси (0,5–2 л), которую добавляли снизу из баллона *13*. Расположение ФЭУ3 напротив Д6, остальные ФЭУ согласно общей схеме экспериментальной установки, представленной на рисунке 1.1.1.

1.2 Исследование образцов сульфидных руд

Исследованы четыре образца природных сульфидных руд с условными названиями богатая, медистая, вкраплённая и закладка (соответственно *SO*1÷*SO*4) с насыпной плотностью соответственно 1,43, 0,99, 1,40, 1,35 г/см^3. После помола порошки руд состояли преимущественно из рыхлых комочков с размерами $l_s \leq 100$ мкм, которые при лёгком прикосновении рассыпались на мелкие твёрдые частицы. Для *SO*1 $l_s \approx 1 \div 10$ мкм (средний размер $\overline{l_s} \approx 5$ мкм), для остальных руд $l_s \approx 0{,}5$–3 мкм ($\overline{l_s} \approx 1$ мкм). На рисунке 1.2.1 приведены снимки порошков руд, полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа MERLIN Compact, Zeiss.

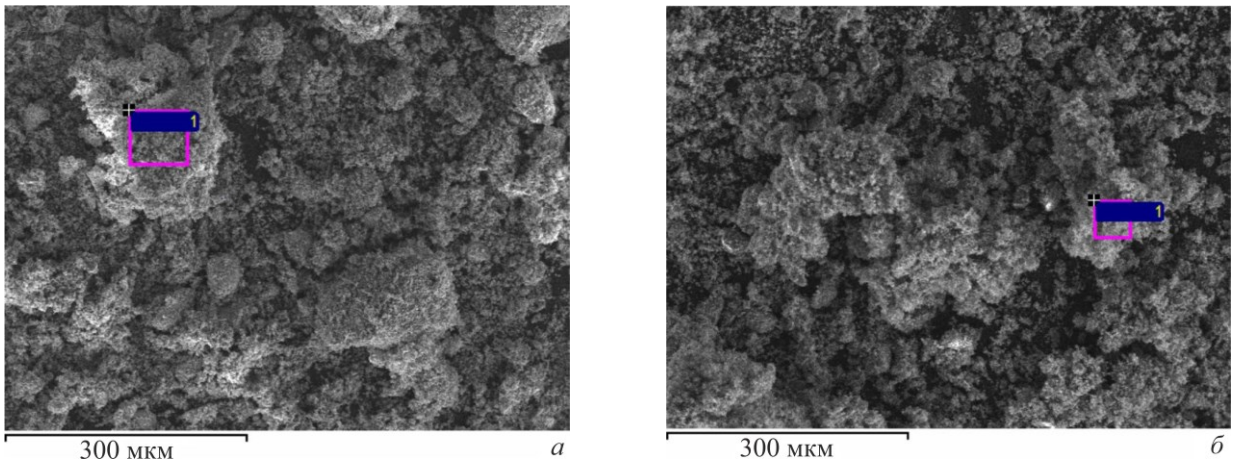


Рисунок 1.2.1 – Снимки порошков руд: *а* – *SO*1; *б* – *SO*2.
Обозначены участки измерения спектра

Атомарный состав порошков сульфидных руд получен при усреднении результатов измерений спектра на электронном микроскопе (см. таблицу 1.2.1 и 1.2.2). Руда *SO*1 содержит наибольшее количество S и Fe (35,4 и 30 % атомов соответственно), в остальных рудах атомов S и Fe приблизительно 3,5 и 2,5 % соответственно [14].

Таблица 1.2.1 Средний процент основных химических элементов в руде *SO*1 (богатой)

Хим. элемент	**Fe**	**S**	O	Cu	Si	Ni	Al
% атомный	30,00	35,39	26,60	2,29	3,18	0,97	0,97
% массовый	46,70	31,94	12,19	4,07	2,54	1,52	0,74

Таблица 1.2.2 Средний процент основных химических элементов в руде *SO*2 (медистой)

Хим. элемент	O	Si	**Fe**	**S**	Al	Cu	Na	K	Ni	Mg
% атомный	65,27	18,00	2,47	3,54	3,99	1,43	2,02	1,11	0,23	0,39
% массовый	48,07	23,21	6,33	5,22	4,95	4,17	2,13	1,99	0,62	0,44

Массовый процентный состав химических соединений в порошках сульфидных руд определён на рентгеновском дифрактометре D8–Advance (таблице 1.2.3 и 1.2.4). Этот прибор измеряет интенсивность и направление рентгеновских лучей, дифрагированных на кристаллах [14].

Таблица 1.2.3 Химические соединения в руде *SO*1

Название соединения	Хим. формула соединения	%, масс.
Pyrrhotite–3T	**Fe_7S_8**	**61,56**
Chalcopyrite	$CuFeS_2$	10,76
Pentlandite	$(FeNi)_9S_8$	10,50
Magnetite	Fe_3O_4	8,00
Quartz	SiO_2	7,22
Troilite	FeS	1,96

Таблица 1.2.4 Химические соединения в руде *SO*2

Название соединения	Хим. формула соединения	% масс.
Quartz	SiO_2	58,41
Albite	$NaAlSi_3O_8$	27,06
Chalcopyrite	$CuFeS_2$	10,09
Pyrrhotite–3T	**Fe_7S_8**	4,45

Воспламенение и горение взвесей обеспечивает в основном пирротин Fe_7S_8 (таблица 1.2.3, 1.2.4). В руде *SO*1 его содержится около 61,6 % масс. Результаты измерений для руд *SO*3, *SO*4 близки к данным таблице 1.2.4 и характеризуются низким содержанием пирротина (<5 % масс.).

Термогравиметрическое исследование окисления руд

Для исследования склонности руд к окислению при квазистационарном нагреве от 20 до 1000°C были проведены измерения по трём методикам: термогравиметрический анализ (TGA – изменение % масс. образца порошка руды); определение скорости изменения % масс. образца порошка руды (DTA); измерение выделяющегося из образца порошка руды тепла (DTG). Погрешность измерений не превышала 5 %. Сравнительный анализ показал, что медистая и вкраплённая руды слабо склонны к реакции во всей области измерений (рисунок 1.2.2), общее изменение их массы составляет несколько процентов и сопровождается небольшим тепловыделением. Данные измерений по руде *SO*4 не приведены, поскольку они близки к

результатам измерений для руды *SO*3. Богатая руда (*SO*1) наиболее химически активная из образцов руд, она заметно реагирует при температуре> 400 °C [14].

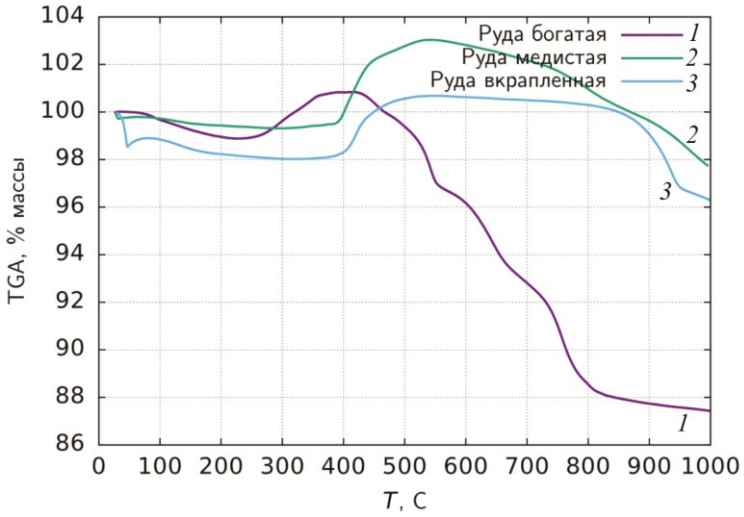


Рисунок 1.2.2 – Сравнительный анализ реакционной способности образцов руд *SO*1÷*SO*3 – изменение процента массы руды (TGA): *1* – руда богатая; *2* – руда медистая; *3* – руда вкраплённая

В диапазоне температур 25–50 °C даже для наиболее химически активной богатой руды не обнаружено изменение массы образцов руд – все отклонения находятся на уровне экспериментальных погрешностей [14]. При температурах до 400°C не ускоряется горение серы и не происходит саморазогрев породы. При нагреве от 450 до 1000 °C руда *SO*1 теряет около 12 % массы, руды *SO*2, *SO*3 – около 2–4 % массы. Для руды *SO*1 благодаря более высокому содержанию S и Fe общее энерговыделение существенно выше, чем для других образцов руд.

1.3 Подготовка и исследование каменного угля

Исходные куски каменного угля Кузбасса размером <1 см измельчали в течение 2 ч на галтовочной машине со стальными шариками диаметром 10–40 мм. Произведен отсев крупной фракции на ситах. Все опыты (кроме опытов из главы 2) проведены на порошке угля 0÷200 мкм, эта фракция склонна к конгломерации за счет связующей мелкой фракции. Массовое распределение частиц угля по фракциям, полученное «мокрым» способом с помощью набора сит с ячейками 40, 64, 94, 140 и 200 мкм, приведено на рисунке 1.3.1. Наибольшее по массе количество угля содержится в самой крупной фракции d = 140÷200 мкм (≈ 33,7 %) и в самой мелкой фракции d = 0÷40 мкм (≈ 26,6 %) [29].

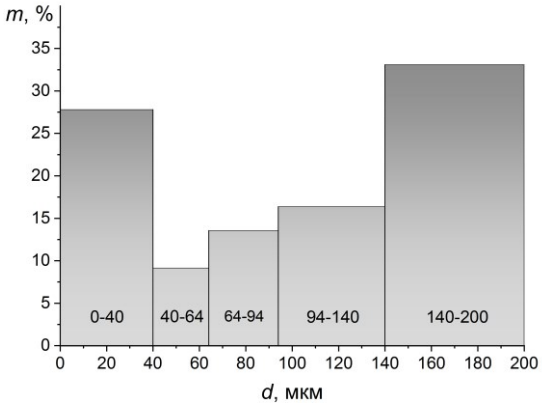


Рисунок 1.3.1 – Массовый состав по фракциям частиц угля размером 0÷200 мкм

Снимки с большим увеличением и элементный состав частиц каменного угля и примеси получены на сканирующем электронном микроскопе Merlin compact, Zeiss (рисунок 1.3.2 и таблицы 1.3.1 и 1.3.2) [29, 47].

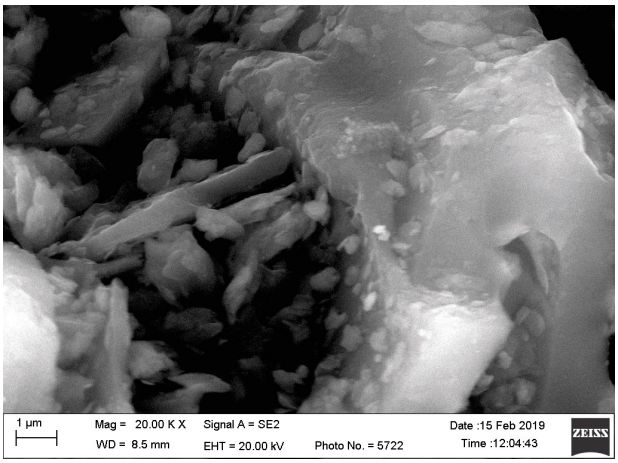


Рисунок 1.3.2 – Изображение частиц угля.

Фракция каменного угля 0 ÷ 200 мкм, увеличение 20000

Таблица 1.3.1 – Средний массовый и атомный процент хим. элементов на частицах угля [47]

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 1.3.2 – Средний массовый и атомный процент химических элементов на частицах примеси [47]

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 — C, O, Si, Al, примеси — C, O, Si, Al, Fe, Ca, Mg. В примеси доля C убывает, а доли O, Si, Al, Fe, Ca и Mg возрастают по сравнению с углем.

Частицы угля и примеси исследованы на рентгеновском дифрактометре D8–Advance (излучение CuKα). 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 ($SiO2$), а также близким между собой линиям каолинита $Al_4\ [Si_4O_{10}]\ (OH)_8$ 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 [47].

ГЛАВА 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН ВО ВЗВЕСЯХ СУЛЬФИДНЫХ РУД И В ИНЕРТНОЙ ПЫЛЕВОЙ ЗАВЕСЕ

2.1 Взрывчатость аэровзвесей сульфидных руд при динамическом нагреве, параметры и структура ударных волн в аэровзвесях сульфидных руд

Из аэровзвесей угольной, серной и сульфидной пылей наименее взрывоопасна сульфидная пыль. Сульфид железа в месторождениях встречается чаще в виде пирита FeS_2. Пыль с размерами частиц $l_s > 250$ мкм невзрывоопасна, но с уменьшением l_s до 1–10 мкм возрастает вероятность взрыва сульфидной пыли из-за увеличения общей площади её поверхности [5]. Нижний и верхний концентрационные пределы взрываемости сульфидной пыли из частиц 10–100 мкм составляют 80÷1800 г/м^3, температура воспламенения 430–460 °С (≈ 700–730 К). При окислении сульфида железа образуется ядовитый сернистый газ SO_2, его предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе $3{,}8\cdot10^{-4}$ % об. [2].

Среднеобъёмная плотность взвешенной сульфидной пыли в шахтах $\rho \le 1$ г/м^3. При добыче руды вблизи места подрыва ВВ в шпурах распространяется взрывная волна, за которой образуется взвесь сульфидной пыли. Эта пыль может воспламениться от теплового и механического действия потока воздуха за фронтом УВ и разлетающихся высокотемпературных (2000–3000°С) продуктов взрыва [1]. Взрывы пыли сопровождаются резким повышением давления, ярким пламенем и значительным выделением сернистого газа. Во взрывной волне реализуются два конкурирующих механизма: из-за потери импульса в пылевом облаке УВ ослабляется, а за счёт поверхностного горения частиц руды – усиливается.

Степень реагирования и самовозгорания сульфидных руд обычно определяют при медленном их нагревании или саморазогреве [11–13]. Взрывчатость сульфидных руд при динамическом нагреве изучена слабее, чем при квазистационарном нагревании. В разделе 2.1 представлены наши результаты [14–16], частично восполняющие этот пробел. В [14] определяли взрывчатость и изменение элементного и химического состава сульфидных руд при ударноволновом и взрывном нагреве. В [15, 16] изучены структура и параметры падающих и отражённых УВ в зависимости от среднеобъёмной плотности аэровзвесей сульфидных руд.

Динамическое инициирование аэровзвесей сульфидных руд, параметры и структура УВ

СИ откачивали и заполняли смесью C_2H_2+2,5O_2 до начального давления $p_{0i} = 0{,}2\div0{,}5$ МПа. Перед опытом рабочую секцию ударной трубы заполняли воздухом при начальном давлении

$p_0 = 0{,}1$ МПа (скорость звука c = 343 м/с). В результате в СИ в зависимости от p_{0i} создавалось давление $p_D \approx 6{,}5 \div 16{,}3$ МПа, происходил разрыв диафрагм, и в ударной трубе распространялась взрывная волна – головная УВ и движущиеся медленнее фронта УВ продукты газовой детонации с температурой около 4000 К. Концентрация взвеси руды зависела от перепада давления воздуха на редукторе и времени заполнения трубы (10–20 с), в опытах $\rho \approx 40 \div 920$ г/м^3.

Скорости D ударных волн в воздухе и в аэровзвесях руд, измеренные в секции *12* (общая схема установки, рисунок 1.1.1), в зависимости от давления p_{0i} приведены на рисунке 2.1.1. При фиксированной величине p_{0i} скорости падающих и отражённых УВ в аэровзвеси соответственно на 40–60 и на 20–25 м/с меньше, чем скорости ударных волн в воздухе. Скорости УВ определяли с погрешностью до 2 % на малых временных развёртках осциллографов.

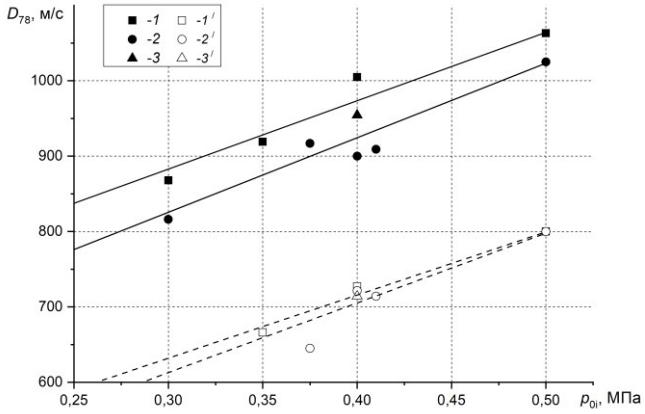


Рисунок 2.1.1 – Скорости падающих (*1÷3*) и отражённых (*1'÷3'*) ударных волн в воздухе и аэровзвесях ($\rho = 115 \div 916$ г/м^3) между Д7 и Д8 в зависимости от p_{0i}: *1*, *1'* – воздух; *2*, *2'* – аэровзвеси руды *SO*1; *3*, *3'* – аэровзвеси руды *SO*2

Профили сигналов на осциллограммах соответствуют номерам пьезодатчиков j и фотоумножителей. Скачки давления на фронте УВ $\Delta p_j = p_j - p_0$, где p_j – абсолютное давление. Погрешность измерения давления не превышала 5 %.

При распространении взрывной волны в воздухе (рисунок 2.1.2) продукты газовой детонации, вытекающие из СИ, отстают от фронта УВ на датчике Д2 на время $\Delta t_2 \approx 0{,}16$ мс, на датчике Д4 – на $\Delta t_4 \approx 0{,}9$ мс. Здесь при D_{12} = 1200 м/с расчётные величины скачка давления $\Delta p_{12} = p_{12} - p_0 \approx 1{,}31$ МПа и температуры за фронтом УВ $T_{12} \approx 953$ К. Скорости $D_{j\,j+1}$ измеряли на базе между датчиками Дj и Д(j+1).

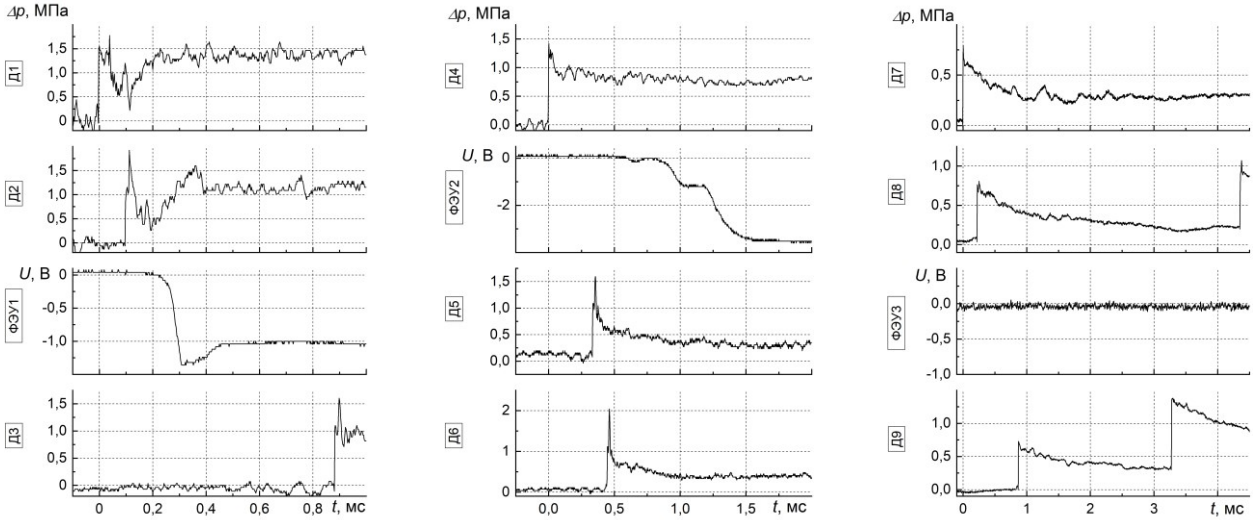


Рисунок 2.1.2 – Осциллограммы давления и свечения ударной волны в воздухе при p_{0i} = 0,3 МПа. Измеренные скорости: D_{12} = 1200 м/с, D_{23} = 1167 м/с, D_{45} = 1130 м/с, D_{56} = 1071 м/с, D_{78} = 920 м/с, D_{89} = 890 м/с (D_{98} = 537 м/с)

В опытах без угольной пыли в секции *12* при p_{0i} = 0,3 и 0,4 МПа пламя от продуктов газовой детонации не регистрируется, поскольку оно выше секции *12* встречается с отражённой ударной волной. При p_{0i} = 0,4 МПа $\Delta t_2 \approx$ 0,11–0,17 мс, $\Delta t_4 \approx$ 0,75–0,92 мс. При значении p_{0i} = 0,5 МПа $\Delta t_2 \approx$ 0,07 мс, $\Delta t_4 \approx$ 0,30 мс, D_{12} = 1390 м/с. Этой скорости соответствуют расчётные $\Delta p_{12} \approx$ 1,83 МПа, $T_{12} \approx$ 1173 К (900 °С). Величины Δt_j уменьшаются с ростом p_{0i} примерно по линейной зависимости от p_{0i} и $\Delta t_j < \Delta t_{j+1}$. При фиксированном давлении p_{0i} расстояния между фронтом УВ и пламенем $\lambda_j = D_j \Delta t_j$ зависят от координаты x вдоль трубы. В начале трубы пламя совпадает с фронтом УВ ($\Delta t_0 \approx 0$ мкс, $\lambda_0 \approx 0$), при движении взрывной волны вниз $\lambda_j(x)$ нелинейно возрастает.

В аэровзвесях несмотря на то, что температура за УВ превышала температуру воспламенения пирротина (≈660 °С), свечение руд *SO*1÷*SO*4 за ударным фронтом не зарегистрировано, ударные волны замедлялись. Во всех опытах происходило частичное окисление порошков руд, и появлялся сернистый газ. Взвеси наиболее химически активной руды *SO*1 не взрывались и при воздействии горячих (~4000 К) продуктов детонации газовой смеси из СИ. Свечение в пылевом облаке, связанное с интенсивными химическими реакциями, зарегистрировано лишь в отражённых УВ на ФЭУ3 при $M_{12} \geq 3{,}3$ (рисунок 2.1.3). Для опыта на рисунке 2.1.3 M_{12} = 3,37, расчётные значения $\Delta p_{12} \approx$ 1,22 МПа, $T_{12} \approx$ 904 К. Профили давлений в аэровзвесях и воздухе отличаются. Давление за фронтом падающих УВ в аэровзвесях руд при торможении потока газа о частицы в зависимости от величины ρ возрастает за 40÷700 мкс – примерно на 40÷270 % по сравнению с Δp_j, j = 7÷9.

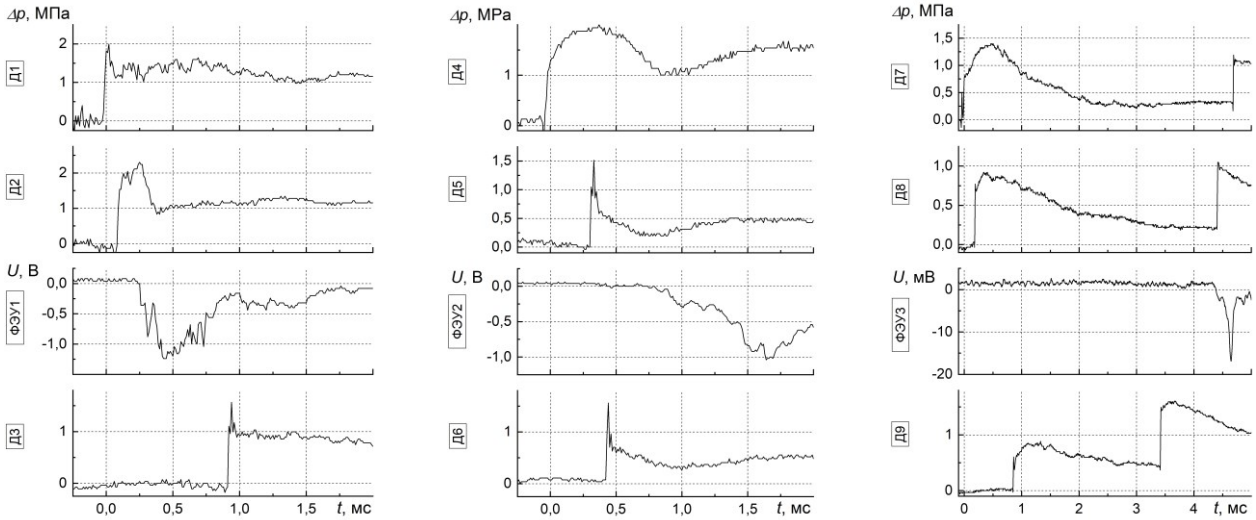


Рисунок 2.1.3 – Осциллограммы давления и свечения ударной волны в аэровзвеси руды *SO*1 при p_{0i} = 0,4 МПа и ρ = 916 г/м^3. Измеренные скорости D_{12} = 1156 м/с, D_{23} = 1109 м/с, D_{45} = 1109 м/с, D_{56} = 975 м/с, D_{78} = 862 м/с, D_{89} = 862 м/с (D_{98} = 581 м/с, D_{87} = 714 м/с, D_{65} = 923 м/с, D_{54}= 937 м/с, D_{32} = 863 м/с)

Для опыта в аэровзвеси, представленного на рисунке 2.1.4, экстраполяция скорости УВ (кривая *2*) даёт значение вблизи торца трубы D_{fin} = 882 м/с (M_{fin} ≈ 2,57). Этому числу Маха соответствуют расчётные параметры отражённой волны D_{ref} = 360 м/с, p_{ref} = 3,18 МПа, T_{ref} = 1036 K. Т. е. температура за отражённой ударной волной у нижнего торца примерно на 10 %, а давление в 2,6 раза выше, чем за падающей УВ вверху трубы. По этой причине увеличивается тепловыделение руды в отражённых ударных волнах и появляется свечение на нижнем участке трубы [14]. При одинаковых условиях инициирования скорость УВ в аэровзвеси руды меньше, чем в воздухе, и падающие ударные волны затухают (рисунок 2.1.4).

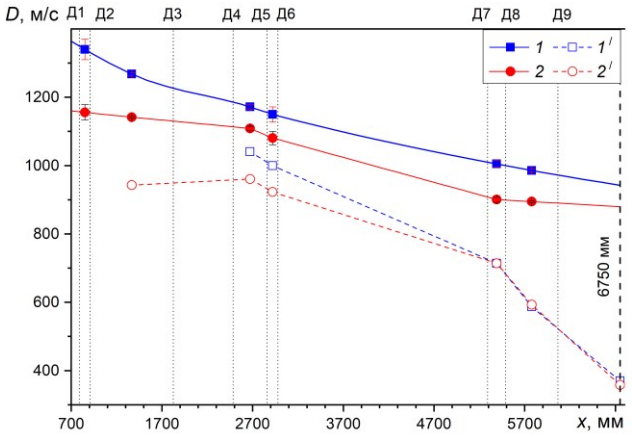


Рисунок 2.1.4 – Скорости падающих (*1*, *2*) и отражённых (*1'*, *2'*) ударных волн по длине трубы при p_{0i} = 0,4 МПа: *1*, *1'* – в воздухе; *2*, *2'* – аэровзвесь руды *SO*1 при ρ ≈ 573 г/м^3

При фиксированном давлении p_{0i} = 0,4 МПа с увеличением ρ пыли скорости УВ D_{78}, D_{89} убывают из-за торможения потока газа о частицы (рисунок 2.1.5). При $\rho \approx 650$ г/м^3 скорости минимальны – D_{78}, $D_{89} \approx 825$ м/с. С увеличением энерговыделения частиц руды при $\rho \approx 770$ г/м^3 скорости возрастают до 900–950 м/с. После чего из-за преобладания потерь D_{78} и D_{89} вновь убывают до 870 м/с при $\rho \approx 920$ г/м^3[30]. Похожая немонотонная зависимость $D(\rho)$ наблюдается и для отражённых ударных волн.

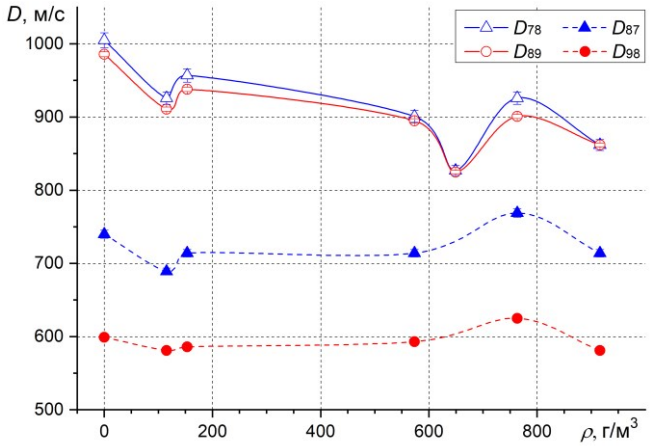


Рисунок 2.1.5 – Зависимость скорости ударных волн от плотности аэровзвеси руды *SO*1 при p_{0i} = 0,4 МПа. Падающие D_{78}, D_{89} и отражённые D_{98}, D_{87}

Результаты измерений скачков давления на переднем фронте УВ по длине трубы в аэровзвесях руд приведены для трёх опытов на рисунках 2.1.6÷2.1.8 со значениями $\rho \approx$ 763, 573, 115 г/м^3 соответственно. На рисунках 2.1.6÷2.1.8 пунктирные кривые – расчётные скачки давления на фронте УВ в воздухе для экспериментальной скорости $D(x)$. Обращает на себя внимание существенное отличие измеренной величины давления на некоторых датчиках от расчётных значений давления на пунктирной кривой. Экспериментальные отклонения носят случайный характер, причина их возникновения будет пояснена ниже (на рисунке 2.1.9 и 2.1.10).

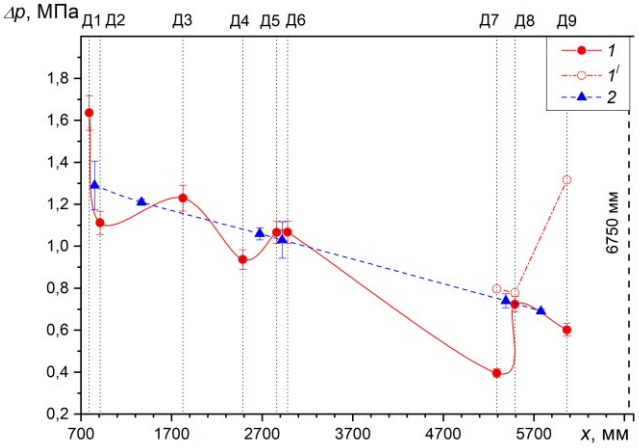


Рисунок 2.1.6 – Скачки давления на фронте падающих (*1*) и отражённых (*1'*) ударных волн в аэровзвеси руды *SO*1 при $\rho \approx 763$ г/м^3 по длине трубы. Расчётные скачки давления (*2*) на фронте ударной волны для экспериментальной скорости $D(x)$ при $p_{0i} = 0{,}4$ МПа

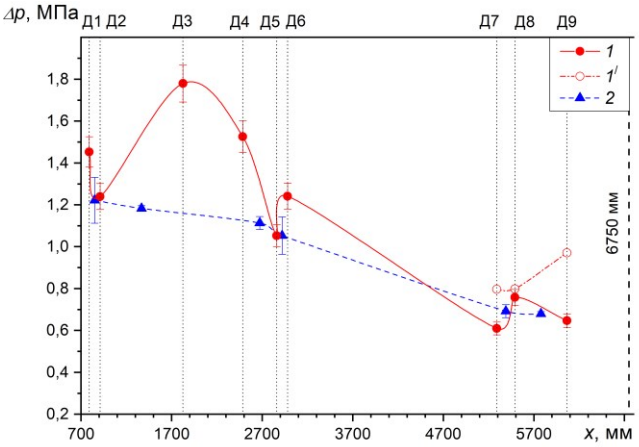


Рисунок 2.1.7 – Скачки давления на фронте падающих (*1*) и отражённых (*1'*) ударных волн в аэровзвеси руды *SO*1 при $\rho \approx 573$ г/м^3 по длине трубы. Расчётные скачки давления (*2*) на фронте ударной волны для экспериментальной скорости $D(x)$ при $p_{0i} = 0{,}4$ МПа

С уменьшением плотности аэровзвеси структура УВ становится более устойчивой, и разброс давлений во второй половине трубы уменьшается (рисунок 2.1.8).

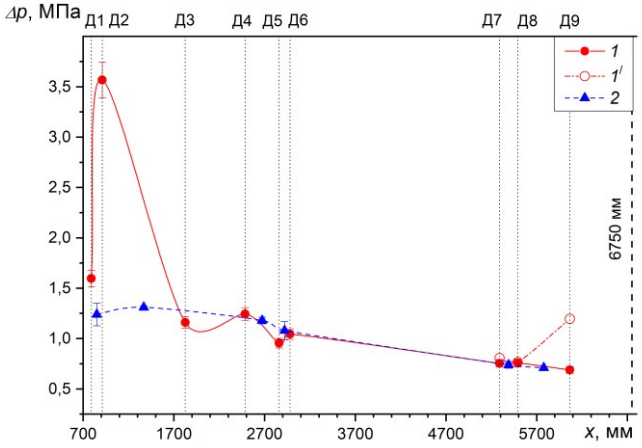


Рисунок 2.1.8 – Скачки давления на фронте падающих (*1*) и отражённых (*1'*) ударных волн в аэровзвеси руды *SO*1 при $\rho \approx 115$ г/м^3 по длине трубы. Расчётные скачки давления (*2*) на фронте ударной волны для экспериментальной скорости $D(x)$ при $p_{0i} = 0{,}4$ МПа

Из осциллограмм давления (рисунок 2.1.9, 2.1.10) видно, что УВ неустойчивы из-за наличия нестационарных возмущений давления за передним ударным фронтом. На датчике Д7 (рисунок 2.1.9) амплитуды первого и второго возмущения давления равны соответственно 0,396 и 0,989 МПа, при $t \geq 250$–300 мкс величина давления на Д7 из-за торможения потока газа о частицы возрастает до 1,452 МПа. После слияния на Д7 двух волн датчик Д8 зарегистрировал одноволновую структуру с амплитудой давления на фронте 0,724 МПа. На датчике Д9 за передним фронтом ударной волны зарегистрирован второй плавный фронт давления.

Ударная волна на рисунке 2.1.10 обладает ещё более неустойчивым профилем давления (см. датчики Д5÷Д9), что приводит к б*о*льшему, чем в предыдущем опыте разбросу скачков давления на переднем ударном фронте.

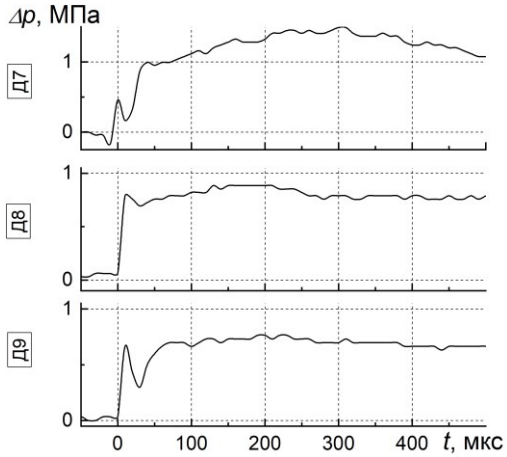


Рисунок 2.1.9 – Изменение структуры ударной волны на датчиках Д7÷Д9 в аэровзвеси руды *SO*1 при $p_{0i} = 0{,}4$ МПа и $\rho \approx 763$ г/м^3. Соответствует опыту на рисунке 2.1.6

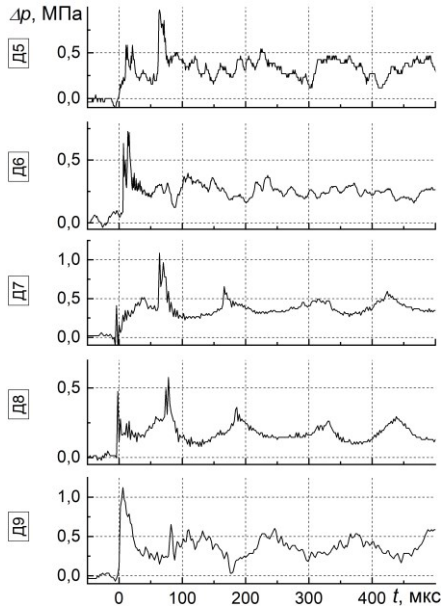


Рисунок 2.1.10 – Изменение структуры ударной волны на датчиках Д5÷Д9 в аэровзвеси руды *SO*1 при p_{0i} = 0,4 МПа и $\rho \approx 573$ г/м^3. Соответствует опыту на рисунке 2.1.7

Влияние плотности аэровзвесей руды *SO*1 на величину давления на фронте падающих УВ при p_{0i} = const показано на рисунке 2.1.11. Зависимости $p(\rho)$ немонотонные, значения давлений на фронте УВ, измеренные датчиками Д7÷Д9, меньше расчётных давлений. С увеличением ρ осреднённое давление на фронте ударных волн уменьшается.

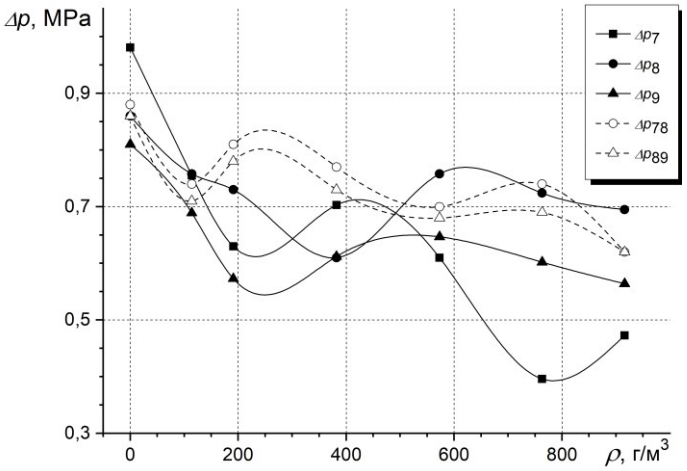


Рисунок 2.1.11 – Влияние плотности аэровзвесей руды *SO*1 на величину скачков давления на фронте падающих ударных волн при p_{0i} = 0,4 МПа:

$\Delta p_7 \div \Delta p_9$ – скачки давления, измеренные датчиками Д7÷Д9;

$\Delta p_{78} \div \Delta p_{89}$ – скачки давлений, рассчитанные для ударной волны со скоростями D_{78}, D_{89}

Внешний вид осевшего после опыта на фланец порошка подтверждает наличие химических реакций в руде после прохождения по ней взрывной волны. Выделяется верхний слой руды толщиной около 1 мм коричневого (ржавого) цвета (рисунок 2.1.12). Верхний слой

представляют собой наиболее мелкие частицы руды, которые с поверхности почти полностью прореагировали с кислородом воздуха и осели на фланец в последнюю очередь. Вся руда сохранила намагниченность, верхний слой был собран отдельно на анализ химического состава с помощью магнита. Химический состав осевшей руды был исследован на рентгеновском дифрактометре D8–Advance [14]. В таблице 2.1.1 приведены данные рентгеноструктурного анализа порошка *SO*1 до опыта и после трёх опытов. Количество пирротина уменьшается, реагируют с кислородом в основном Fe и S. Наибольшее выгорание пирротина (почти 27 % масс.), а также серы в *SO*1 наблюдается в верхнем слое руды (в таблице 2.1.1, два крайних правых столбца). Сульфид железа FeS (содержание менее 2 % масс.) сгорает полностью [14]. Появление Fe_3O_4 (в таблице 5) объясняется окислением железа, освободившегося после уменьшения масс. доли Fe_7S_8 и $CuFeS_2$.



Рисунок 2.1.12 – Снимок частиц богатой руды, осевших после опыта на нижний фланец трубы

Таблица 2.1.1 – Массовый процент основных химических соединений в богатой руде [14]

Название соединения	Хим. формула	% масс. до опыта	% масс. после опыта	Изменение % масс.	% масс. после опыта	Изменение % масс.	% масс. после опыта	Изменение % масс.
Pyrrhotite–3T	Fe_7S_8	61,56	49,50	–12,06	46,18	–15,38	34,68	–26,88
Chalcopyrite	$CuFeS_2$	10,76	6,24	–4,52	5,46	–5,30	4,96	–5,80
Pentlandite	$(FeNi)_9S_8$	10,50	4,82	–5,68	4,13	–6,37	0,00	–10,50
Magnetite	Fe_3O_4	8,00	32,33	+24,33	38,63	+30,63	57,99	+49,99
Quartz	SiO_2	7,22	7,10	–0,12	5,60	–1,62	2,37	–4,85
Troilite	FeS	1,96	0,00	–1,96	0,00	–1,96	0,00	–1,96

При динамическом нагреве руды *SO*2÷*SO*4 гораздо слабее, чем *SO*1 реагируют с воздухом. Свечение в отражённых ударных волнах слабое. Результаты рентгеноструктурного анализа указывают на незначительную долю прореагировавшей серы.

Реакции окисления серы протекают на поверхности порошков, представляя опасность для дыхания из-за образования сернистого газа. Используя результаты термогравиметрического исследования, можно сделать вывод, что реакции окисления на поверхности частиц всех исследованных руд протекают независимо от наличия или отсутствия свечения, если температура за ударной волной превышает 450 °C (723 K).

В образцах руд *SO*1–*SO*4 содержится менее 32 % масс. серы. Настоящее исследование не противоречит ГОСТ 8606–93 (ИСО 334–92) согласно которому руды с содержанием серы меньше 35 % масс. не взрывоопасны. Дополнительная мера обеспечения безопасности – увлажнение пыли, поскольку согласно ГОСТ 8606–93 сульфидная пыль становится невзрывчатой при влажности 9–9,5 %, а при влажности 10 % пыль не передает взрывной импульс [14].

Физическая модель нагрева и горения частиц сульфидной пыли [16]

Тепловой поток Q_2 к поверхности частицы S_2 при теплообмене с ударносжатым до температуры T_1 воздухом описывается уравнением $Q_2 = aS_2(T_1 - T_2)t$, где a – конвективный коэффициент передачи тепла. Часть тепла к частице передаётся при радиационном нагреве: $Q_{2\text{r}} = kS_2(T_1^4 - T_2^4)t$. Для сферической частицы удельный тепловой поток к центру за счёт теплопроводности обратно пропорционален квадрату её радиуса.

При экзотермических реакциях окисления сульфидов от поверхности частицы возникает дополнительный тепловой поток внутрь частицы. Если частица воспламенилась, то температура поверхности возрастает до 1500–1700°C, и окисление сульфидов приобретает наивысшую скорость. В этот момент поверхность зерен максимальна, содержание кислорода в газах еще высокое и на поверхности зерна зарождается окисная пленка. В зоне максимальных температур выделяется основная часть тепла реакций, протекающих с максимальными скоростями.

На поверхности окисляющихся зерен одновременно растёт пленка продуктов реакции, тормозящая диффузию кислорода вглубь зерна, и падает содержание кислорода в потоке. Скорости всех окислительных процессов уменьшаются. Если на поверхности частицы образуется плотная корка твердого окисла без трещин и дефектов, то диффузия кислорода через нее затруднена, процесс окисления может прекратиться, не дойдя до конца. Трещиноватые и жидкие окисные пленки тормозят процесс в меньшей степени. Скорость диффузии через жидкую пленку примерно на три порядка выше, чем через твердую пленку. Процесс окисления лимитируется диффузией кислорода через пленки продуктов реакции и обратной диффузией сернистого ангидрида в ядро газового потока.

2.2 О критических параметрах пылевой завесы, обеспечивающей гашение волны газовой детонации

Завесы из частиц инертной пыли можно использовать для ослабления ударных и ДВ. Ослабление волн происходит по механизму потери кинетической и тепловой энергии из газового потока в твёрдые частицы. Экспериментальному и теоретическому изучению процесса затухания газовой детонации в запылённой среде посвящены, например, работы [17–22]. В [22] приведён анализ литературы и изложены математические модели подавления детонации газовых смесей облаками мелких частиц.

Вдали от предела сгорание газовой смеси осуществляется преимущественно в поперечных волнах, образующих ячеистую структуру. Средний размер детонационных ячеек a примерно равен длине зоны реакции L_r.

При изучении влияния среднеобъёмной плотности (концентрации) частиц ρ_s на степень ослабления детонационной волны обычно переходят от малых концентраций, когда объем конденсированной фазы мал по сравнению с объемом газовой фазы, к большим концентрациям. Количественный критерий «малая – большая концентрация» обычно точно не устанавливается. Сама по себе концентрация частиц не является определяющим параметром, поскольку частицы могут находиться как в виде единого компактного объекта, так и в виде отдельных частиц, причем во множестве вариантов (по характерному размеру δ и количеству частиц при одной и той же суммарной массе). Естественно, что газодинамика течения для отдельной крупной частицы или ансамбля мелких частиц будет сильно различаться. Особенностью детонационной волны является наличие характерного масштаба зоны химической реакции, поэтому в задаче о взаимодействии ДВ с частицами возникает безразмерный параметр $N = L_r/\delta$ [5].

Исходя из величины параметра N, экспериментальные исследования влияния концентрации частиц на характеристики затухания можно проводить не только при увеличении количества частиц в единице объёма, но и за счет увеличения размера зоны реакции. Во втором случае, пропорционально L_r возрастает количество частиц, оказывающих влияние на детонационную волну. Изменить на порядок величину ρ_s при фиксированном размере зоны химической реакции не просто, изменить же на порядок длину зоны реакции не составляет труда за счет изменения на порядок начального давления смеси p_0. Для большинства газовых смесей размер ячейки обратно пропорционален p_0. Такая нестандартная методика исследований была использована ниже дополнительно к классической методике, когда изменялась величина ρ_s. Заметим, что длина зоны реакции может быть изменена также и за счет изменения состава газовой смеси [5].

В рамках классической модели детонации к затуханию детонации приводят потери, происходящие в области между ударным фронтом волны и плоскостью Чепмена–Жуге, поэтому с увеличением длины зоны реакции, гасящие свойства пылевой завесы будут усиливаться. В литературе наблюдается дефицит достоверных данных о параметрах пылевой завесы, при которых происходит полное затухание детонационной волны.

В разделе 2.2 изложены результаты наших работ [3–5]: исследовано затухание ДВ в запылённой газовой смеси при различных значениях p_0; определены критические параметры пылевой завесы – среднеобъёмная плотность и длина пылевого облака, обеспечивающие гашение волны детонации и продуктов реакции. Ликвидация остаточного пламени за фронтом ДВ – это наиболее сложная задача по исключению возможности возникновения повторного взрыва и детонации смеси.

Закономерности формирования пылевой завесы в ударной трубе

Для создания пылевой завесы использовали контейнеры с внутренним диаметром 22 мм, диаметрами выходного отверстия d_1 = 13, 15 и 17,5 мм и фракции песка с размерами частиц δ = 250÷600, 120÷250 и 90÷120 мкм при насыпной плотности ρ = 1,61, 1,48, 1,47 г/см^3 соответственно. Максимальный объём V песка в контейнере достигал 70 см^3. Динамику распределения пыли в ударной трубе изучали с помощью трёх фотоумножителей и светодиодов, установленными напротив оптических вводов фотоумножителей на расстояниях L_i = 1,830, 5,295 и 6,760 м от генератора взвеси пыли [5].

Время опорожнения Δt контейнеров с песком определяли для различных значений V по осциллограммам свечения с фотоумножителей непосредственно на выходе из клапана пылевзвсеси. Интенсивность свечения на осциллограммах имела вид прямоугольной полочки с передним вертикальным фронтом и слегка пологим задним. Такая форма заднего фронта объясняется началом расслоения пыли по размерам частиц на выходе из контейнера. Зависимости Δt (V) близки к прямолинейным. При d_1 = 17,5 мм и V = 70 см^3 значения Δt = 1,15, 1,2 и 1,55 с для δ = 250÷600, 120÷250 и 90÷120 мкм соответственно.

Осциллограммы интенсивности свечения, характеризующие распространение пылевой взвеси в ударной трубе, приведены на рисунок 2.2.1. Поскольку крупные частицы песка падают быстрее мелких, то по мере удаления от верха трубы происходит разделение частиц по размерам, и в облаке пыли изменяется объёмная плотность (см. сигналы *2÷4*). Передний и задний фронты пылевого облака с расстоянием становятся более пологими, задний фронт облака пыли более протяжённый, чем передний. С уменьшением размера частиц во фракции сигналы свечения становятся положе, их длительность возрастает, т.е. расслоение облака по плотности возрастает, длина пылевой завесы увеличивается [5].

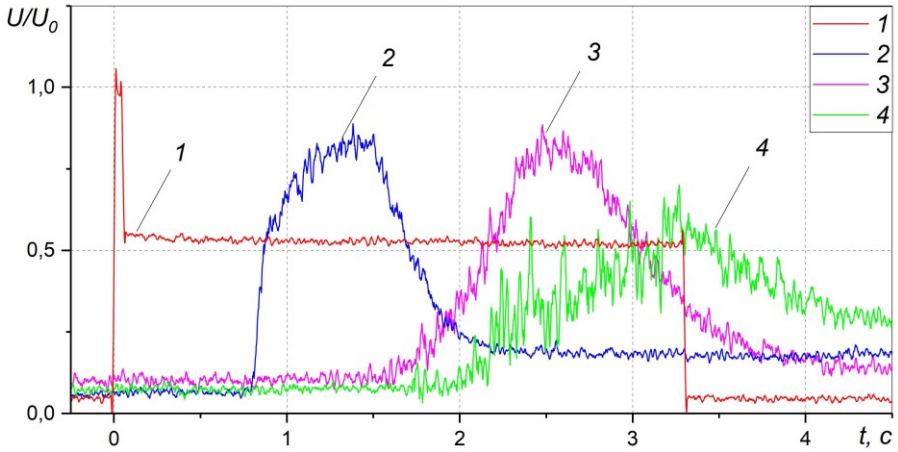


Рисунок 2.2.1 – Осциллограммы сигналов с фотоумножителей для определения характера падения пылевого облака по длине ударной трубы при p_0 = 0,03 МПа, δ = 250÷600 мкм: *1* – напряжение на реле клапана пылевзвеси, *2÷4* – сигналы с фотоумножителей. Параметры: d_1 = 17,5 мм, V = 30 см^3

Анализ полученных осциллограмм позволяет установить момент времени инициирования, когда пылевая завеса достигнет торца трубы, определить для этого момента длину завесы λ и размер свободного от пыли верхнего участка трубы. По полувысоте интенсивности свечения были определены положение и размеры Λ более плотного ядра пылевой завесы, суммарная длина λ_{12} начального и конечного менее плотных участков завесы. Исходя из этих размеров, установлены среднеобъёмные плотности всей пылевой завесы $\rho_s = 4\rho V/\lambda\pi d^2$ и более плотного «ядра» пыли $\rho_\Lambda = \rho_s\,(\lambda - 0{,}5\lambda_{12})\,/\Lambda$ [5].

В качестве примера на рисунке 2.2.2 приведены графические результаты измерения времени t распространения пылевой завесы фракции песка δ = 120÷250 мкм по длине трубы x при различных p_0. Здесь светлые значки и нижние сплошные линии – положения передних (нижних) границ пылевой завесы, те же светлые значки и верхние пунктирные линии – верхние границы завес. Аналогично наполовину затемнённые значки соответствуют положениям тех же границ для плотной пыли, определяемым на половине интенсивности свечения фотоумножителей. Концу столба пыли соответствуют значения $t = \Delta t_j$, которые были определены при опорожнении контейнеров. По мере падения столб пыли увеличивает свои размеры. Нижняя кривая описывает положение начала столба пыли в вакууме от времени $t_н$. Для примера при p_0 = 0,01 МПа горизонтальными стрелками отмечены хвосты пыли и хвосты плотной пыли в моменты времени, когда соответствующие начала пылевых столбов достигают нижнего торца трубы [5].

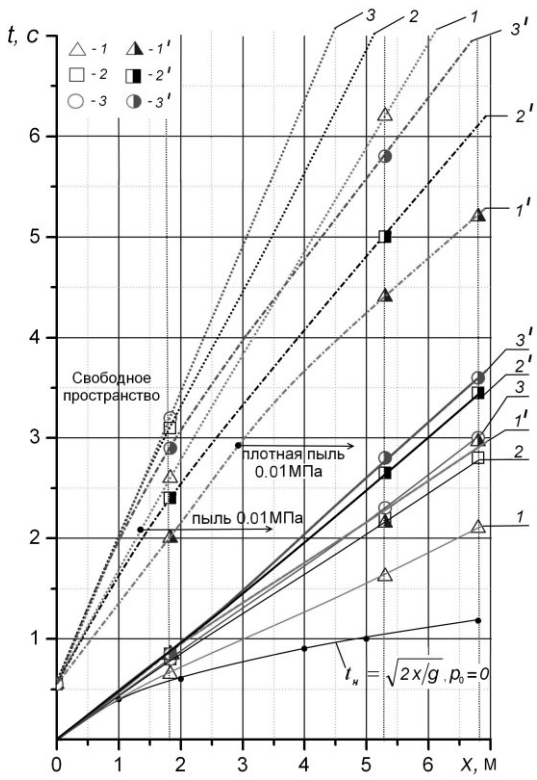


Рисунок 2.2.2 – Зависимости, описывающие падение пылевой завесы по длине x в вертикальной ударной трубе: *1*, *1'* – p_0 = 0,01 МПа; ρ_s = 2,14 г/л, ρ_Λ = 2,57 г/л; *2*, *2'* – p_0 = 0,03 МПа, ρ_s = 2,24 г/л, ρ_Λ = 2,73 г/л; *3*, *3'* – p_0 = 0,05 МПа, ρ_s = 2,28 г/л, ρ_Λ = 2,49 г/л. Параметры: δ=120÷250 мкм, d_1 = 17,5 мм, V = 30 см^3, g = 9,8 м/с^2

С увеличением объёма пыли в контейнере длина столба пыли возрастает. Для одной и той же фракции частиц при увеличении V время падения столба пыли возрастает из-за возникновения завихрений и противотока газа в ударной трубе. Влияние этого эффекта заметно и при изменении p_0.

Зависимости, подобные приведённым на рисунке 2.2.2, были получены для разных значений d_1, V, δ и p_0. Для контейнера d_1 = 17,5 мм при p_0 = 0,01÷0,05 МПа и V = 30÷60 см^3 для всех трёх фракций песка значения $2{,}2 \le \rho_s \le 3{,}5$ г/л, $2{,}3 \le \rho_\Lambda \le 4{,}0$ г/л [5].

Экспериментальная методика

Трубу перед опытом откачивали форвакуумным насосом и заполняли через СИ газовой смесью $CH_4+2O_2+N_2$ до давления (0,99÷0,9)p_0, затем СИ заполняли смесью $C_2H_2+2{,}5O_2$ соответственно до начального давления p_{0i} = p_0 = 0,01÷0,1 МПа для ускорения перехода детонации газовой смеси в установившийся режим [5].

Для определения расстояния выхода детонации на стационарный режим выполнены опыты в газовой смеси $CH_4+2O_2+N_2$ при p_0 = 0,1÷0,01 МПа; СИ заполняли смесью $C_2H_2+2{,}5O_2$. Характерные осциллограммы давления (Д6÷Д8) и свечения (ФЭУ1, ФЭУ2) представлены на

рисунке 2.2.3*а*, *б*. Для уменьшения светового потока от продуктов детонации между оптическими вводами и фотоумножителями применяли затемняющие фильтры. Оптический ввод ФЭУ1, расположенный напротив Д6, представляет собой длинную трубку, с помощью которой регистрируется профиль свечения в волне детонации. Оптический ввод ФЭУ2 – это пучок кварцевых нитей между фланцами заподлицо со стенкой трубы на 55 мм ниже Д8, с его помощью регистрируется более широкий угловой сектор, поэтому профиль свечения более сглаженный, чем на ФЭУ1.

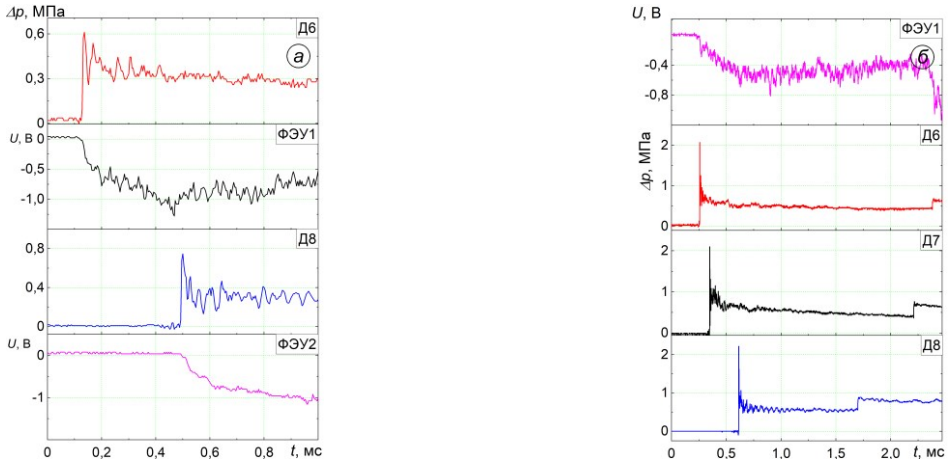


Рисунок 2.2.3 – Осциллограммы давления и свечения при детонации газовой смеси $CH_4+2O_2+N_2$: *а* – p_0 = 0,02 МПа; *б* – p_0 = 0,03 МПа

На переднем фронте ДВ регистрируется характерный пик давления, величина которого зависит от случайного прихода на датчик какого–либо участка криволинейного переднего фронта, либо поперечных волн (этот пик давления принято называть химпиком). Вторые скачки давления на осциллограммах соответствуют отражённым от торца трубы волнам с характерным для ударной волны прямоугольным профилем (рисунок 2.2.3*б*). Крутизна свечения на переднем фронте увеличивается с ростом давления, в отражённой от торца трубы волне наблюдается резкий рост свечения примерно в два раза из-за подъёма температуры. Интенсивность свечения за фронтом детонации практически постоянна, длительность свечения превышает 2 мс [3, 4]. При p_0 = 0,02 МПа (рисунок 2.2.3*а*) $p_{CJ} \approx 0{,}51$ МПа, $a \approx 20$ мм [37], плоскость Чепмена–Жуге отстоит от ударного фронта на $\tau_{CJ} \approx 9$ мкс. Соответственно для p_0 = 0,03 МПа (рисунок 2.2.3*б*) $p_{CJ} \approx 0{,}765$ МПа [37], $\tau_{CJ} \approx 6$ мкс.

По измерениям ДВ выходит на установившийся режим ($D \approx 2200$–2240 м/с) на расстоянии около 2 м от верха трубы, скорость волны отличается от D_{CJ} менее чем на 1 %.

Распространение волны детонации в смеси ($CH_4+2O_2+N_2$)/инертная пыль
Фракция песка δ = 250÷600 мкм

В пылевой завесе с $\rho_s \le$ 2–2,5 г/л при p_0 = 0,1 МПа детонационная волна практически не ослабляется: между датчиками Д6÷Д8 наблюдается снижение скорости детонации на 20–40 м/с. На фронте ДВ регистрируется химпик (рисунок 2.2.4*а*, сигналы *2*, *3*). Передний фронт свечения круче, чем в газовой смеси без пыли, уровень свечения практически постоянен (рисунок 20*а*, сигнал *4*). При $\rho_s \approx$ 2–2,5 г/л в 1 см^3 содержится ~ 10^2 частиц пыли, расстояние между ними $\lambda_s \approx$ 0,3 мм [5]. Поскольку при p_0 = 0,1 МПа $a \approx$ 4 мм (λ_s << a), то на частицах образуется сплошной фронт воспламенения смеси на всей площади переднего фронта ДВ. Исходя из этого, можно предположить, что большое количество частиц пыли обеспечит перестройку структуры волны детонации, и в результате исчезнут поперечные волны.

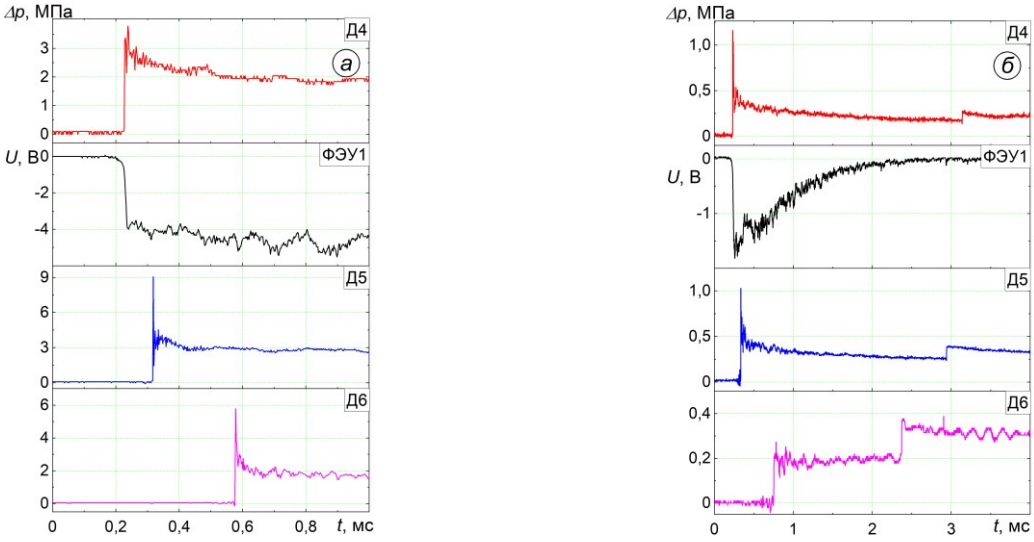
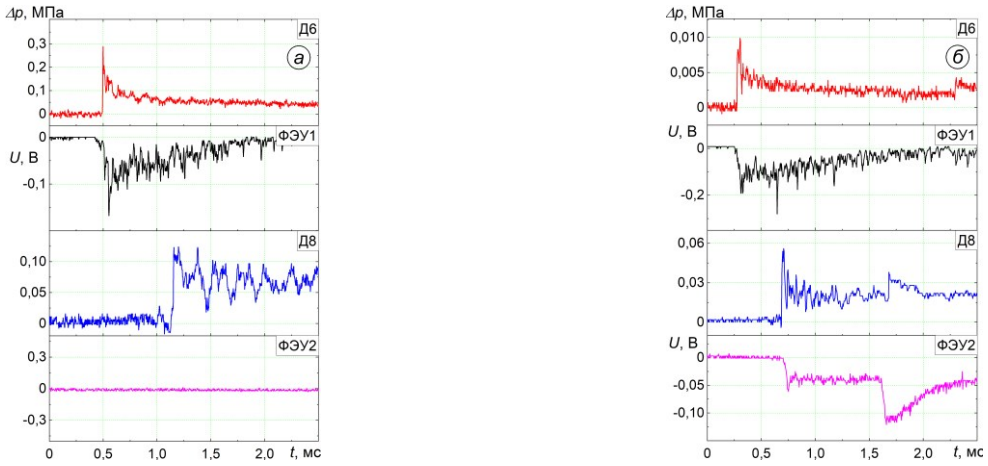


Рисунок 2.2.4 – Осциллограммы давления и свечения при детонации газовой смеси CH_4+2O_2+N_2 в пылевой завесе: *а* – p_0 = 0,1 МПа; *б* – p_0 = 0,02 МПа. Параметры: V = 30 см^3, δ = 250÷600 мкм

С уменьшением начального давления снижается общая энергия смеси, увеличивается длина зоны реакции, и при фиксированной величине ρ_s скорость ДВ спадает быстрее. При p_0 = 0,03 МПа размер ячейки в исследуемой газовой смеси возрастает до $a \approx$ 13 мм, и пылевая завеса оказывает заметное гасящее действие на ДВ. При $p_0 \le$ 0,03 МПа параметры и структура волны детонации в газопылевой среде качественно и количественно изменяются. При p_0 = 0,02 МПа по мере затухания волны с расстоянием химпик на датчике Д6 исчезает (рисунок 2.2.4*б*), при этом скорость детонации на базе Д6–Д7 уменьшилась до D_{67} = 1961 м/с, а на базе Д7–Д8 – до D_{78} = 1367 м/с. Свечение в отражённой волне не регистрируется (рисунок 2.2.4*б*, ФЭУ1). Передний фронт свечения в газопылевой среде заметно круче, чем в гомогенной газовой смеси, что обусловлено уменьшением задержки воспламенения смеси из-за возрастания температуры

газа при торможении потока газа на частицах; при удалении от фронта ДВ свечение полностью спадает из-за потерь примерно за 1,8 мс (рисунок 2.2.4*б*, ФЭУ1).

В детонационной волне при p_0 = 0,01 МПа в завесе кварцевого песка δ = 250÷600 мкм в опыте с V = 30 см^3 на верхнем участке трубы скорость детонации, регистрируемая хронометром, постепенно уменьшается: 2215, 2190, 2082, 2077 м/с. Ниже, на базах измерения между датчиками Д4÷Д8 волна детонации продолжала затухать: D_{45} = 1667 м/с, D_{56} = 1711 м/с, D_{67} = 1460 м/с, D_{78} = 1167 м/с. Датчик Д6 ещё регистрирует химпик, ФЭУ1 в том же сечении трубы – свечение (рисунок 2.2.5*а*). На датчике Д8 химпик исчезает и волна сжатия отстаёт от фронта. На датчике Д8 регистрируется затухающая ударная волна без свечения и химической реакции (рисунок 2.2.5*а*, ФЭУ2). В приведённом на рисунок 2.2.5*а* опыте произошёл характерный срыв детонации [4].



а *Б*

Рисунок 2.2.5 – Осциллограммы давления и свечения при детонации смеси CH_4+2O_2+N_2 в пылевой завесе: *а* – V = 30 см^3; *б* – V = 60 см^3 Параметры:δ = 250÷600 мкм, p_0 = 0,01 МПа

В некоторых экспериментах при p_0 = 0,01 МПа гашение детонации протекает немонотонным образом, – затухающая волна детонации внезапно начинает ускоряться. В качестве примера на рисунке 2.2.5*б* приведён опыт при объёме песка в контейнере V = 60 см^3 (с массой завесы в два раза большей, чем на рисунке 2.2.5*а*). Здесь срыва детонации на той же длине трубы не произошло. Детонационная волна распространялась на свободном от пыли верхнем участке трубы со скоростью D = 2210 м/с. Ниже, в пылевой завесе, скорость ДВ изменялась следующим образом: D_{45} = 1915 м/с, D_{56} = 1750 м/с, D_{67} = 1724 м/с, D_{78} = 1869 м/с. Т. е. детонация вначале затухала, а потом ускорилась, и свечение в волне зарегистрировали оба фотоумножителя (рисунок 2.2.5*б*, ФЭУ1 и ФЭУ2). Таким образом, частицы пыли, отбирая тепло и импульс от газового потока, нагреваются и могут способствовать возрождению детонации [4].

Фракция песка δ = 120÷250 мкм

В завесе песка δ = 120÷250 мкм затухание ДВ усиливается по сравнению с завесой из более крупной фракции δ = 250÷600 мкм, но срыва детонации на длине трубы не наблюдалось даже при p_0 = 0,01 МПа. Для всех p_0 > 0,1 МПа по длине трубы сохраняется характерный детонационный профиль давления, свечение имеет более крутой фронт и меньшую длительность, чем в опытах с более крупной фракцией. Как и в предыдущих опытах отсутствует однозначная зависимость между скоростью затухающей волны детонации на отдельных участках измерения и концентрацией песка, что связано с немонотонным пульсационным характером распространения волн.

Существенное увеличение концентрации пыли может приводить к незначительному замедлению скорости волны на длине трубы. Например, при p_0 = 0,015 МПа скорость детонационной волны на нижнем участке измерения затухает до D_{78} = 1720 м/с при V = 30 см^3 и до D_{78} = 1685 м/с при V = 60 см^3. С ростом энергии газовой смеси (при росте p_0) для повышения эффективности гашения детонации необходимо не только увеличивать концентрацию пыли, но и уменьшать размер частиц. Поэтому положительных результатов по гашению детонации следует ожидать в опытах с более мелкой фракцией песка [4].

Фракция песка δ = 90÷120 мкм

В этой фракции песка для исследованного диапазона ρ_s при p_0 = 0,02 МПа ни в одном из опытов не наблюдалось срыва детонации. Как и выше, увеличение массы песка не всегда приводило к уменьшению скорости волны на нижних базах измерения. Например, в опыте при V = 50 см^3 детонационная волна во второй половине трубы замедлилась до D_{67} = 1611 м/с и D_{78} = 1576 м/с. Но в другом опыте при V = 60 см^3 скорость детонации на тех же участках измерения оказалась больше: D_{67} = 1673 м/с и D_{78} = 1667 м/с.

Осциллограммы детонационных волн и свечения при давлении p_0 = 0,015 МПа представлены на рисунке 2.2.6 *а* и *б* для V = 30 см^3 и V = 40 см^3 соответственно. В первом случае скорость волны затухала до D_{45} = 1935 м/с, D_{56} = 1540 м/с, D_{67} = 1429 м/с, D_{78} = 1013 м/с. На датчике Д4 зарегистрирован детонационный профиль давления волны детонации (рисунок 2.2.6*а*). Длительность свечения в детонационной волне составляет 400 мкс (рисунок 2.2.6*а*, ФЭУ1) [4].

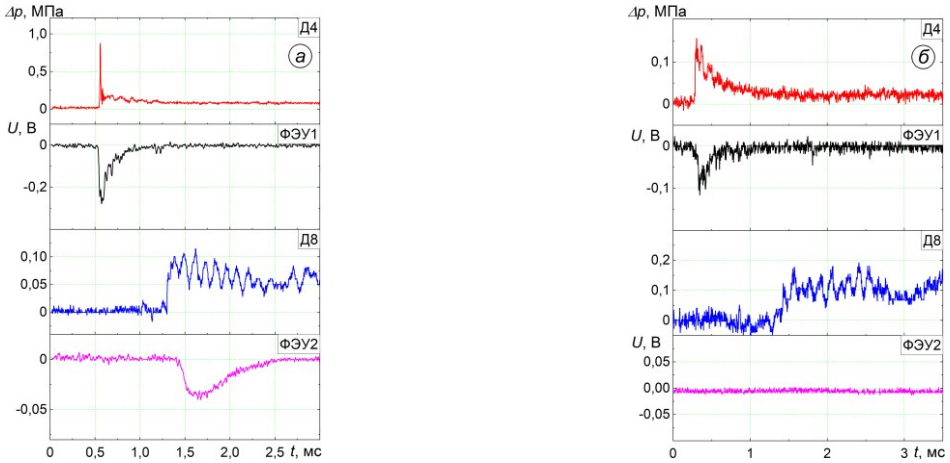


Рисунок 2.2.6 – Осциллограммы давления и свечения при детонации газовой смеси $CH_4+2O_2+N_2$, при в пылевой завесе: *а* – $V = 30$ см^3; *б* – $V = 40$ см^3. Параметры: $\delta = 90 \div 120$ мкм, $p_0 = 0{,}015$ МПа

Увеличение объёма песка до 40 см^3 при $p_0 = 0{,}015$ МПа может оказаться недостаточным для гашения детонации, но в ряде опытов приводит не только к срыву детонации, но и к гашению пламени. Во втором случае замедление волны в опыте на рисунке 2.2.6*б* шло до полного срыва детонации: $D_{45} = 1412$ м/с, $D_{56} = 1448$ м/с, $D_{67} = 909$ м/с, $D_{78} = 681$ м/с, свечение пламени на ФЭУ2 при данной чувствительности не зарегистрировано. Результаты подобных опытов указывают на существенное улучшение гасящей способности фракции песка $\delta = 90 \div 120$ мкм.

Несмотря на то, что при $p_0 = 0{,}015$ МПа происходит срыв и гашение детонации, последующая ударная волна затухает, ФЭУ2 не регистрирует свечение, остаются вопросы, которые следует выяснить.

1. Существует ли на удалении за фронтом затухающей ударной волны какое–либо слабое остаточное свечение и пламя?

2. Если пламя существует, то, как быстро оно вырождается, и способно ли оно возродить детонационный процесс?

Для ответа на эти вопросы выполнены опыты при меньшем начальном давлении с увеличенной чувствительностью фотоумножителей, когда были убраны затемняющие светофильтры (во всех предыдущих опытах использовали затемняющие светофильтры с целью обеспечения линейной характеристики фотоумножителей при высоком уровне свечения детонационной волны). Для $p_0 = 0{,}01$ МПа и $V = 50$–60 см^3 скорость ДВ затухает с 2160–2190 м/с (верхний участок трубы) до $D_{45} = 1600$–1090, $D_{56} = 592$–462, $D_{67} = 690$–570, $D_{78} \approx 400$–150 м/с [4].

В опытах, приведённых на рисунок 2.2.7*а*, *б*, по сравнению с предыдущими опытами увеличена чувствительность каналов осциллографа, записывающих сигналы нижних пьезодатчиков и фотоумножителей, и длина развёртки времени. Датчики Д4 и Д5 ещё регистрируют затухающую детонационную волну со скоростью $D_{45} = 1090$ м/с (рисунок 2.2.7*а*),

амплитуда давления на фронте волны, регистрируемая датчиком Д5, $p_5 \approx 0{,}09$ МПа (сигнал *2*). Ниже распространяется волна сжатия с плавным профилем давления амплитудой 0,07–0,09 МПа и длительностью 2–3 мс (рисунок 2.2.7*а* датчики Д6 и Д7), скорость волны $D_{67} = 570$ м/с, $D_{78} = 385$ м/с.

При увеличении объёма песка в завесе до $V = 60$ см^3 амплитуда волны сжатия на датчике Д7 уменьшается до величины $p_7 \approx 0{,}04$ МПа (рисунок 2.2.7*б*). Интенсивность свечения в следующем за волной сжатия пламени примерно на порядок меньше, чем в волне затухающей детонации, длительность свечения – около 3 мс. Пламя здесь – это движущиеся вниз продукты реакции затухшей детонационной волны, их свечение, регистрируемое ФЭУ1, отстаёт от волны сжатия на 3,5 мс (≈ 2 м), средняя скорость пламени на участке между ФЭУ1 и ФЭУ2 составляет 255 м/с (рисунок 2.2.7*б*) [4].

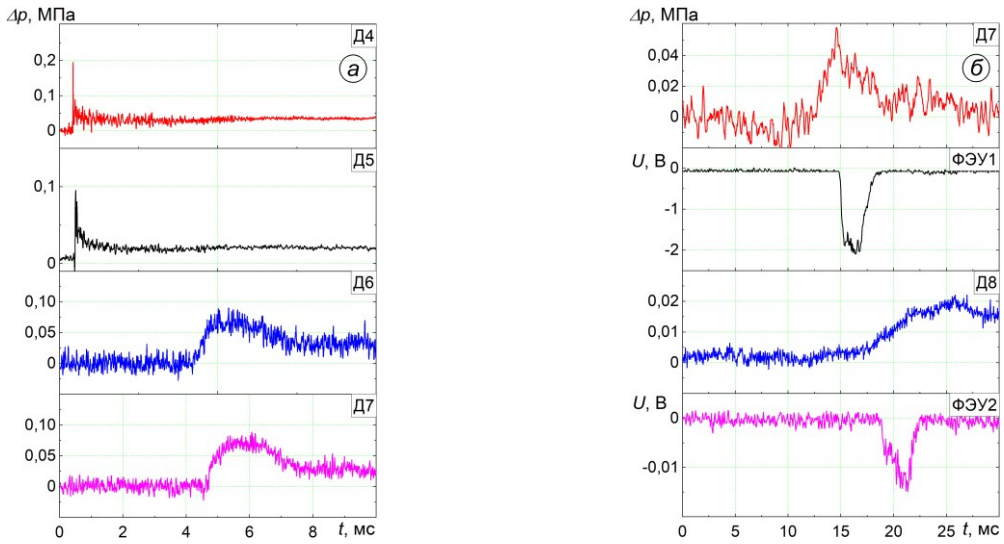


Рисунок 2.2.7 – Осциллограммы давления и свечения при детонации газовой смеси $CH_4+2O_2+N_2$, в пылевой завесе: *а* – $V = 50$ см^3, *б* – $V = 60$ см^3.

Параметры: $\delta = 90 \div 120$ мкм, $p_0 = 0{,}01$ МПа

Запись сигналов на ещё более длинных развёртках показала, что после отражения волны сжатия от торца, вторичного воспламенения не происходит, свечение полностью исчезает. Для более эффективного гашения остаточного пламени необходимо применять пламегасящие порошки или увеличивать концентрацию пылевой завесы из кварцевого песка.

Изменение скорости волн детонации в пылевом облаке по длине трубы

На рисунке 2.2.8 показано, как изменяются скорости волн детонации по длине трубы. При давлениях $p_0 \geq 0{,}02$ МПа срыва детонации не происходит, волна незначительно уменьшает скорость. Для давлений $p_0 = 0{,}01$ и 0,015 МПа свободное вверху от пыли пространство составляет 0,8–0,9 м, начало «ядра» пылевого облака находится на расстоянии x = 2,2–2,3 м. Наибольшее затухание детонационной волны происходит в плотном пылевом «ядре» [4].

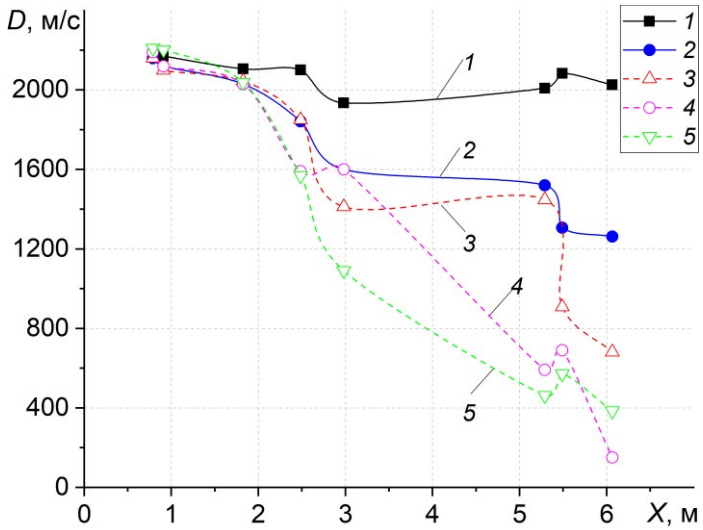


Рисунок 2.2.8 – Изменение скорости волн детонации в пылевом облаке по длине трубы: *1* – p_0 = 0,02 МПа, δ = 250÷600 мкм, V = 60 см^3; *2*, *3*, – p_0 = 0,015 МПа, δ = 90÷120 мкм, V = 40 см^3; *4*, *5* – p_0 = 0,01 МПа, δ = 90÷120 мкм, V = 50 см^3

На участке 2,2 < x ≤ 5,3 м ДВ в некоторых опытах распространяется в пульсирующем режиме, когда за её передним фронтом возникает вторичная детонация – при этом волна может временно ускоряться и увеличивать скорость, но в конце трубы (x > 5,3 м) происходит срыв детонации, и детонационная волна затухает. Из графиков видно, что с увеличением концентрации песка, уменьшением размера частиц и уменьшением p_0 (увеличением длины зоны реакции и уменьшением общей энергии смеси) облегчается срыв детонации и пламени. В наиболее мелкой фракции песка (δ = 90÷120 мкм) при p_0 = 0,01 МПа вторая стадия резкого затухания волны происходит на расстоянии x > 5,5 м, и к концу трубы пламя затухает [4].

При p_0 = 0,01 МПа на верхнем участке трубы, где детонационная волна распространялась в газовой смеси без пыли, размер ячейки и длина зоны реакции a ≈ 40 мм. Во фракции песка δ = 90–120 мкм волна затухала при плотности пыли ρ_s ≈ 2–2,5 г/л, эта величина примерно в 20–25 раз превышает начальную плотность газовой смеси. Такие сравнительно небольшие значения ρ_s могут быть использованы для гашения детонации в метановоздушных смесях, где a ≥ 0,3 м.

Иллюстрацией важности учета эффектов пространственной неоднородности может служить следующий пример. Рассмотрим промежуточный режим движения взрывной волны с D = 880 м/с, который близок к режиму перехода горения в детонацию, (D ≈ 0,5D_{CJ}, где D_{CJ} = 1803 м/с для стехиометрической метано–воздушной смеси). В рамках одномерных представлений за такой ударной волной достигаются: температура 615 К, плотность ρ_1 = 3,47ρ_0, скорость газа u_1 = 626 м/с. Если поток за ударной волной затормозить на частице завесы, то дополнительный подъем температуры за счет торможения потока составит величину

$\Delta T = u_1^2/2c_V \approx$ 258 K, т. е. температура достигнет величины T^* = 873 К (здесь c_V – удельная (мольная) теплоемкость). Для оценки задержки воспламенения τ воспользуемся широко распространенной для одномерных течений гомогенной смеси формулой Аррениуса $\tau = \frac{A \cdot exp(E/RT)}{[f]^{k_1}[o]^{k_2}[in]^{k_3}}$. Для данной ударной волны получим уменьшение τ при торможении на частице в e^8 = 2981 раз по сравнению с величиной τ за проходящей по однородной смеси ударной волной. Здесь из [38] для метановых смесей $A = 6 \cdot 10^{-6}$ с моль/л, энергия активации E = 33200 кал/моль, $k_1 = 0$, $k_2 = 1$, $k_3 = 0$; в квадратных скобках – концентрации топлива (f – метан), окислителя (o – кислород) и инертного газа (in – азот) [4].

Критерий гашения волны газовой детонации пылевой завесой [4]

Оценки показывают, что основной механизм затухания ДВ – это тепловые потери из зоны реакции в частицы пыли. Для практики наибольший интерес представляют метановоздушные смеси. Поскольку эти смеси менее активны, чем смесь $CH_4+2O_2+N_2$, имеют более длинные зоны реакции, то для гашения в них детонации потребуются существенно меньшие концентрации пыли. Получим оценку критической плотности пыли $\rho^*_{\mathrm{d\,st}}$ для стехиометрической метановоздушной смеси (далее индекс st) при нормальных условиях. Для смесей, состав которых отличается от стехиометрии, зона реакции превышает величину $L_{\mathrm{r\,st}}$, поэтому для них значения ρ_d^* будут еще меньше, чем $\rho^*_{\mathrm{d\,st}}$.

На основании полученных опытных данных для сравнительно крупных частиц (когда в зоне реакции не выполняется условие тепловой и скоростной релаксации между частицами и газом) при определяющей роли тепловых потерь предложим критерий гашения газовой детонации:

$$K \cdot \rho_d^* \cdot L_r/\delta \approx Q \cdot \rho_0,$$

где K – постоянный размерный коэффициент, Q – удельное тепловыделение смеси, ρ_0 – начальная плотность газовой смеси. Критерий означает, что при фиксированной суммарной массе пылевой завесы потери тепла в частицы пропорциональны длине зоны реакции L_r, площади частицы $S \sim \delta^2$ и числу частиц $N \sim 1/\delta^3$. Поскольку $L_r \sim 1/p_0$ (здесь $L_r = \xi/p_0$, где ξ – постоянный коэффициент), то из критерия следует, что $\rho_d^* \approx K^* \cdot Q \cdot \delta \cdot p_0^2$, где K^* – постоянный размерный коэффициент.

Для двух близких по составу смесей $K_1^* \approx K_{\mathrm{st}}^*$ при одинаковых δ отношение $\rho^*_{\mathrm{d\,st}}/\rho^*_{\mathrm{d\,1}} \approx (L_{\mathrm{r\,1}}/L_{\mathrm{r\,st}})(Q_{\mathrm{st}}/Q_1)(p_{0\,\mathrm{st}}/p_{01})$. В смеси $CH_4+2O_2+N_2$ Q_1 = 957,8 кал/г. В стехиометрической метановоздушной смеси Q_2 = 542,4 кал/г, $L_{\mathrm{r\,st}} \approx$ 0,3 м (для $p_{0\,\mathrm{st}}$ = 0,1 МПа). Тогда для $p_{0\,\mathrm{st}}$ = 0,1 МПа и p_{01} = 0,01 МПа (когда $L_{\mathrm{r1}} \approx$ 0,04 м, $\rho^*_{\mathrm{d\,1}} \approx$ 2–2,5 г/л) получим $\rho^*_{\mathrm{d\,st}}/\rho^*_{\mathrm{d1}} \approx$ 0,76, $\rho^*_{\mathrm{d\,st}} \approx$ 1,5–1,9 г/л.

Такие сравнительно небольшие концентрации пыли могут быть использованы на практике для гашения ДВ в метановоздушных смесях при атмосферном давлении. Оценим, какая максимальная масса песка M^* потребуется в этом случае. Приняв, что в шахте диаметром 6 м необходимо создать пылевую завесу на длине 6 м с величиной $\rho_{\mathrm{d\,st}}^{*} = 2$ г/л получим, что $M^* \approx 340$ кг.

Технически сложно обеспечить в большом объёме плотность пыли $\rho_{\mathrm{d}}^{*} >> 2$ г/л, поскольку величина M^* будет составлять несколько тонн. По этой причине нецелесообразно осуществлять гашение детонации в активных газовых смесях при атмосферном давлении, когда одновременно возрастает энергия смеси и сокращается длина зоны реакции до нескольких миллиметров или долей миллиметра. Практически невозможно также за короткие времена создать пылевую завесу из частиц с размерами $\delta \leq 1$–10 мкм, поэтому размер частиц $\delta \sim 10^2$ мкм, по–видимому, является оптимальным для гашения техногенных взрывных волн.

Основные выводы и результаты по второй главе

Раздел 2.1

1. Исследована взрывчатость аэровзвесей сульфидных руд с размерами частиц 1–5 мкм и объёмной плотностью 40÷920 г/м^3 в ударных волнах с температурой, превышающей температуру воспламенения сульфидов железа, а также при воздействии на них взрывных волн (продуктов газовой детонации). С помощью рентгеноструктурной диагностики определено изменение содержания химических элементов и соединений в порошках руд после прохождения по ним взрывных волн.

2. Ударные волны с числами Маха M_{12} = 2,9÷4,1 в аэровзвесях затухают, самоподдерживающиеся режимы детонации не обнаружены. Зарегистрировано кратковременное свечение аэровзвесей в отражённых ударных волнах при $M_{12} \geq 3{,}4$ без образования дополнительных волн сжатия.

3. Скорости падающих ударных волн в аэровзвесях руд примерно на 40–60 м/с меньше, чем в воздухе при одинаковых начальных условиях. Зависимость скорости УВ в аэровзвесях руд от концентрации пыли немонотонная.

4. Профили давления УВ в аэровзвесях руд неустойчивы. За фронтом УВ регистрируются возмущения давления, и наблюдается рост давления на 40–270 % по сравнению с давлением ударного фронта. Зависимости $p(\rho)$ немонотонные, величина давления на фронте УВ обычно меньше расчётного давления при той же скорости волны. Разброс давлений на переднем фронте УВ обусловлен проявлением неустойчивости за ударным фронтом в виде нестационарных возмущений давления.

5. При действии на аэровзвеси руд взрывных волн уменьшается количество пирротина (Fe_7S_8). Реакции окисления на поверхности частиц с образованием сернистого газа протекают независимо от наличия или отсутствия свечения, если температура за УВ превышает 450 °С. Исследованные образцы руд с содержанием серы менее 32 % невзрывоопасны.

Раздел 2.2

1. Изучена динамика формирования данного пылевого облака. С уменьшением размера частиц пыли во фракции время падения частиц и длина пылевой завесы увеличиваются. Длина пылевой завесы зависит от объёма песка в контейнере, среднеобъёмная плотность пыли в завесе не пропорциональна объёму песка V в контейнере и для диапазона V = 30÷60 см^3 составляет 2,2÷3,5 г/л.

2. Изучен характер затухания детонационной волны в запылённой газовой смеси $CH_4+2O_2+N_2$ во фракциях кварцевого песка с размерами частиц δ = 250÷600, 120÷250 и

90÷120 мкм со среднеобъёмными плотностями $\rho_s = 2{,}2 \div 3{,}5$ г/л при начальных давлениях смеси $p_0 = 0{,}1 \div 0{,}01$ МПа. Определены предельные для гашения детонационной волны концентрации пылевого облака в зависимости от дисперсности частиц.

3. При начальном давлении 0,1 МПа пылевая завеса длиной около 6 м из частиц песка размером 250÷600 мкм со среднеобъёмной концентрацией пыли $\rho_s \approx 2{,}5$ г/л практически не ослабляет детонационную волну. С уменьшением начального давления смеси и размера частиц гасящие свойства пылевой завесы существенно увеличиваются.

4. При начальном давлении 0,01 МПа во фракции частиц песка 90÷120 мкм и $\rho_s = 2 - 2{,}5$ г/л на длине около 6 м можно загасить детонационную волну до акустической волны со скоростью 400–150 м/с.

5. Обнаружен немонотонный характер уменьшения скорости детонационной волны в пылевой завесе, когда в процессе ослабления волны за её передним фронтом возникает вторичная детонация.

6. Наличие пыли в газовой смеси приводит к изменению механизма воспламенения во фронте детонации, поскольку возникают дополнительные горячие точки за счёт торможения газового потока на частицах. Это может способствовать возникновению вторичной детонации и замедлять процесс затухания волны детонации.

7. Поскольку метановоздушные смеси менее активны, чем изученная смесь, и имеют более длинные зоны реакции, то для гашения детонации в стехиометрической метановоздушной смеси при тех же давлениях потребуются меньшие концентрации пыли.

8. Для сравнительно крупных частиц (когда в зоне реакции не выполняется условие тепловой и скоростной релаксации между частицами и газом) при определяющей роли тепловых потерь предложен критерий гашения газовой детонации пылевой завесой.

ГЛАВА 3. СТРУКТУРА УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ГАЗОВЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЯХ, СОДЕРЖАЩИХ МЕТАН, ВОДОРОД И УГОЛЬНУЮ ПЫЛЬ

3.1 Взрыв, детонация, горение в газовых смесях CH_4/O_2, CH_4/воздух и гибридных смесях CH_4/O_2/уголь, CH_4/воздух/уголь, O_2/уголь

При добыче каменного угля мелкодисперсная угольная пыль откладывается на нижнем горизонте и стенках шахты. В воздухе канала шахты постоянно присутствует витающая угольная пыль, концентрация которой $\rho \leq 1$ г/м^3. Эта величина на 2–4 порядка меньше нижнего концентрационного предела взрываемости угольной пыли (≈ 30–80 г/м^3) [6–8]. Первичные волны сжатия чаще возникают при взрывах метановоздушных смесей вблизи мест случайного выброса метана. Такая взрывная волна (ударная волна с движущимися за ней продуктами сгорания) может сорвать угольную пыль со стенок канала, создать облако угольной пыли и воспламенить его [6–10]. Процессы горения, взрыва и детонации в ДГС изучены меньше, чем в метановоздушных смесях [29].

В экспериментах с условиями, близкими к условиям в шахтах, короткий участок канала диаметром $d \approx 1$–3 м отделяли от остальной, более длинной, части канала тонкой бумажной или полиэтиленовой перегородкой и заполняли метаном. После перемешивания с воздухом стехиометрическую метановоздушную смесь подрывали воспламенителем с энергией несколько кДж. Обычно $l/d \leq 3$–20 (где l – длина короткого канала), и околозвуковая взрывная волна в смеси CH_4/воздух не успевает перейти в детонацию [10, 25, 26]. За мембраной участок канала покрывали слоем угольной пыли, наносили на часть поверхности угольной пыли связующий инертный раствор и размещали внутри канала средства ослабления взрыва [10, 25–28]. Подобные исследования чрезвычайно трудоёмкие, затратные и не дают информации о сверхзвуковых взрывных волнах и детонационных процессах в смесях метана и двухтопливных смесях метана с углем [29].

Затухание и возбуждение взрывных и детонационных волн ДВ в запылённых средах исследовали, например, в [3, 4, 17–22, 39, 40–45]. В [40, 41] для предотвращения и тушения пожаров предложен химикокинетический подход. Чтобы обеспечить взрывобезопасность в шахте при динамических процессах необходимо получить данные о сравнительной химической активности метана и угольной пыли [46]. Для решения этой задачи достаточно в экспериментах на ударной трубе, которые гораздо менее трудоёмкие, чем натурные испытания, сравнить между

собой параметры волн горения и детонации в бедных по метану смесях и в тех же смесях метана с угольной пылью. Цель исследования – получить в указанных выше смесях при различной энергии инициирования экспериментальные данные о параметрах и структуре волн горения и детонации, начиная с момента их возбуждения [29]. Полученные результаты изложены в разделе 3.1 (работы [29, 47]).

Постановка эксперимента

Трубу вакуумировали и заполняли смесями (CH_4/O_2, CH_4/Air, O_2), либо теми же газами со взвесью угля до начального давления p_0 = 0,025÷0,1 МПа. Масса m и среднеобъёмная концентрация ρ частиц угольной пыли в трубе изменялись в диапазонах 0,6÷15,7 г и 23÷700 г/м^3. Температура самовоспламенения и горения угля соответственно 400 и 470 °С.

СИ заполняли смесью C_2H_2+2,5O_2 при начальном давлении p_{0i} = 0,05÷0,36 МПа и инициировали искровыми разрядами. Скорость взрывных волн, получаемых от СИ, на верхнем участке РС 1000÷1400 м/с. Волны горения инициировали искровыми разрядами (в этом случае диафрагмы между секциями не устанавливали) [29].

Результаты экспериментов

I. Детонация в газовых CH_4/O_2 и гетерогенных CH_4/O_2/уголь смесях

I. 1. Детонация; в РС CH_4+11,346O_2, (CH_4+11,346O_2)/уголь; p_0 = 0,10 МПа

А). Для бедной по горючему смеси CH_4+11,346O_2 расчётная скорость детонации D_0 ≈ 1640 м/с, эффективная длина зоны реакции (размер детонационной ячейки) a ≈ 30 мм [49]. После детонационного сгорания смеси C_2H_2+2,5O_2 в СИ при p_{0i} = 0,15 МПа (w_i ≈ 11,5 МДж/м^2) и разрыва диафрагм в исследуемой газовой смеси возбуждается ускоряющаяся ДВ. Скорости волны на базах Д1÷Д8: D_{12} ≈ 1200, D_{24} ≈ 1182, D_{34} ≈ 1170, D_{45} ≈ 1263, D_{67} ≈ 1626, D_{78} ≈ 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 ударная волна. Здесь и в дальнейших опытах из-за изменения массовой скорости и давления встречного потока скорость отражённой УВ возрастает (D_{87} ≈ 927, D_{76} ≈ 952 м/с). При большей энергии инициирования (p_{0i} = 0,2 МПа, w_i ≈ 15,3 МДж/м^2) ДВ распространяется почти стационарно: D_{12} ≈ 1714, D_{24} ≈ 1612, D_{34} ≈ 1592, D_{45} ≈ 1600, D_{67} ≈ 1570, D_{78} ≈ 1562 м/с. Скорости отражённой УВ D_{87} ≈ 767, D_{76} ≈ 816 м/с [29].

Б). В РС в смесь CH_4+11,346O_2 при p_0 = 0,10 МПа для стехиометрии необходимо добавить 10,6 г углерода, в результате получится стехиометрическая смесь состава CH_4+11,346O_2+9,346C. Этому количеству углерода соответствует масса угольной взвеси m ≈ 13,5 г (ρ ≈ 603 г/м^3).

Инициирование аналогично п. А, при p_{0i} = 0,15 МПа в ДГС (CH_4+11,346O_2)/уголь, $\rho \approx 190$ г/м^3, ДВ уже 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 отражённой 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 проявляет себя частично как химически инертная среда: в ДВ происходит потеря импульса, и скорость детонации в конце трубы становится меньше, чем в газовой смеси приблизительно на 20 м/с [29].

При более сильном инициировании (p_{0i} = 0,20 МПа, $w_i \approx 15{,}3$ МДж/м^2) и $\rho \approx 248$–260 г/м^3 ДВ распространяется также практически стационарно: $D_{12} \approx 1670 \pm 5$, $D_{24} \approx 1652 \pm 20$, $D_{45} \approx 1656 \pm 13$, $D_{67} \approx 1614 \pm 5$, $D_{78} \approx 1633 \pm 10$ м/с. Свечение в волне (длительность > 3 мс) ещё больше возрастает и превышает по интенсивности и длительности свечение в газовой смеси (рисунок 3.1.1). Здесь и далее скачок давления по вертикали для датчиков $\Delta p = p - p_0$. Скорости отражённой 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^3 на 14–20 % и при $\rho \approx 248$–260 г/м^3 на 30–70 % по сравнению с давлением на фронте ДВ в газовой смеси CH_4+11,346O_2.

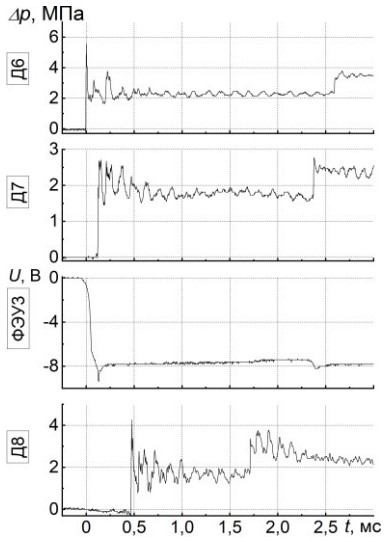


Рисунок 3.1.1 – Осциллограммы давления и свечения в ДВ, ДГС (CH_4+11,346O_2)/уголь при $\rho \approx 260$ г/м^3, p_0 = 0,10 МПа, p_{0i} = 0,20 МПа, $w_i \approx 15{,}3$ МДж/м^2. Экспериментальные скорости $D_{12} \approx 1667$, $D_{24} \approx 1681$, $D_{34} \approx 1669$, $D_{45} \approx 1622$, $D_{67} \approx 1613$, $D_{78} \approx 1643$ м/с

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 ударная волна. 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 [29].

После опытов увеличивается доля частиц примеси с идеальной сферической формой размером от долей до десятков мкм (рисунок 3.1.2 *а*, *б*). Эти частицы успевают прогреться в волне детонации и расплавиться, после чего приобретают за счёт сил поверхностного натяжения форму шара и сохраняют её при остывании. Аналогичные сферические частицы наблюдаются и в описанных ниже опытах [29].

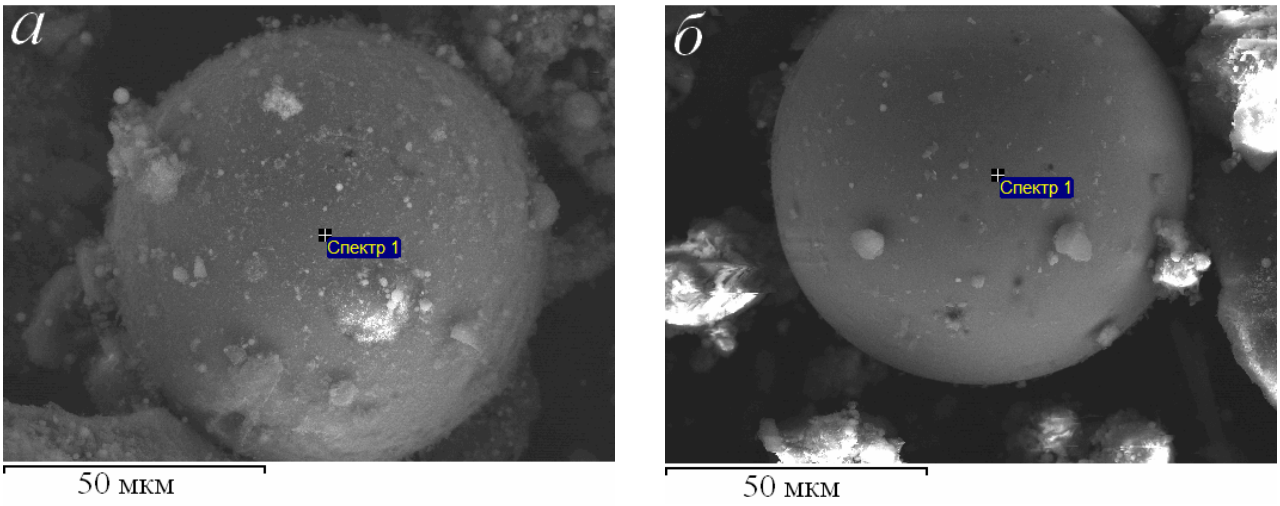


Рисунок 3.1.2 – Крупные (80–85 мкм) и мелкие (1–2 мкм) сферические частицы примеси в угле, образовавшиеся после воздействия на них детонационной волны в гибридной смеси (CH_4+11,346O_2)/уголь: *а* –$\rho \approx$ 190 г/м^3; *б* – $\rho \approx$ 260 г/м^3

I. 2. Детонация; в РС CH_4+11,346O_2, (CH_4+11,346O_2)/уголь; низкие давления p_0 = 0,025 МПа

А). Для выяснения влияния длины зоны реакции на параметры детонации выполнены эксперименты при пониженных начальных давлениях в РС. Инициирование детонации в газовой смеси CH_4+11,346O_2 осуществляли аналогично п. I.1, p_{0i} = 0,1 МПа. Свечение за фронтом проходящей ДВ на нижнем участке трубы длится примерно 1,5 мс, что соответствует области размером 2,3 м (рисунок 3.1.3*а*, ФЭУ3), здесь при p_0 = 0,025 МПа $a \approx$ 120 мм (*a* увеличивается обратно пропорционально p_0). Волна детонации распространяется в спиновом режиме с частотой вращения «головы» $f_{16\div8} \approx$ 7,41 кГц (рисунок 3.1.3*а*, Д6÷Д8). По этой частоте из соотношения акустической теории $c = \pi df/1.84$ [50] можно оценить скорость звука в продуктах газовой 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 отражённой УВ (скорости $D_{87} \approx 710$, $D_{76} \approx 724$ м/с) свечение усиливается (рисунок 3.1.3*а*, ФЭУ3) [29].

Б). При аналогичном способе инициирования ДГС свечение в зоне реакции детонационной волны и за ней усиливается по сравнению с газовой смесью из-за горения частиц угля. Время горения ДГС увеличивается, и происходит слияние сигналов свечения в падающей и отражённой волнах (рисунок 3.1.3*б*, ФЭУ3). Здесь скорости фронта ДВ: $D_{12} \approx 1714$, $D_{24} \approx 1667$, $D_{34} \approx 1669$, $D_{45} \approx 1710$, $D_{67} \approx 1538$, $D_{78} \approx 1554$ м/с, скорости отражённой УВ: $D_{87} \approx 821$, $D_{76} \approx 870$ м/с. Волна детонации в ДГС выходит на одноголовый спиновый режим с частотой вращения $f_{26\div8} \approx 7{,}94$ кГц (рисунок 3.1.3*б*, Д6–Д8). Этой частоте соответствует 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 ДГС $T_2 \approx T_1\sqrt{c_2/c_1} \approx 1.15\,T_1$ – приблизительно на 15 % превышает температуру T_1 при детонации в той же газовой смеси [29].

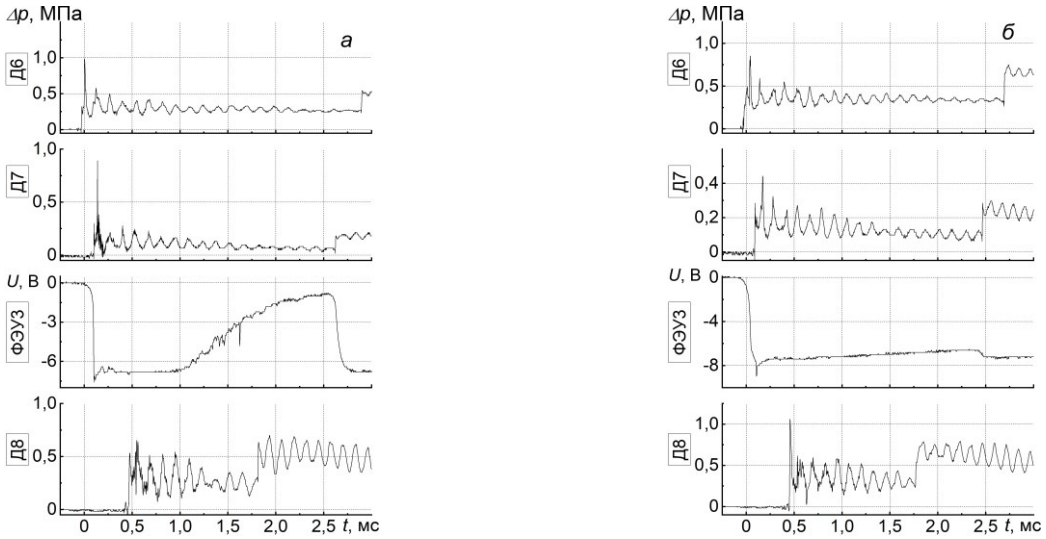


Рисунок 3.1.3 – Осциллограммы давления и свечения в ДВ при $p_0 = 0{,}025$ МПа, $p_{0i} = 0{,}1$ МПа, $w_i \approx 7{,}7$ МДж/м^2: *а* – CH_4+11,346O_2; *б* – (CH_4+11,346O_2)/уголь, $\rho \approx 80$ г/м^3

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

II. Горение, взрыв в газовых CH_4/Air и двухтопливных CH_4/Air/уголь смесях

II. 1. Горение; в СИ и РС CH_4+10,52Air или (CH_4+10,52Air)/уголь

А). Рабочая секция и секции инициирования заполнены смесью CH_4+10,52Air, диафрагмы в трубе отсутствуют, инициирование осуществляли искрой с энергией $e_i \approx 1$ Дж. Расчётные детонационные параметры для газовой смеси CH_4+10,52Air 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 [49]. Эта смесь примерно на 10 %

беднее по метану, чем стехиометрическая метановоздушная смесь CH_4+9,524 Air. В трубе d 70 мм стационарная детонация не распространяется даже в спиновом режиме, поскольку $\pi d < a$ [29].

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 околопредельном 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 $D_{24} \approx 325$, $D_{34} \approx 260$, $D_{45} \approx 120$, $D_{67} \approx 0{,}91$–$1{,}25$, $D_{78} \approx 1{,}44$ м/с, отражённая волна отсутствует.

Б). В ДГС (CH_4+10,52Air)/уголь ($\rho \approx 100 \div 546$ г/м^3) 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 более крутыми, чем в газовой смеси. Скорости фронта пламени $D_{24} \approx 13$, $D_{34} \approx 10$–13, $D_{67} \approx 1{,}43$–$1{,}82$, $D_{78} \approx 1{,}15$–$1{,}37$ м/с. В ДГС 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 [29].

II. 2. Взрывные волны; в РС CH_4+10,52Air, (CH_4+10,52Air)/уголь; p_0 = 0,1 МПа

А). Газовую смесь CH_4+10,52Air при p_0 = 0,1 МПа в РС инициировали с помощью СИ, заполненной смесью C_2H_2+2,5O_2 при p_{0i} = 0,1 МПа. При таком, более мощном, чем в п. II, 1, инициировании в РС распространяется затухающая взрывная волна. Между ФЭУ1 и ФЭУ2 скорость фронта пламени $D_{пл}$ = 600 м/с, свечение отстаёт 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} = 1000–1043, D_{24} = 878–886, D_{34} = 835–885, D_{45} = 828–857, D_{67} = 769–810, D_{78} = 767–788 м/с. В отражённой волне, распространяющейся по горячему газу, реализуется режим стационарной низкоскоростной детонации: $D_{87} \approx 1265$–1515, $D_{76} \approx 1290$–2000, $D_{54} \approx 1200$–2000, $D_{43} \approx 1150$–1620, $D_{42} \approx 1170$–1575, $D_{21} \approx 1200$–1500 м/с. Начало свечения в ДВ практически совпадает с передним ударным фронтом волны [29].

С увеличением мощности инициирования (p_{0i} = 0,2 МПа, $w_i \approx 15{,}3$ МДж/м^2) при p_0 = 0,1 МПа в ударной трубе распространяется более сильная затухающая взрывная волна, D_{12} = 1200–1333, D_{24} = 1083–1178, $D_{34} \approx 1035$–1089, D_{45} = 1043–1091, D_{67} = 910–930, D_{78} = 905–927 м/с. Газовая смесь так же, как и при p_{0i} = 0,1 МПа, сгорает частично. В отражённой волне на нижнем участке трубы (рисунок 3.1.4*а*) регистрируется низкоскоростная детонация со скоростями $D_{87} \approx 1369$–1513, $D_{76} \approx 1429$–1600 м/с и свечением на фронте. На верхнем участке трубы низкоскоростная детонация распространяется приблизительно с постоянной скоростью: $D_{54} \approx 1412$–1145, $D_{43} \approx 1362$–1669, $D_{42} \approx 1445$–1696, $D_{21} \approx 1470$–1500 м/с [29].

Б). ДГС $(CH_4+10{,}52Air)$/уголь инициировали, как и выше, газовой смесью $C_2H_2+2{,}5O_2$ с помощью СИ. При начальных условиях (p_{0i} = 0,1 МПа, p_0 = 0,1 МПа) в двухтопливной гетерогенной смеси $(CH_4+10{,}52Air)$/уголь ($m \approx 6{,}0$ г, $\rho \approx 23 \div 230$ г/м^3) свечение за взрывной волной возрастает более чем на порядок по сравнению с газовой смесью благодаря горению частиц угля. Однако из-за отрыва пламени от переднего ударного фронта на верхнем участке трубы приблизительно на 30 см горение угля начинается в этой же области, и не приводит к ускорению волны. Скорости фронта волн по длине в гетерогенной смеси ниже, чем в аналогичной газовой смеси: $D_{12} \approx$ 1000–1200, $D_{24} \approx$ 882–942, $D_{34} \approx$ 841–885, $D_{45} \approx$ 857–889, $D_{67} \approx$ 769–909, $D_{78} \approx$ 757–772 м/с. Отрыв пламени от фронта с расстоянием увеличивается, но внизу трубы за передним ударным фронтом формируется пологая волна сжатия с мощным свечением. Эта волна сжатия движется к переднему фронту, и она встречается с отражённой от торца трубы волной. Фактически отражённая волна является низкоскоростной ДВ и распространяется снизу вверх со скоростью, меньшей, чем в газовой смеси: $D_{87} \approx$ 1322–1337, $D_{76} \approx$ 1333–1429, $D_{54} \approx$ 1263–1333, $D_{42} \approx$ 1193–1423, $D_{21} \approx$ 1333–942 м/с [47].

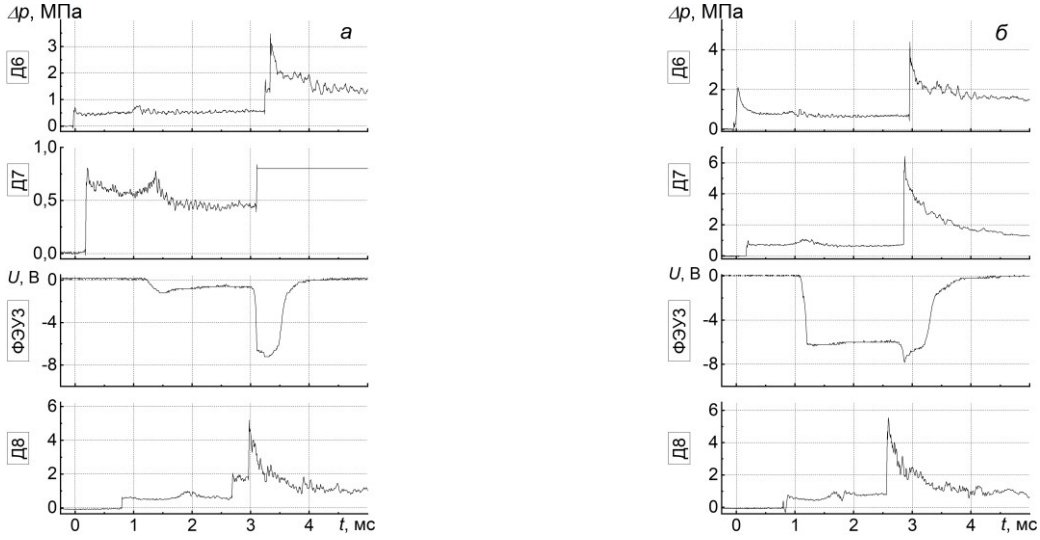


Рисунок 3.1.4 – Осциллограммы давления и свечения при p_0 = 0,1 МПа:
а – $CH_4+10{,}52Air$, p_{0i} = 0,2 МПа; *б* – $(CH_4+10{,}52Air)$/уголь, p_{0i} = 0,2 МПа, $\rho \approx 530$ г/м^3

При более мощном инициировании (p_{0i} = 0,2 МПа) в гетерогенной смеси ($\rho \approx 8 \div 530$ г/м^3) происходят качественные и количественные изменения, и резко усиливается свечение за фронтом волны (см. рисунок 3.1.4*б*). Взрывная волна также является затухающей, но скорости волн возрастают по сравнению со случаем инициирования при p_{0i} = 0,1 МПа: $D_{12} \approx$ 1200–1333, $D_{24} \approx$ 1054–1089, $D_{34} \approx$ 1005–1089, $D_{45} \approx$ 1000–1091, $D_{67} \approx$ 901–917, $D_{78} \approx$ 885–927 м/с [29].

В нижней части трубы за фронтом УВ формируется волна сжатия со свечением. Отражённая волна является детонационной и распространяется с более высокой, чем при

p_{0i} = 0,1 МПа, скоростью – $D_{87} \approx$ 1513–1983, $D_{76} \approx$ 1429–2000 м/с, и наблюдается мощное свечение во фронте отражённой ДВ. На верхнем участке трубы скорость ДВ $D_{54} \approx$ 1412–1500, $D_{43} \approx$ 1522–1630, $D_{42} \approx$ 1444–1696, $D_{21} \approx$ 1500–1520 м/с. Здесь нижним параметрам скорости отражённой волны соответствует наименьшая концентрация угольной взвеси ($\rho \approx 8$ г/м^3). При столь низком значении ρ параметры падающей и отражённой волн определяются газовой смесью CH_4+10,52Air [29].

Угольная смесь горит в падающей и отражённой от нижнего торца трубы детонационной волне. Параметры второй (отражённой) волны, распространяющейся от верха к низу трубы при $\rho \approx 23 \div 230$ г/м^3 и p_{0i} = 0,1 МПа: $D_{12} \approx$ 1714–2014, $D_{67} \approx$ 1797–1982, $D_{78} \approx$ 1818–2000 м/с. Отражённая волна при $\rho \geq 23$ г/м^3 являются детонационной волной, и поддерживается горением угольных частиц. Однако при $\rho \approx 8$ г/м^3 взвесь угля практически не влияет на скорости отражённой волны $D_{12} \approx 860$, $D_{24} \approx 890$ м/с, соответствующие ударной волне без энерговыделения [29].

Параметры первой взрывной волны в газовой смеси и ДГС возрастают с увеличением энергии инициирования. Во всех опытах с взвесями угля при $\rho \geq 23$ г/м^3 скорость отражённой детонационной волны на 400–600 м/с больше, чем в аналогичной газовой смеси при тех же начальных условиях. Первая и вторая отражённые волны являются детонационными. В ДГС значительная часть угля оседает на нижний фланец и наблюдается частичное сгорание угля. Доля сгоревшего угля обычно не превышает 20 % от стехиометрии и зависит от величины ρ [29].

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.

III. Низкоскоростная детонация, в РС (CH_4+2O_2+6N_2)/уголь

А). В газовой смеси CH_4+2O_2+6N_2 горючее и окислитель находятся в стехиометрическом соотношении, расчётные параметры детонации Чепмена–Жуге: D_0 = 1867 м/с, $a \approx$ 83 мм [49]. Смесь инициировали с помощью СИ, заполненной смесью C_2H_2+2,5O_2. Опытным путём установлено оптимальное начальное давление в СИ p_{0i} = 0,25 МПа, при котором ДВ распространяется по всей трубе практически стационарно: $D_{12} \approx$ 1765–1935, $D_{24} \approx$ 1848–1857, $D_{34} \approx$ 1822–1848, $D_{45} \approx$ 1714–1875, $D_{67} \approx$ 1818–1852, $D_{78} \approx$ 1831–1855 м/с. Профили давления в ДВ имеют характерный «химпик»: скачок давления на ударном фронте примерно в два раза превышает давление в конце зоны реакции (рисунок 3.1.5*а*). Начало сигнала свечения практически совпадает с ударным фронтом. Экспериментально измеренная по профилям давления длина зоны реакции 37–56 мм. Частота пульсаций свечения и давления в ДВ $f \approx$ 7,81–

8,13 кГц. Отражённая волна – это УВ с прямоугольным профилем давления, $D_{87} \approx 871$–878, $D_{76} \approx 909$–917 м/с (рисунок 3.1.5*а*) [29].

Б). Из описанных выше опытов с ДГС следует, что метан химически более активен и сгорает быстрее, чем угольная взвесь. Поэтому логично предположить, что в смеси (CH_4+$2O_2$+$6N_2$)/уголь взвесь угля будет себя вести как инертная завеса. Однако результаты экспериментов оказались более сложными и неоднозначными [29].

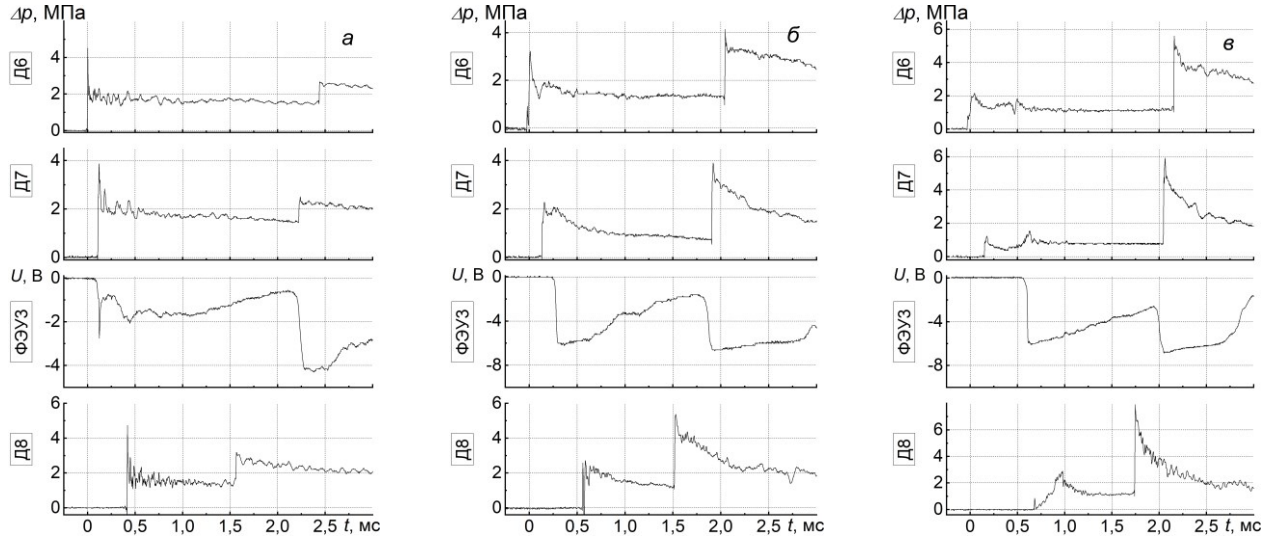


Рисунок 3.1.5 – Осциллограммы давления и свечения в падающих детонационных и отражённых волнах при $p_0 = 0{,}1$ МПа, $p_{0i} = 0{,}25$ МПа, $w_i \approx 19{,}2$ МДж/м^2: *а* – газовая смесь CH_4+$2O_2$+$6N_2$; *б*, *в* – гибридная смесь (CH_4+$2O_2$+$6N_2$)/уголь; $\rho \approx 180$ г/м^3 (*б*), $\rho \approx 515$ г/м^3 (*в*)

Например, в опытах наблюдались такие закономерности. Если скорость ДВ к концу трубы спадала примерно до 1300–1500 м/с, то отражённая волна также являлась волной низкоскоростной детонации с «химпиком», и распространялась примерно с такой же скоростью $D_{87} \approx 1495$–1370 м/с, $D_{76} \approx 1470$–1430 м/с (рисунок 3.1.5*б*). Но если волна затухала ещё сильнее до $D_{78} \approx 1100$ м/с ($\rho \approx 515$ г/м^3), то после её отражения возбуждалась сильная детонационная волна ($D_{87} \approx 1898$, $D_{76} \approx 1818$ м/с) с «химпиком» (рисунок 3.1.5*в*). При этом начало зоны свечения в отражённой волне практически совпадало с передним фронтом детонации [29].

В падающей ДВ в конце трубы зона реакции отрывается от переднего фронта на 150–500 мкс (20–55 см), профиль давления вблизи переднего фронта неустойчивый, в начальной области светящейся зоны пламени давление плавно возрастает (рисунок 3.1.5*б*, *в*) [29].

При тех же параметрах инициирующего источника, как в п. III, А ($p_{0i} = 0{,}25$ МПа, $w_i \approx 19{,}2$ МДж/м^2), и $\rho \approx 179 \div 515$ г/м^3 скорость детонации на начальном участке ($x \le 0{,}85$ м) на 270–430 м/с меньше, чем в газовой смеси (рисунок 3.1.6). При $x \approx 2{,}3$ м скорость волны уменьшается до значений $D \approx 1150$–1300 м/с. Если $\rho < 500$ г/м^3, то на длине $2{,}3 < x \le 3$ м ДВ

ускоряется на 50–350 м/с, но затем снова замедляется вплоть до координаты $x \approx 4{,}8$ м. После $x > 4{,}8$ м волна ускоряется на 30–100 м/с.

Скорости волны по длине трубы при $p_{0i} = 0{,}25$ МПа, и $\rho \approx 179 \div 515$ г/м^3: $D_{12} \approx 1500$–1510, $D_{24} \approx 1345$–1219, $D_{34} \approx 1294$–1150, $D_{45} \approx 1333$–1142, $D_{67} \approx 1266$–1111, $D_{78} \approx 1369$–1095 м/с. Если плотность угольной взвеси возрастает до $\rho \approx 515$ г/м^3, то скорость ДВ монотонно затухает по длине трубы от $D_{12} \approx 1500$ м/с до значений $D_{78} \approx 1100$ м/с (рисунок 3.1.6).

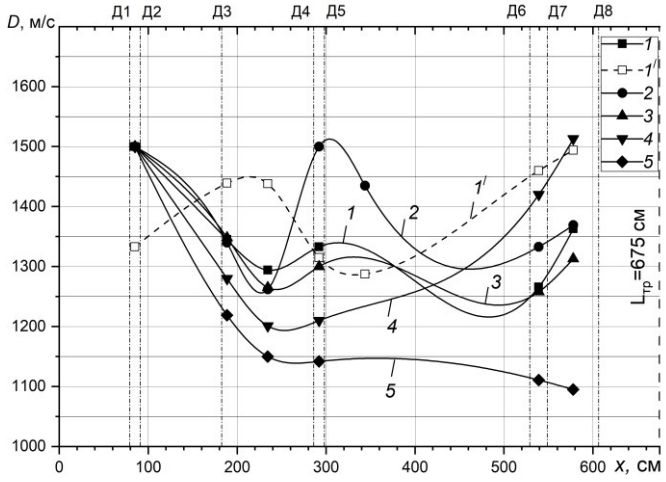


Рисунок 3.1.6 – Экспериментальные скорости падающих (*1–5*) и отражённых (*1'*) детонационных волн по длине трубы в двухтопливной гетерогенной смеси $(CH_4+2O_2+6N_2)$/уголь при $p_0 = 0{,}1$ МПа, $p_{0i} = 0{,}25$ МПа, $w_i \approx 19{,}2$ МДж/м^2 :*1*, *1'* – $\rho \approx 179$ г/м^3; *2* – $\rho \approx 248$ г/м^3; *3* – $\rho \approx 252$ г/м^3; *4* – $\rho \approx 500$ г/м^3; *5* – $\rho \approx 515$ г/м^3

Таким образом, угольная пыль ослабляет детонационную волну 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^3 угольная взвесь ослабит волну настолько, что произойдёт полное гашение ДВ [29].

IV. Взрывные волны, в РС O_2/уголь; $p_0 = 0{,}1$ МПа

Смесь инициировали с помощью СИ газовой смесью $C_2H_2+2{,}5O_2$. В объёме 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^3). Опыты проведены при $\rho \approx 230 \div 698$ г/м^3, $p_{0i} = 0{,}25 \div 0{,}36$ МПа, $w_i \approx 19{,}2 \div 27{,}6$ МДж/м^2 [29].

Величинам $p_{0i} = 0{,}25 \div 0{,}36$ МПа соответствуют скорости взрывных волн: $D_{12} \approx 1200 \div 1500$, $D_{24} \approx 1116 \div 1345$, $D_{34} \approx 1084 \div 1247$, $D_{45} \approx 1043 \div 1200$, $D_{67} \approx 851 \div 1053$, $D_{78} \approx 846 \div 976$ м/с. Т.е. взрывные волны в гетерогенной смеси O_2/уголь являются затухающими [29].

В верхней половине трубы свечение незначительно усиливается через 1–1,5 мс от фронта взрывной волны, но затем прекращается через 4–7 мс. При этом время свечения уменьшается с ростом ρ. Угольная пыль воспламеняется за фронтом взрывной волны, и это пламя распространяется с возрастающим отставанием 1–2 м от ударного фронта взрывной волны. Горение угля при этом не увеличивает давление во взрывной волне [29].

По сигналам с ФЭУ3 и Д8 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 (рисунок 3.1.7*а*). В отражённой волне начало свечения практически совпадает с ударным фронтом (рисунок 3.1.7*а*, сигналы ФЭУ3 и Д7), скорости отражённых волн $D_{87} \approx 537 \div 913$, $D_{76} \approx 663 \div 1136$ м/с [29].

Угольная взвесь даже при таких сильных параметрах инициирования ($p_{0i} = 0{,}36$ МПа) очень слабо реагирует с кислородом за фронтом взрывной волны, детонация в смеси O_2/уголь не возбуждается [29].

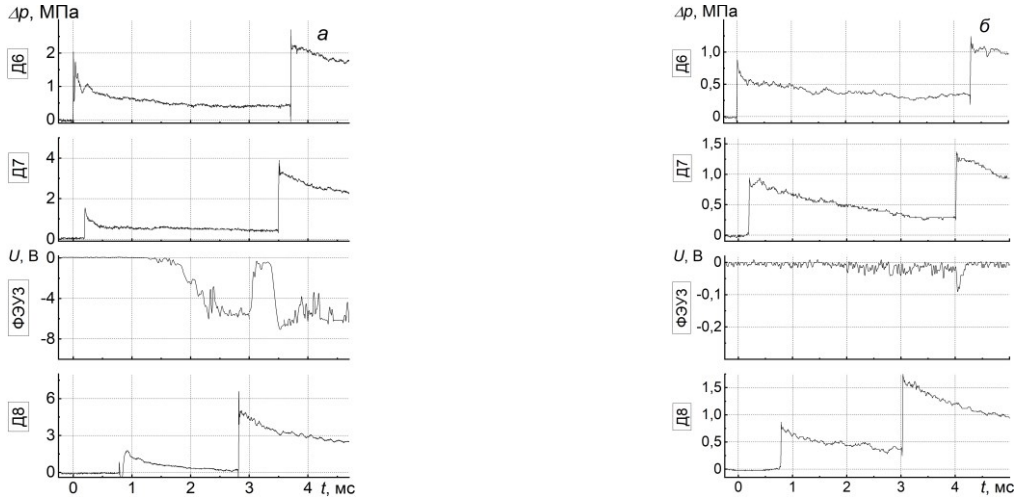


Рисунок 3.1.7 – Осциллограммы давления и свечения (ФЭУ3) во взрывной и отражённой волнах при $p_0 = 0{,}1$ МПа, $p_{0i} = 0{,}36$ Мпа, $w_i \approx 27{,}6$ МДж/м^2: *а* – смесь O_2/уголь, $m \approx 7{,}2$ г, $\rho \approx 275$ г/м^3; *б* – тестовый опыт в воздухе

В опытах, когда угольная пыль отсутствует, а РС заполнена воздухом ($p_0 = 0{,}1$ МПа, $p_{0i} = 0{,}36$ МПа), скорости первичной (от СИ) взрывной волны $D_{12} \approx 1224$–1333, $D_{24} \approx 1242$–1246, $D_{34} \approx 1091$–1200, $D_{45} \approx 1203$–1205, $D_{67} \approx 998$–1003, $D_{78} \approx 975$–986 м/с. Пламя от взрывной волны из СИ не достигает оптической секции (рисунок 3.1.7*б*). Скорости отражённых ударных волн $D_{87} \approx 575$–581, $D_{76} \approx 697$–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 дольше (около 12,5 мс), чем в смеси O_2/уголь [29].

В стехиометрической смеси O_2/C для случая, когда углерод находится по частям в газовой и конденсированной фазах при возрастании доли газовой фазы углерода от нуля до стехиометрии, расчётная скорость детонации $D_0 \approx 2050 \div 3780$ м/с [49]. Соответствующая этой фазовой доли углерода расчётная температура продуктов детонации $T_0 \approx 4000 \div 8700$K. 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 [49]). Параметры взрывной волны в гибридной смеси O_2/уголь и воздухе оказываются близкими. Скорость отражённой волны в гибридной смеси примерно на 300 м/с больше, чем в воздухе или кислороде (без угольной пыли). В отражённой волне наблюдается частичное сгорание наиболее мелких частиц угля и летучих, образовавшихся за фронтом падающей взрывной волны [29].

3.2 Детонационные волны в газовых смесях $CH_4/H_2/O_2$ и в трёхтопливных смесях $CH_4/H_2/O_2$/взвесь угля

После выброса угольного газа, содержащего преимущественно метан и частично водород, и смешения его с воздухом существует вероятность воспламенения и взрыва газовой смеси. Взрывная или ДВ, распространяясь по штреку, способна сорвать угольную пыль, образовать взвесь угольной пыли и воспламенить её, если её концентрация в воздухе превышает нижний предел взрываемости $\rho^* \approx 30–80$ г/м^3 [7, 8]. Продолжает оставаться актуальным вопрос о сравнительном влиянии на параметры взрывных и детонационных волн метана и угольной пыли [29, 46, 47, 49]. Важной задачей обеспечения безопасности работ при угледобыче является также проблема гашения волн сжатия [3, 4, 22].

До настоящего времени практически не изучены трёхтопливные смеси метан/водород/угольная пыль. Наличие в метановой газовой смеси водорода должно облегчить инициирование смеси и сделать её более взрывоопасной. В описанных ниже экспериментах в качестве окислителя использован кислород с целью сравнения экспериментальных параметров детонации с соответствующими расчётными термодинамическими параметрами детонации Чепмена–Жуге. В опытах выяснена возможность распространения детонационных волн в смесях метан/водород/кислород/угольная взвесь, изучены структура и параметры падающих ДВ и отражённых волн [30]. Основные результаты раздела 3.2 изложены в [30].

Результаты экспериментов

В качестве примера остановимся более подробно на результатах экспериментов для смесей $CH_4+2/3H_2+11O_2$ и $(CH_4+2/3H_2+11O_2)$/угольная взвесь при p_0 = 0,1, 0,05 и 0,025 МПа. Смесь $CH_4+2/3H_2+11O_2$ в 4,71 раза богаче кислородом по сравнению со стехиометрической смесью $CH_4+2/3H_2+2{,}33O_2$. Уменьшение p_0 от 0,1 до 0,025 МПа позволяет при сохранении состава смеси увеличить примерно в четыре раза размер детонационной ячейки a (эффективную длину зоны реакции). При этом одновременно должна будет увеличиваться доля сгоревшего угля в зоне реакции ДВ [30].

Ниже все расчётные термодинамические параметры детонации Чепмена–Жуге (CJ) для смесей $CH_4/H_2/O_2$ и $CH_4/H_2/O_2/C$ приведены из работы [49]. Для смеси $CH_4+2/3H_2+11O_2$ при нормальных условиях расчётные скорость детонации D_0 = 1733 м/с, давление и температура в плоскости Ч–Ж p_{CJ} = 1,68 МПа, T_{CJ} = 2798 K, $a \approx 5{,}1$ мм. Аналогичная по газовым компонентам стехиометрическая смесь с углеродом имеет состав $CH_4+2/3H_2+11O_2+8{,}67C$.

Поскольку углерода в каменном угле содержится 78,4 % [29, 47], то стехиометрическая смесь с углем имеет состав $CH_4+2/3H_2+11O_2+11{,}06$ уголь. В нашей ударной трубе объёмом V = 26,2 л для стехиометрии при p_0 = 0,1 МПа необходима масса углерода m_C = 9,04 г. Это

количество углерода содержится в угле массой m_{Coal} = 11,53 г ($\rho \approx 440$ г/м^3). Для условно гомогенной смеси CH_4+2/3H_2+11O_2+8,67C с углеродом в конденсированной фазе термодинамические расчётные параметры детонации (D_0 = 3328 м/с, p_{CJ} = 4,85 МПа, T_{CJ} = 5517 K) существенно выше, чем в смеси без углерода [30].

В опытах при p_{0i} = 0,15 МПа (w_i = 81,39 МДж) в газовой смеси CH_4+2/3H_2+11O_2 и в этой же смеси с угольной взвесью всегда возбуждается детонация. Скорость ДВ D устанавливается с начального участка и незначительно меняется по длине трубы [30].

С изменением p_0 от 0,1 до 0,025 МПа скорости установившейся детонации для газовых смесей уменьшаются в диапазоне $D \approx$ 1760÷1690 м/с, для гетерогенных смесей соответственно $D \approx$ 1800÷1740 м/с. Значения D для газовой смеси близки к расчётной скорости детонации D_0 =1733 м/с [30].

На рисунке 3.2.1 приведены осреднённые по нескольким опытам на каждом участке измерения значения D для падающих ДВ и отражённых волн (ОВ) при p_0 = 0,1 МПа (здесь $\rho \approx$ 290÷390 г/м^3). Аналогичные кривые осреднённых скоростей приведены для p_0 = 0,1÷0,025 МПа и $\rho \approx$ 0÷390 г/м^3 на рисунке 3.2.2. Здесь в смесях с угольной взвесью скорость падающей ДВ на 40–80 м/с выше, чем в газовых смесях, но существенно (примерно на 1500 м/с) ниже расчётной термодинамической скорости детонации D_0. Это объясняется тем, что частицы угля хоть и воспламеняются в зоне реакции ДВ, но из-за их медленного и неполного сгорания энергия выделяется значительно меньшая, чем это предполагается в термодинамических расчётах с углеродом [30].

Скорости отражённых волн в смесях с угольной взвесью выше, чем в газовых смесях (рисунок 3.2.1 и 3.2.2) за счёт дополнительного горения частиц угля. Скорости ОВ изменяются от $D' \approx$ 650–990 м/с до $D' \approx$ 1200–1250 м/с. Рост скорости ОВ в обратном направлении при удалении от торца трубы объясняется замедлением встречного потока продуктов детонации. С увеличением концентрации взвеси угля при всех p_0 = 0,1÷0,025 МПа наблюдается небольшое уменьшение D из-за торможения потока о частицы угля [30].

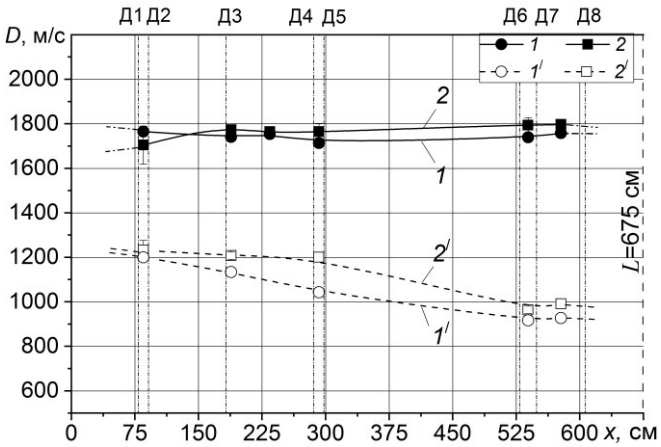


Рисунок 3.2.1 – Осреднённые скорости детонационных (*1*, *2*) и отражённых (*1'*, *2'*) волн по длине трубы при p_0 = 0,1 МПа:*1*, *1'* – CH_4+2/3H_2+11O_2; *2*, *2'* – (CH_4+2/3H_2+11O_2)/угольная взвесь, $\rho \approx 290 \div 390$ г/м^3

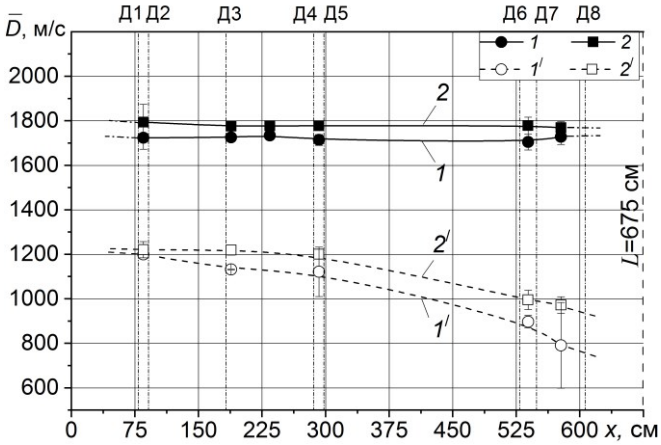


Рисунок 3.2.2 – Осреднённые скорости детонационных (*1*, *2*) и отражённых (*1'*, *2'*) волн по длине трубы при p_{0i} = 0,1 и 0,15 МПа, p_0 = 0,1÷0,025 МПа: *1*, *1'* – CH_4+2/3H_2+11O_2, *2*, *2'* – (CH_4+2/3H_2+11O_2)/угольная взвесь, $\rho \approx 160 \div 390$ г/м^3

Влияние плотности угольной взвеси на скорость падающей детонационной волны и скорость отражённой волны по длине трубы показано на рисунке 3.2.3. Здесь $D_1 > D_2$ на всех участках измерения – с ростом величины ρ ($\rho_1 \approx 290$ г/м^3, $\rho_2 \approx 390$ г/м^3) потери импульса, которые идут на разгон частиц угля, преобладают над увеличением энерговыделения [30].

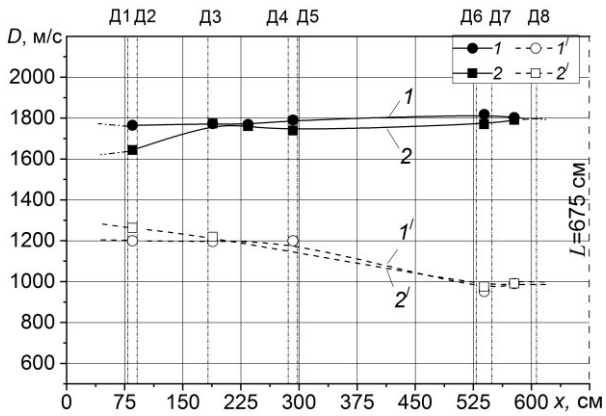


Рисунок 3.2.3 – Скорости детонационных (*1*, *2*) и отражённых (*1'*, *2'*) волн по длине трубы в системах (CH_4+2/3H_2+11O_2)/угольная взвесь при p_0 = 0,1 МПа: *1*, *1'*– $\rho \approx$ 290 г/м^3, *2*, *2'* – $\rho \approx$ 393 г/м^3

В газовых смесях $CH_4/H_2/O_2$ с изменением p_0 все расчётные параметры детонации (кроме a и E) меняются незначительно, величина $a \sim 1/p_0$ (таблица 3.2.1). Здесь Q_{gd} – тепловыделение в зоне реакции, E_3 и E_1 – критические энергии инициирования сферической и плоской волны детонации. В богатых по кислороду смесях с уменьшением доли H_2 в смеси и увеличением доли O_2 наблюдается уменьшение интенсивности ДВ (убывают D_0, p_{CJ}/p_0, T_{CJ}, Q_{gd}) и увеличиваются E_3, E_1. Рост доли водорода в смеси существенно уменьшает энергию инициирования, газовая смесь становится более взрывоопасной. С уменьшением p_0 параметры D_0, p_{CJ}/p_0, T_{CJ}, Q_{gd} незначительно убывают, но существенно увеличиваются E_1 и особенно E_3 [30] (таблица 6).

Таблица 3.2.1 – Расчётные термодинамические параметры детонации для смесей $CH_4/H_2/O_2$ при p_0 = 0,1÷0,025 МПа [49].

Смесь	p_0, МПа	D_0, м/с	p_{CJ}/p_0	T_{CJ}, К	Q_{gd}, кал/г	a, мм	E_3, Дж	E_1, Дж/см^2
CH_4+5O_2+2H_2	0,1	2239	21,9	3535	995	1,3	7,1	1,1
CH_4+5O_2+2H_2	0,05	2213	21,4	3428	952	2,8	42	1,3
CH_4+5O_2+2H_2	0,025	2186	20,9	3323	912	6,3	250	1,4
CH_4+5,5O_2+2/3H_2	0,1	2022	21,3	3343	803	2	47,3	2,2
CH_4+5,5O_2+2/3H_2	0,05	2001	20,9	3255	773	4,5	276	2,5
CH_4+5,5O_2+2/3H_2	0,025	1979	20,5	3168	744	10	1640	2,9
CH_4+11O_2+2/3H_2	0,1	1733	16,8	2798	550	5,1	944	6
CH_4+11O_2+2/3H_2	0,05	1723	16,6	2761	539	10,6	4361	6,3
CH_4+11O_2+2/3H_2	0,025	1711	16,5	2720	528	22	2070	6,8

Типичные профили давления и свечения на нижнем участке трубы для газовых и гетерогенных газоугольных систем приведены на рисунке 3.2.4. Профили давления для ДВ во всех системах имеют характерный химпик, начало свечения практически совпадает с фронтом ДВ (здесь $\Delta p = p - p_0$). Отражённая от нижнего торца трубы волна (вторая волна на

осциллограммах) – это взрывная волна примерно с прямоугольным профилем давления. В газовых смесях без взвеси частиц угля свечение в ДВ короткое и длится около 0,5 мс (рисунок 3.2.4а), в системах (CH_4+11O_2+2/3H_2)/(угольная взвесь) свечение более длительное (1–2 мс) (рисунок 3.2.4*б*, *в*) из-за горения частиц угля не только в зоне реакции, но и за зоной реакции [30].

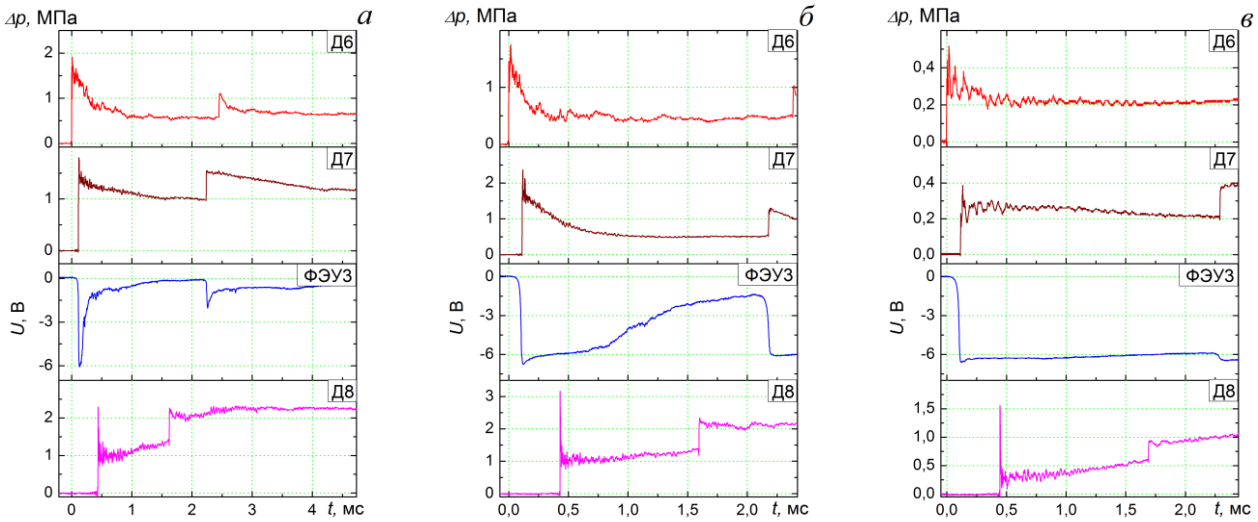


Рисунок 3.2.4 – Профили давления и свечения в падающей детонационной и отражённой волнах на нижнем участке ударной трубы: *а* – CH_4+11O_2+2/3H_2, p_0 =0,1 МПа; *б* – (CH_4+11O_2+2/3H_2)/уголь, p_0 = 0,1 МПа, $\rho \approx 290$ г/м^3; *в* – (CH_4+11O_2+2/3H_2)/уголь, p_0 = 0,025 МПа, $\rho \approx 198$ г/м^3

Результаты измерения относительного давления p_2/p_0 в ударной трубе после опытов представлены на рисунке 3.2.5. По величине p_2/p_0 можно судить о степени сгорания частиц угля в ДВ – чем больше p_2/p_0, тем выше степень сгорания угля. Доля сгоревшего угля в опытах обычно не превышает 20 % от стехиометрического количества [30].

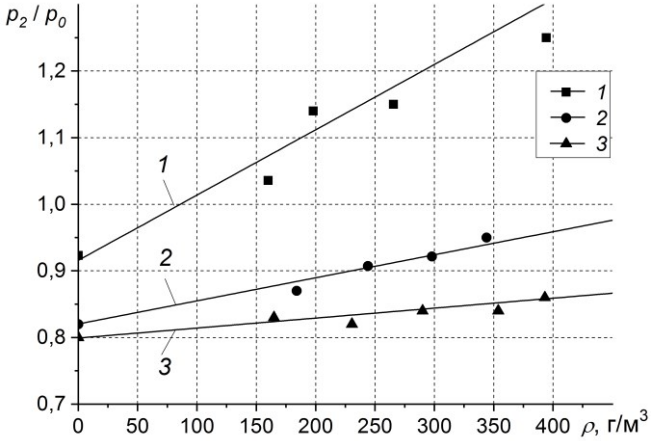


Рисунок 3.2.5 – Изменение относительного давления после опыта в зависимости от концентрации угля: *1* – p_0 = 0,025 МПа, 2 – p_0 = 0,05 МПа, 3 – p_0 = 0,1 МПа

Здесь видно, что p_2/p_0 и степень сгорания частиц угля возрастают с уменьшением p_0 из-за увеличения длины зоны реакции. При фиксированном начальном давлении величина p_2/p_0 увеличивается с ростом ρ из-за возрастания числа мелких частиц угля [30].

3.3 Структура ударных и детонационных волн в газовых смесях CH_4/H_2/воздух и трёхтопливных смесях CH_4/H_2/воздух/взвесь угля

Считается, что основные типы взрывов в угольных шахтах – это взрывы метановоздушных смесей, угольных взвесей в воздухе и смесей метан/воздух/угольная взвесь [7, 9, 51]. Чтобы не допустить развития катастрофы, взрывную или детонационную волну ДВ в смесях с угольным газом (метан и частично водород) лучше гасить на начальной стадии её формирования и распространения. Для этого необходимо исследовать взрывные и детонационные волны в смесях CH_4/H_2/воздух и CH_4/H_2/воздух/взвесь угля с момента инициирования.

В [52] сделана попытка сравнить влияние метана и угольной пыли на параметры детонации. Ответ на этот вопрос получен в [29, 47] при измерении параметров волн горения и детонации в бедных по метану смесях и в тех же смесях метана с угольной пылью. В [29, 47] экспериментально доказано, что в смесях CH_4/воздух/уголь скорость детонации определяется в основном метаном, сгорание угольной пыли в зоне реакции неполное.

В разделе 3.3 выясняется возможность распространения взрывных и детонационных волн в смесях CH_4/H_2/воздух, CH_4/H_2/воздух/угольная пыль, изучается структура и параметры ДВ в этих многотопливных смесях, устанавливается сравнительный вклад в энерговыделение горючих газов и угольных частиц. В частности, исследуется роль водорода при инициировании и сгорании метановоздушных и гибридных смесей. Для разработки мер безопасности в шахте большое значение имеет изучение не только падающих, но и отражённых волн сжатия [53]. Этой проблеме ниже также уделено внимание. Основные результаты раздела 3.3 опубликованы в работах [32, 53].

Постановка экспериментов

Трубу вакуумировали, затем заполняли газовзвесью до p_0 = 0,1 МПа в течение времени t_0 = 20–100 с. Среднеобъёмная концентрация частиц пыли в трубе $\rho \approx 95 \div 560$ г/м^3. Величина ρ зависит от скорости заполнения трубы газовзвесью. На стенках трубы и нижнем фланце за время t_0 оседает 0,2÷1,2 г угля – это меньше 5÷12 % от массы угля в трубе. Время полного оседания угольной пыли на нижний фланец примерно на порядок больше t_0. При расчёте величины ρ учитывалось количество осевшей на стенки пыли, погрешность измерения $\rho \le 10$ %.

Газовзвеси инициировали детонационными волнами из двух секций инициирования (СИ) со смесью C_2H_2+2,5O_2 при начальном давлении p_{0i} = 0,2÷0,3 МПа (удельная энергия инициирования $w_i = 4q_i / \pi d^2 \approx 15{,}5 \div 23{,}1$ МДж/м^2, где q_i – энергия, выделяющаяся в СИ. Секции инициирования отделяли от ударной трубы лавсановыми диафрагмами, продукты детонации в СИ имели температуру ~ 4000K.

После опыта измеряли давление в трубе p_2, массу угольных частиц m_0, поступивших в трубу (по расходу угольного порошка в контейнере), массу осевшего на нижний фланец угля m_1, а также массу m_2 угольного порошка на стенках трубы. Величину m_2 определяли путём взвешивания ветоши при трёхкратной протирке трубы [53].

Результаты экспериментов

В опытах исследовали смеси с избытком воздуха CH_4+nH_2+mAir (n = 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, m = 10,52, 12; Air – это $0{,}21O_2+0{,}79N_2$) и те же газовые смеси с взвесями угля. Параметры детонации Чепмена–Жуге в газовых смесях и газовзвесях для всех n и m рассчитаны при нормальных условиях [53] по равновесной термодинамической модели [49].

Смеси $CH_4+0{,}1H_2+10{,}52$Air, ($CH_4+0{,}1H_2+10{,}52$Air)/уголь

В $CH_4+0{,}1H_2+10{,}52$Air мольная доля H_2 в смеси двух горючих газов $a_{H2} = n/(n+1) \approx 0{,}091$, коэффициент избытка воздуха $h = (m–m_{st})/m_{st}$ = 7,8 % (коэффициент стехиометрии m_{st} = 9,762), расчётные скорость детонации D_0 = 1782 м/с, a = 185 мм.

Для стехиометрической смеси $CH_4+0{,}1H_2+10{,}52$Air$+0{,}159$C расчётные D_0 = 1860 м/с, a = 96 мм. В угле содержится 78,4 % углерода [29, 47], стехиометрическая смесь с углем имеет состав $CH_4+0{,}1H_2+10{,}52$Air$+0{,}203$Coal. В объёме трубы масса стехиометрической угольной взвеси $m^{st}_{coal} \approx 0{,}18$ г, $\rho_{st} \approx 6{,}9$ г/м^3. В наших опытах газовзвеси при всех n, m и ρ переобогащены угольной взвесью в 15–80 раз.

Если в СИ p_{0i} = 0,25 МПа ($w_i \approx 19{,}3$ МДж/м^2), то в смеси $CH_4+0{,}1H_2+10{,}52$Air всегда регистрируется затухающая взрывная волна (рисунок 3.3.1*а÷в*). Здесь *а÷в* соответствуют записям сигналов с трёх 4–х лучевых осциллографов. Скорость волны D_1 уменьшается по длине трубы от 1500 м/с до 1160 м/с, а передний фронт зоны свечения во взрывной волне постепенно удаляется от ударного фронта. На датчике Д7 фронт свечения отстаёт от ударного фронта по времени на $\Delta\tau_{f7} \approx 440$ мкс, по расстоянию на $\Delta l_{f7} \approx 0{,}51$ м. Зоне свечения соответствует небольшой подъём давления – вторичная волна сжатия (рисунок 3.3.1*в*) [53]. На рисунке 3.3.1*а÷в* отражённая волна – низкоскоростная ДВ. Скорость отражённой волны D_2 возрастает в обратном направлении по длине трубы от 1430 м/с до 1500–1535 м/с.

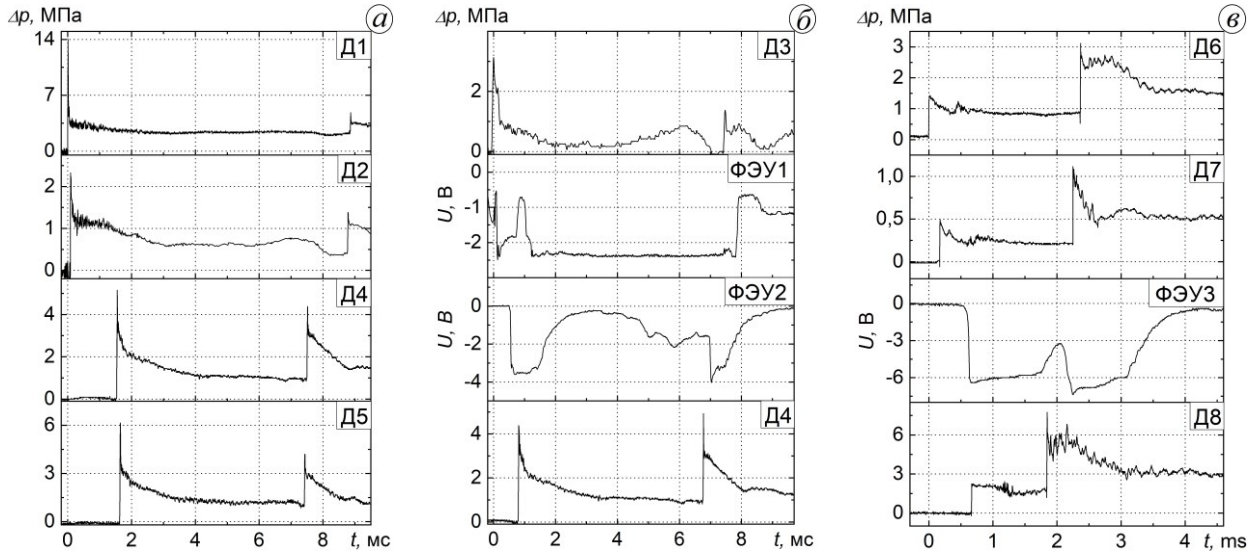


Рисунок 3.3.1 – Профили давления и свечения в смеси CH_4+0,1H_2+10,52Air при p_{0i} = 0,25 МПа, $w_i \approx$ 19,3 МДж/м^2. Падающая волна – затухающая взрывная волна со скоростями D_1 = 1500, 1345, 1263, 1294, 1170, 1162 м/с. Отражённая волна – низкоскоростная ДВ со скоростями D_2 = 1505, 1429, 1412, 1535, 1500 м/с

При увеличении энергии инициирования (p_{0i} = 0,3 МПа, $w_i \approx$ 23,1 МДж/м^2) в смеси CH_4+0,1H_2+10,52Air всегда возбуждается детонация ($D_1 \approx$ 1770–1800 м/с $\approx D_0$), на фронте ДВ регистрируется характерный для газовой детонации химпик (рисунок 3.3.2*а*÷*в*). Во второй половине трубы падающая ДВ выходит на спиновый режим с вращающейся поперечной волной. При прохождении поперечной волны через какой–либо из датчиков Д6÷Д8 (это случайное событие), на переднем фронте падающей ДВ существенно возрастает скачок давления (рисунок 3.3.2*в*, рисунок 3.3.3*в*). Датчики Д6÷Д8 регистрируют также колебания давления за фронтом детонации, соответствующие вращающемуся шлейфу за фронтом ДВ. Период акустических колебаний давления на датчике Д8 от вращающегося шлейфа за фронтом детонации $T_{18} \approx$ 127,5 мкс (рисунок 3.3.2*в*, рисунок 3.3.3*в*) [32].

Отражённая от торца трубы волна – это ударная волна ($D_2 \approx$ 870÷1300 м/с). Амплитуда акустических колебаний за фронтом падающей ДВ усиливается к концу трубы (см. сигналы с Д8 на рисунке 3.3.2*в* и 3.3.3*в*). Период акустических колебаний в отражённой волне $T_{28} \approx$ 110 мкс (на 13 % меньше периода в падающей волне). По акустической теории скорость звука $c = \pi df/1.84$, где частота $f = 1/T$ [50]. В падающей ДВ $f_{18} = 1/T_{18} \approx$ 7,843 кГц, в отражённой волне $f_{28} \approx$ 9,091 кГц, т. е. $c_1 \approx$ 937 м/с, $c_2 \approx$ 1087 м/с. Скорость звука и температура в отражённой волне выше, чем в падающей ДВ из-за дополнительного нагрева газа в отражённой волне.

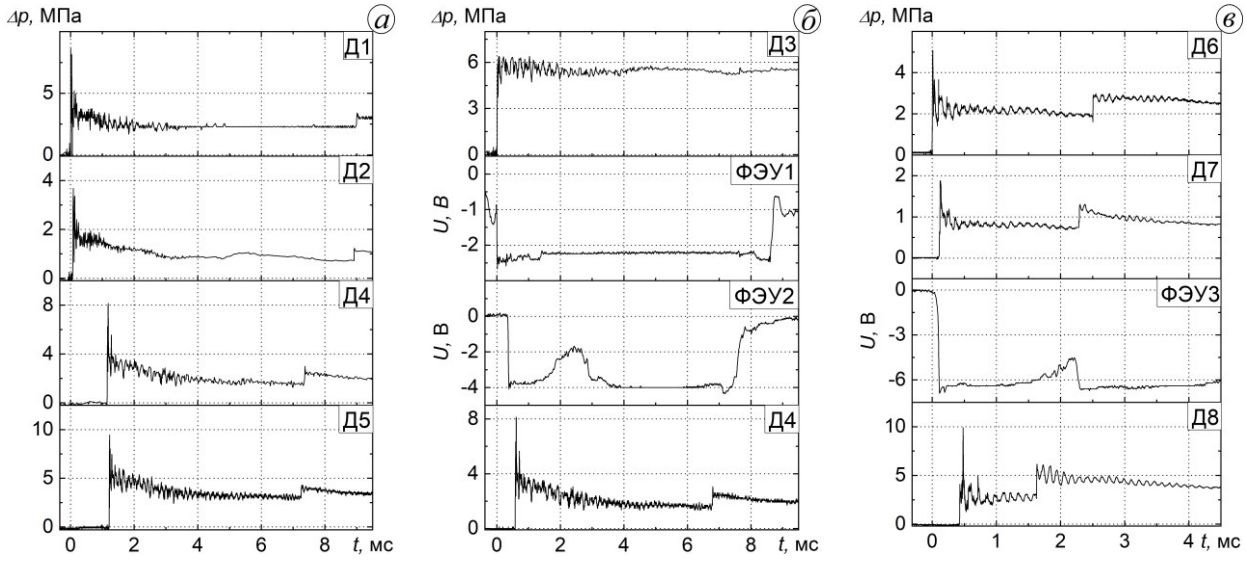


Рисунок 3.3.2 – Профили давления и свечения в смеси CH_4+0,1H_2+10,52Air при p_{0i} = 0,3 МПа, $w_i \approx$ 23,1 МДж/м^2. Падающая волна – ДВ со скоростями D_1 = 1715, 1822, 1846, 1848, 1770, 1797 м/с. Отражённая волна – это УВ со скоростями D_2 = 871, 909, 1091, 1258, 1304 м/с

Такие же (как и в газовой смеси) режимы с падающей затухающей взрывной волной и самоподдерживающейся ДВ регистрируются в смесях (CH_4+0,1H_2+10,52Air)/уголь при p_{0i} = 0,25 МПа и 0,3 МПа соответственно. Профили давления в ДВ для газоугольной взвеси приведены на рисунке 3.3.3 при p_{0i} = 0,3 МПа. Здесь ДВ, как и в газовой смеси, распространяется во второй половине трубы в спиновом режиме $f_{18} \approx$ 7,692 кГц, в отражённой волне $f_{28} \approx$ 8,929 кГц, т. е. $c_1 \approx$ 919 м/с, $c_2 \approx$ 1067 м/с, свечение в волне по сравнению с детонацией в газовой смеси не усиливается (рисунок 3.3.3*в*). Скорости детонационной волны ($D_1 \approx$ 1740–1900 м/с), отражённой волны ($D_2 \approx$ 800–1200 м/с) и профили давления примерно такие же, как и в аналогичной газовой смеси без угля. 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 [53].

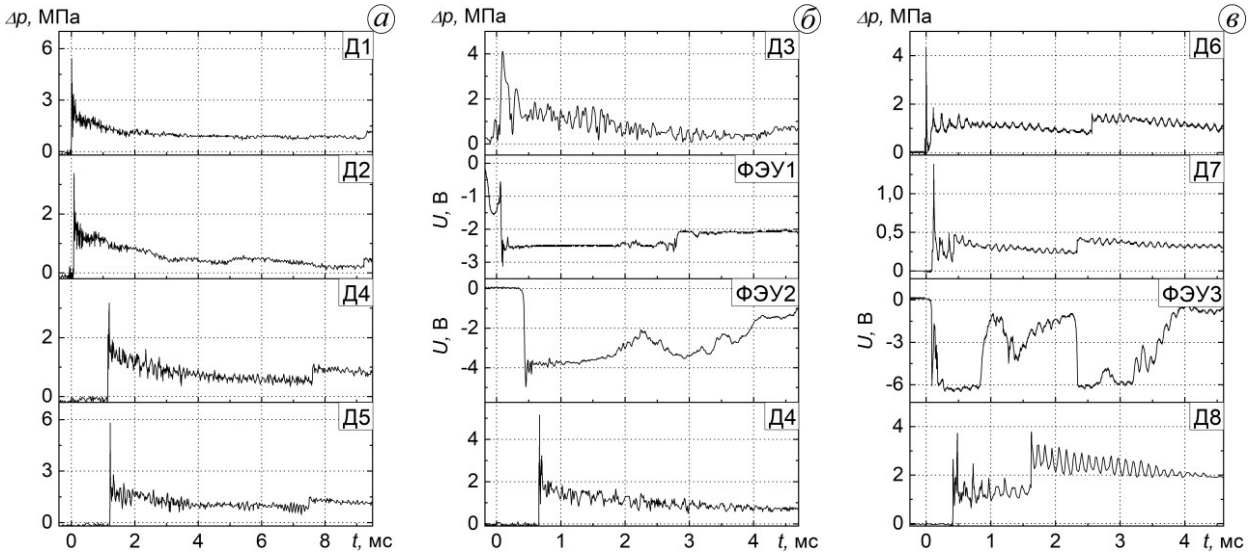


Рисунок 3.3.3 – Профили давления и свечения в смеси (CH_4+0,1H_2+10,52Air)/уголь при $\rho \approx 202$ г/м^3, $p_{0i} = 0{,}3$ МПа, $w_i \approx 23{,}1$ МДж/м^2. Падающая волна – это ДВ со скоростями $D_1 = 1739, 1814, 1714, 1784, 2150, 1791$ м/с, отражённая волна – это УВ со скоростями $D_2 = 801, 889, 1091, 1196, 1200$ м/с

При $\rho \sim$ 100–200 г/м^3, $w_i \approx 19{,}3$ МДж/м^2 начальные средние скорости падающих взрывных волн $\bar{D}_1 \approx 1500$ м/с. В газовзвесях взрывная волна затухает медленнее, чем в газовой смеси. В затухающих взрывных волнах сгорание смесей неполное, поэтому отражённые волны – это детонационные волны ($D_2(x) \approx$ 1800–1400 м/с). При меньшей средней скорости $\bar{D}_1(x)$ недогорание смеси возрастает, средняя скорость $\bar{D}_2(x)$ отражённой волны увеличивается. По этой причине в газовой смеси $\bar{D}_2(x)$ больше, чем в газовзвеси. На всех осциллограммах ударный фронт в падающих взрывных волнах не имеет химпика, зона свечения отстаёт от фронта на $\Delta l_{f7} \approx$ 0,1–0,8 м. Начало зоны свечения совпадает с вторичной волной сжатия [53].

При более сильном инициировании ($w_i \approx 23{,}1$ МДж/м^2, $\rho \approx$ 100–400 г/м^3) в газовых смесях и газовзвесях возбуждаются ДВ, $\bar{D}_1(x) \approx 1800 \pm 50$ м/с. В газовой смеси $D_1(x)$ на 10–100 м/с выше, чем в газовзвесях. Это означает, что газовый поток в газовзвеси теряет энергию на разгон и нагрев частиц. В газовзвесях в верхней части трубы $D_2(x)$ отражённой УВ примерно на 100 м/с меньше, чем в газовой смеси. Скорости $D_2(x)$ растут в обратном направлении от 800–870 до 1200–1300 м/с из-за замедления скорости встречного потока газа. Детонация во второй половине трубы распространяется в спиновом режиме, начало свечения практически совпадает с фронтом волны [53].

Для описания траекторий различных волн на рисунке 3.3.4*а÷в* приведены основные схемы распространения падающих и отражённых волн в виде *x*–*t* диаграмм. Эти диаграммы качественно описывают выполненные эксперименты [32].

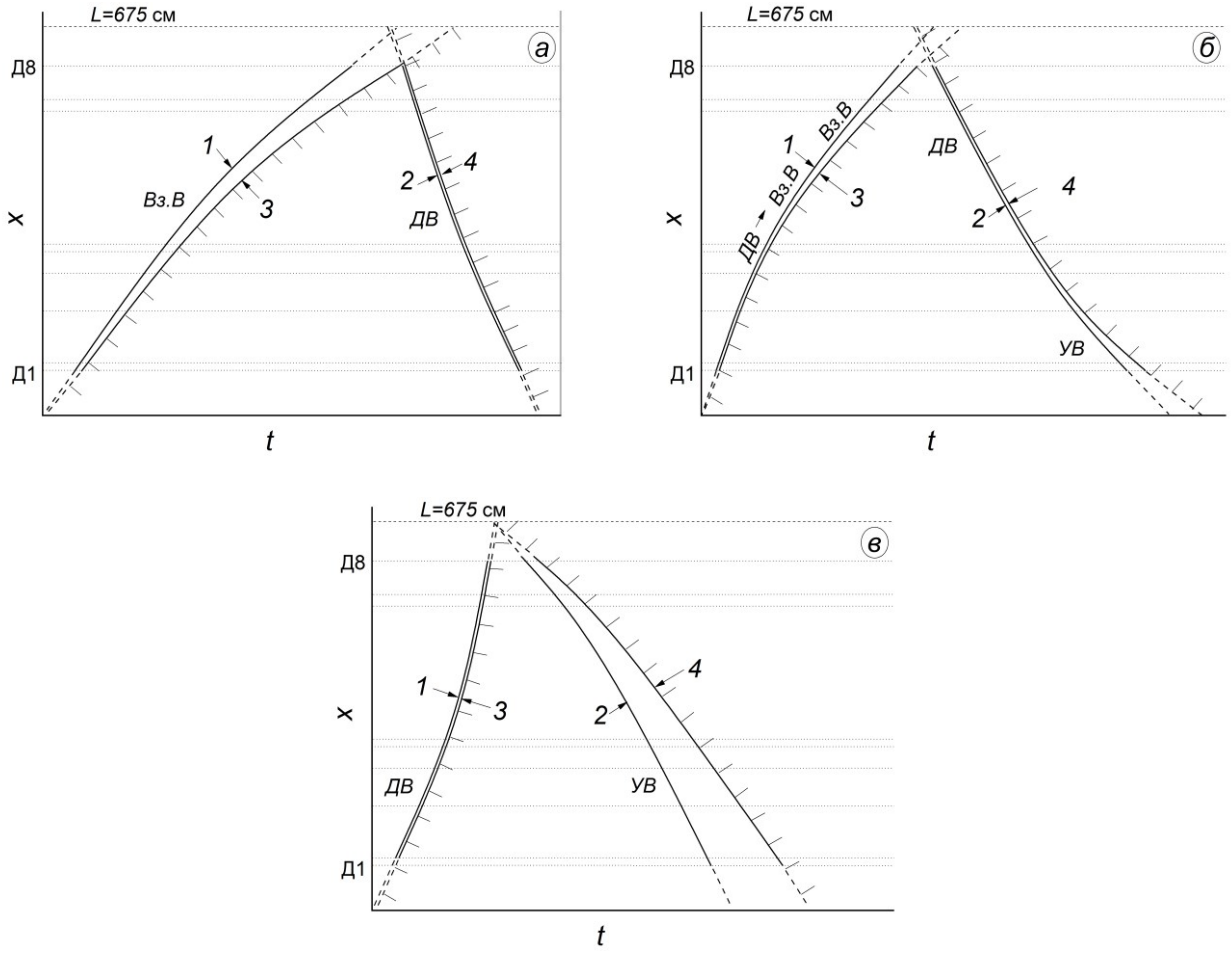


Рисунок 3.3.4 – Варианты режимов распространения падающих (*1*) и отражённых (*2*) волн в виде *x*(*t*) диаграмм: (*а) 1* – затухающая взрывная волна; *2* – детонационная волна; (*б*) *1* – затухающая детонационная волна, переходящая в затухающую взрывную волну; *2* – ударная волна; (*в*) *1* – детонационная волна; *2* – ударная волна. *3*, *4* – траектории переднего фронта светящихся продуктов реакции

Влияние ρ и w_{i} на два разных режима распространения падающих волн более подробно показано ниже в отдельных опытах. При меньшей $w_{\text{i}} \approx 19{,}3$ МДж/м^2 и $\bar{\rho} = \rho/\rho_{\text{st}} \leq 15$ в первой половине трубы волна распространяется в детонационном режиме, а затем её скорость убывает до $D_1 \approx 1300$ м/с (рисунок 3.3.5; диаграмма рисунок 3.3.4*б*). При более высоких значениях $\bar{\rho} \geq 20$–28 в трубе распространяется затухающая взрывная волна. Скорости отражённых волн выше для замедленных падающих волн сжатия. В этих случаях сгорание смесей неполное, и отражённые волны могут быть детонационными (рисунок 3.3.5; диаграмма рисунок 3.3.4*а*). На осциллограммах падающие волны не имеют химпика, зона свечения отстаёт от ударного фронта на $\Delta l_{\text{f}7} \approx 0{,}1$–$0{,}5$ м, фронту свечения соответствует вторичная волна сжатия [53].

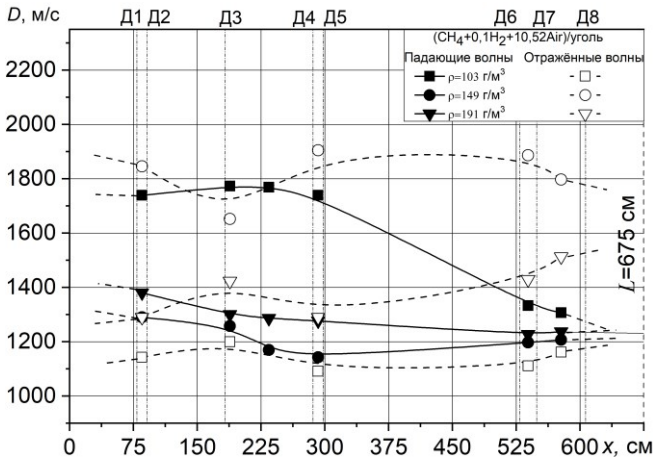


Рисунок 3.3.5 – Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях (CH_4+0,1H_2+10,52Air)/уголь при p_{0i} = 0,25 МПа, $w_i \approx$ 19,3 МДж/м^2. $\rho \approx$ 103, 149, 191 г/м^3 ($\bar{\rho} \approx$ 14,9, 21,6, 27,7 соответственно)

При $w_i \approx$ 23,1 МДж/м^2 для всех исследованных ρ падающие волны распространяются в детонационном спиновом режиме. На начальном участке трубы $D_1 \approx$ 1600–1750 м/с, скорость установившейся ДВ $D_1 \approx$ 1800 м/с (рисунок 3.3.6; диаграмма рисунок 3.3.4*в*). Отражённые волны являются ударными волнами, их скорости $D_2(x) \leq$ 1200 м/с, $D_2(x)$ возрастает в обратном направлении из-за уменьшения скорости встречного потока газа [53].

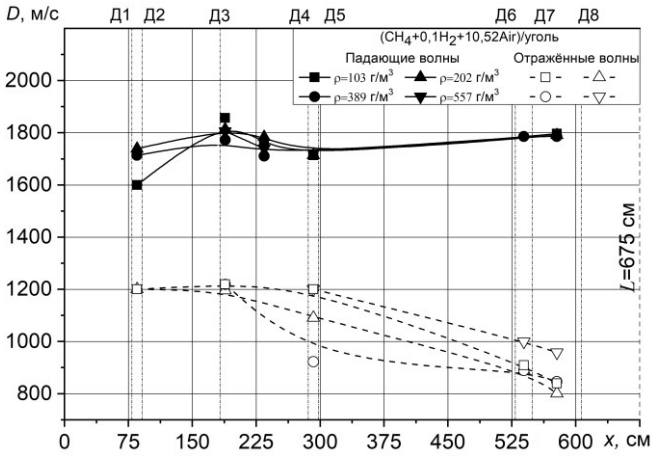


Рисунок 3.3.6 – Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях (CH_4+ 0,1H_2+10,52Air)/уголь при p_{0i} = 0,3 МПа. $\rho \approx$ 103, 202, 389, 557 г/м^3

Смеси (CH_4+*n*H_2+*m*Air)/уголь

Основное внимание в данном разделе уделено измерению скорости волн по длине трубы в газовзвесях n = 0,2, 0,3, 0,5, m = 10,52, 12 при различных ρ. В исследованных смесях профили давлений для волн сжатия принципиально не отличаются от описанных выше. Для наглядности основные результаты расчётов [49] и опытов сведены в таблице 3.3.1. В последних двух столбцах

содержатся сведения о режимах распространения и диапазонах скоростей падающих и отражённых волн в зависимости от состава смесей и удельной энергии инициирования [53].

Таблица 3.3.1 – Экспериментальные и расчётные параметры взрывных и детонационных волн для смесей CH_4+nH_2+mAir, CH_4+nH_2+mAir+βуголь, p_0 = 0,1 МПа.

m	n	m_{st}	a_{H2}, %	h, %	β_{st}	D_0, м/с	a, мм	E_3, МДж	p_{0i}, МПа	w_i, МДж/м^2	ПВ$^+$/ОВ$^-$ ($\beta \geq \beta_{st}$)	D_1/D_2, км/с
10,52	0,1	9,76	9,1	7,8	0	1782	185	68,2	0,25	19,3	УВ/**ДВ**	(1,5–1,2)/(**1,4–1,5)**
					0,203	1860	96	9,05	0,25	19,3	УВ/**ДВ**	(1,5–1,2)/(**1,8–1,5)**
					0	1782	185	68,2	**0,3**	23,1	**ДВ**/УВ	**(1,77–1,9)**/(0,9–1,3)
					0,203	1860	96	9,05	0,3	23,1	**ДВ**/УВ	**(1,74–1,8)**/(0,8–1,2)
	0,2	10	16,7	5,2	0,139	1847	91	7,12	0,25	19,3	УВ/**ДВ**	(1,55–1,2)/(**1,6–1,5)**
					0,139	1847	91	7,12	0,3	23,1	**ДВ**/УВ	**(1,9–1,85)**/(0,8–1,3)
	0,3	10,23	23,1	2,8	0,077	1835	88	6,09	0,3	23,1	**ДВ**/УВ	**(1,9–1,8)**/(0,9–1,4)
12	0,5	10,71	33,3	12	0,344	1896	43	0,62	0,25	19,3	**ДВ**/УВ	**(1,75–1,8)**/(1,2–1,0)
						1896	43	0,62	0,3	23,1	**ДВ**/УВ	**(1,8–1,85)**/(0,9–1,3)

Примечания: E_3 – энергия инициирования сферической детонации; ПВ$^+$ – падающая волна, ОВ$^-$ – отражённая волна; ДВ – детонационная волна, УВ – ударная волна; $a_{H2} = n/(n+1)$, $h = (m–m_{st})/m_{st}$.

Смеси (CH_4+0,2H_2+10,52Air)/уголь

При n = 0,2 в стехиометрической газовой смеси m_{st} = 10. В газовой смеси при n = 0,2, m = 10,52 величина $a_{H2} \approx 0{,}167$, $h \approx 5{,}2$ %, расчётные D_0 = 1794 м/с, a = 140 мм.

Стехиометрический состав смеси с углеродом – CH_4+0,2H_2+10,52Air+0,109C, расчётные D_0 = 1847 м/с, a = 91 мм. Состав стехиометрической смеси с углем – CH_4+0,2H_2+10,52Air+0,139уголь. В объёме трубы стехиометрическая масса угольной взвеси $m_{coal}^{st} \approx 0{,}157$ г, $\rho_{st} \approx 6{,}0$ г/м^3 [53].

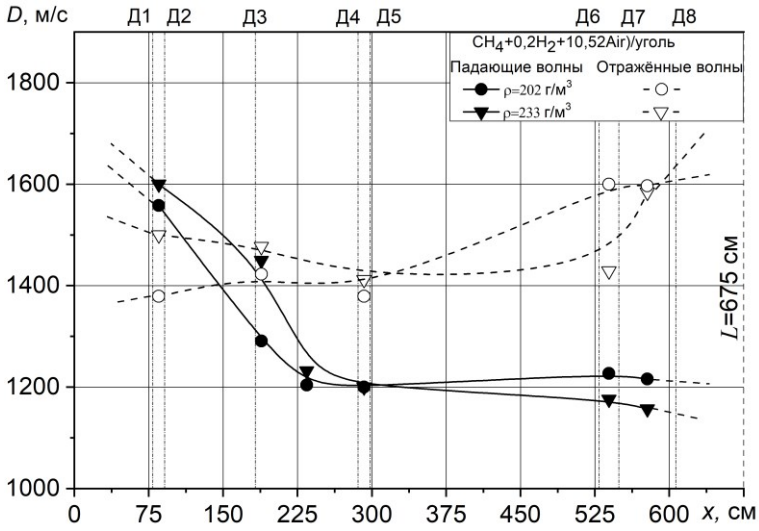


Рисунок 3.3.7 – Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях (CH_4+0,2H_2+10,52Air)/уголь при p_{0i} = 0,25 МПа. $\rho \approx$ 202, 233 г/м^3 ($\bar{\rho} \approx$ 33,7, 38,8 соответственно)

Режимы распространения волн зависят от энергии инициирования (таблица 3.3.1). При p_{0i} = 0,25 МПа и $\bar{\rho} \approx$ 34, 39 падающие взрывные волны наиболее быстро уменьшают скорость на длине около 2 м от $D_1 \approx$ 1550–1600 м/с до 1200–1150 м/с (рисунок 3.3.7; диаграмма рисунок 3.3.4*б*). Отражённые волны распространяются в режиме низкоскоростной детонации от $D_2 \approx$ 1600 м/с до 1400–1500 м/с. На осциллограммах падающие волны не имеют химпика, зона свечения отстаёт от фронта УВ на $\Delta l_{f7} \approx$ 0,2–0,7 м, фронту свечения соответствует вторичная волна сжатия [53].

При более сильном инициировании (p_{0i} = 0,3 МПа) в смесях с $\bar{\rho} \approx$ 16, 39, 64 возбуждается спиновая детонация с практически постоянной скоростью. Свечение начинается вблизи фронта волны. Начальные $D_1 \approx$ 1850–1900 м/с, установившиеся скорости в конце трубы $D_1 \approx$ 1750–1850 м/с (рисунок 3.3.8; диаграмма рисунок 3.3.4*в*). Здесь отражённые волны – это ударные волны ($D_2 \approx$ 800÷1300 м/с).

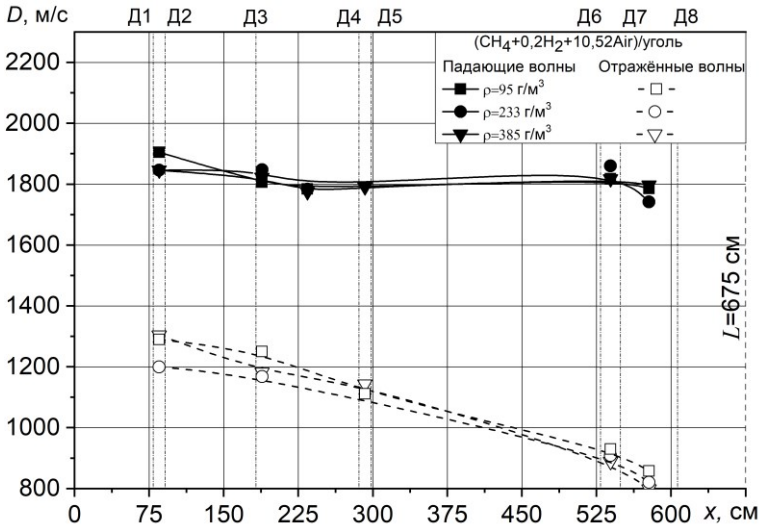


Рисунок 3.3.8 – Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях (CH_4+0,2H_2+10,52Air)/уголь при p_{0i} = 0,3 МПа. $\rho \approx$ 95, 233, 385 г/м^3 ($\bar{\rho} \approx$ 15,8, 38,8, 64,2 соответственно)

Из–за увеличения доли водорода скорости D_1 на начальном участке трубы примерно на 200 м/с больше соответствующих значений при n = 0,1.

Смеси (CH_4+0,3H_2+10,52Air)/уголь

Для смеси CH_4+0,3H_2+10,52Air величина $a_{H2} \approx$ 0,231, $h \approx$ 2,8 %, расчётные D_0 = 1806 м/с, a = 110 мм. Состав стехиометрической смеси с углеродом – CH_4+0,3H_2+10,52Air+0,06C, D_0 = 1835 м/с, a = 88 мм. Стехиометрическая смесь с углем – CH_4+0,3H_2+10,52Air+0,077уголь. В объёме трубы необходимая для стехиометрии масса угольной взвеси $m_{coal}^{st} \approx$ 0,086 г, $\rho_{st} \approx$ 3,26 г/м^3.

Экспериментальные скорости ДВ близки к расчётным значениям. При p_{0i} = 0,3 МПа в конце трубы $D_1 \approx$ 1700–1800 м/с (рисунок 3.3.9; диаграмма рисунок 3.3.4*в*). ДВ распространяется в спиновом режиме, передние фронты свечения и давления практически совпадают. Здесь $44 \leq \bar{\rho} \leq 61$, отражённые волны – это ударные волны ($D_2 \approx$ 850–1350 м/с).

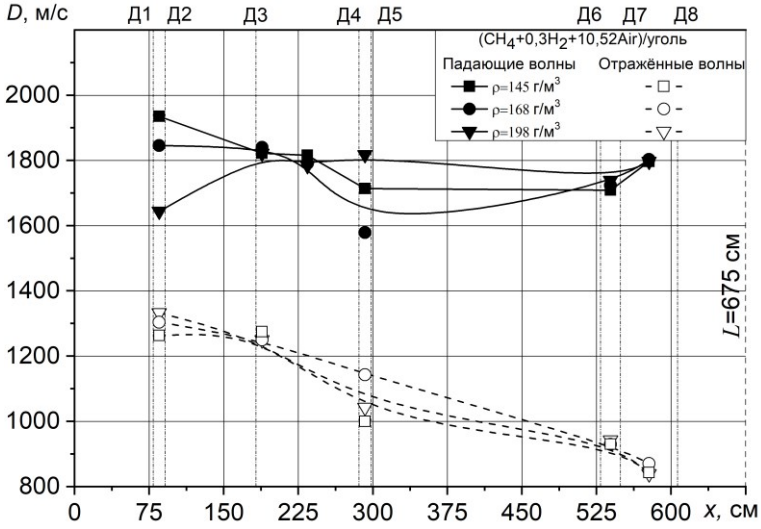


Рисунок 3.3.9 – Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях (CH_4+0,3H_2+10,52Air)/уголь при p_{0i} = 0,3 МПа. $\rho \approx$ 145, 168, 198 г/м^3 ($\bar{\rho} \approx$ 44,5, 51,5, 60,7 соответственно)

Для газовых смесей n = 0,1, 0,2, 0,3, m = 10,52 расчётные значения критической энергии инициирования сферической детонации E_3 = 68,2, 27,0, 12,4 МДж соответственно [49]. 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 видно, что с ростом a_{H2} наиболее заметно уменьшается E_3 – облегчается инициирование детонации [53].

Для стехиометрических смесей с углеродом при m = 10,52, n = 0,1, 0,2, 0,3 E_3 = 9,05, 7,12, 6,09 МДж соответственно (таблица 3.3.1).

Смеси (CH_4+0,5H_2+12Air)/уголь

В смеси CH_4+12Air E_3 = 990 МДж. Для смеси CH_4+0,5H_2+12Air $a_{H2} \approx$ 0,333, $h \approx$ 12 %, расчётные D_0 = 1781 м/с, a = 101 мм, E_3 = 8,39 МДж. Т.е. для смеси с H_2 при n = 0,5 величина E_3 уменьшилась более чем на два порядка по сравнению с той же смесью без водорода.

Для стехиометрической смеси с углеродом CH_4+0,5H_2+12Air+0,27C расчётные D_0 = 1896 м/с, a = 43 мм, E_3 = 0,62 МДж. Стехиометрическая смесь с углем – CH_4+0,5H_2+12Air+0,344уголь. В объёме трубы $m^{st}_{coal} \approx$ 0,337 г, $\rho_{st} \approx$ 12,86 г/м^3.

Благодаря увеличению доли H_2 произошли качественные изменения – в газовзвеси (CH_4+0,5H_2+12Air)/уголь даже при более слабом инициировании ($w_i \approx$ 19,3 МДж/м^2) распространяется стационарная ДВ в спиновом режиме (рисунок 3.3.10, $\bar{\rho} \approx$ 11; диаграмма рисунок 3.3.4*в*). Здесь начальная скорость детонации $D_1 \approx$ 1750 м/с, в конце трубы $D_1 \approx$ 1810 м/с. Отражённая волна является ударной волной, её скорость $D_2 \approx$ 1200–1000 м/с.

Если плотность угольной взвеси выше ($\bar{\rho} \approx$ 28), то падающая ДВ вначале резко замедляется примерно на 500 м/с, а затем через 2 м распространяется как взрывная волна

примерно с $D_1 \approx 1300$ м/с (рисунок 3.3.10; диаграмма рисунок 3.3.4*б*). Зона свечения в волне на датчике Д7 отстаёт от фронта на $\Delta l_{f7} \approx 0{,}2$ м. Угольная взвесь с возрастанием $\bar{\rho}$ начинает вести себя как инертная пылевая завеса. Учитывая результаты [3, 4], можно предположить, что при концентрациях угольной пыли $\rho \geq 2$–3 кг/м^3 ($\bar{\rho} \geq 155$–230) произойдёт полное гашение ДВ в исследованных газовзвесях. Из–за недогорания смеси в падающей волне отражённая волна здесь – это волна низкоскоростной детонации ($D_2 \approx 1500$–1400 м/с) [53].

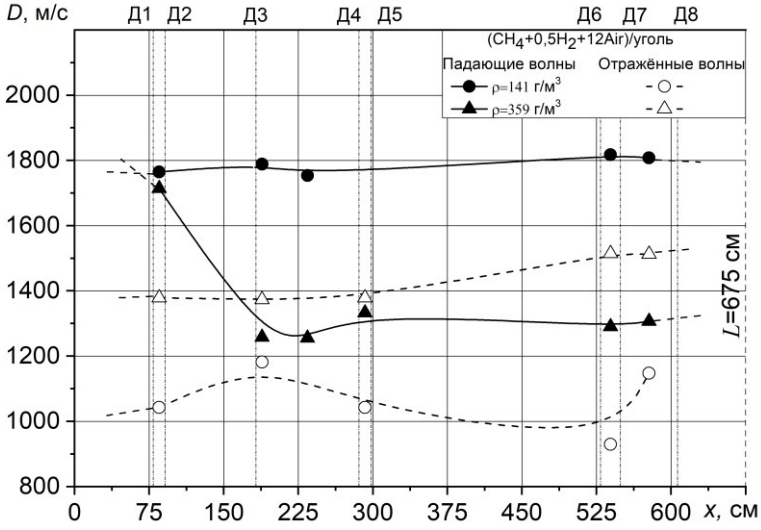


Рисунок 3.3.10 – Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях (CH_4+0,5H_2+12Air)/уголь при $p_{0i} = 0{,}25$ МПа. $\rho \approx 141$, 359 г/м^3 ($\bar{\rho} \approx 11{,}0$, 27,9 соответственно)

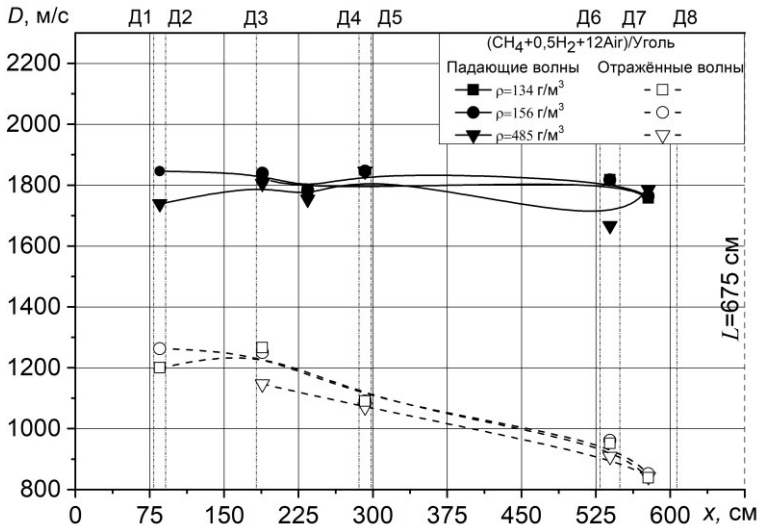


Рисунок 3.3.11 – Скорости падающих детонационных и отражённых волн по длине трубы в смесях (CH_4+0,5H_2+12Air)/уголь при $p_{0i} = 0{,}3$ МПа. $\rho \approx 134$, 156, 485 г/м^3 ($\bar{\rho} \approx 10{,}4$, 12,1, 37,7 соответственно)

При более сильном инициировании ($w_i \approx$ 23,1 МДж/м^2) в газовзвесях возбуждаются практически стационарные ДВ в спиновом режиме $D_1 \approx 1800 \pm 50$ м/с (рисунок 3.3.11; диаграмма рисунок 3.3.4*в*), здесь $10 \le \bar{\rho} \le 38$. Отражённые волны в этих опытах – это ударные волны ($D_2 \approx$ 850–1250 м/с), скорость УВ возрастает в обратном направлении из-за замедления встречного потока газа.

Изменения давления и массы угля, перешедшей в газ

В смесях $CH_4/H_2/Air$ во взрывных и детонационных волнах давление после опыта p_2 понижается на 0,012–0,06 МПа за счёт конденсации водяного пара (рисунок 3.3.12, ρ = 0). В газовзвесях $CH_4/H_2/Air$/уголь за фронтом волн при горении частиц угля дополнительно образуются газы CO и CO_2. Поэтому p_2 выше p_0 на 0,01–0,016 МПа (рисунок 3.3.12). Величина p_2 возрастает линейно от концентрации взвеси, вероятно, 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 (рисунок 3.3.12) благодаря росту мольной доли H_2O [53].

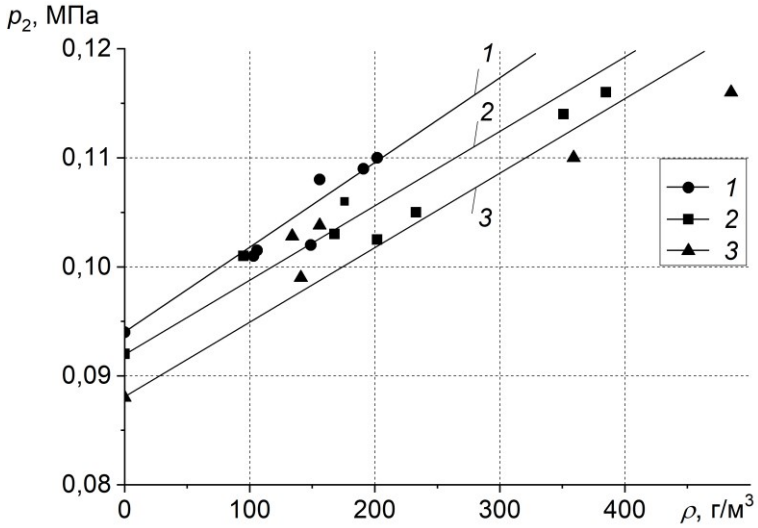


Рисунок 3.3.12 – Давление после опыта в зависимости от ρ при p_{0i} = 0,25, 0,3 МПа:
1 – (CH_4+0,1H_2+10,52Air)/уголь, *2* – (CH_4+0,2H_2+10,52Air)/уголь, *3* – (CH_4+0,5H_2+12Air)/уголь

Массу угля, перешедшую в газовую фазу, определяли из выражения $m_{CG} = m_0 - m_1 - m_2 - m_3$. Зависимость m_{CG} от ρ линейная (рисунок 3.3.13), для газовзвесей *1–3* относительная величина $0{,}36 \le m_{CG}/m_0 \le 0{,}62$. Средняя по всем опытам величина $\langle m_{CG}/m_0 \rangle \approx 0{,}47$.

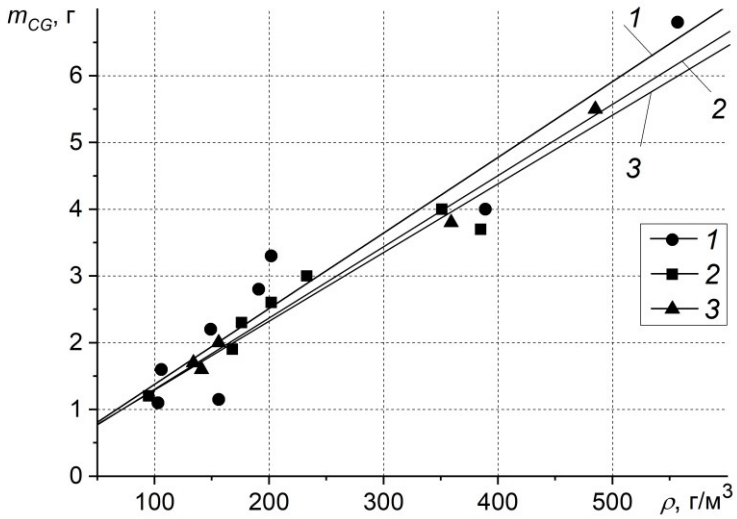


Рисунок 3.3.13 – Масса угля, перешедшего в газовую фазу, в зависимости от ρ при p_{0i} = 0,25 и 0,3 МПа. *1* – (CH_4+0,1H_2+10,52Air)/уголь, *2* – (CH_4+0,2H_2+10,52Air)/уголь, *3* – (CH_4+0,5H_2+12Air)/уголь

В наших опытах $m_0 > m_{CG} > m_{coal}^{st}$, m_{coal}^{st} ≈ 0,18, 0,16 и 0,34 г при n = 0,1, 0,2 и 0,5 соответственно. В зоне реакции ДВ сгорает масса угля, не превышающая m_{coal}^{st}, относительная величина m_{coal}^{st}/m_{CG} ≈ 3÷20 % (m_{coal}^{st}/m_0 ≈ 1,2÷9,7 %). Основная часть из перешедшего в газ угля $(m_{CG} - m_{coal}^{st})/m_{CG}$ ≈ 80–97 % газифицируется и выделяет летучие при нагревании в падающих ДВ и отражённых волнах. Эти газы в шахте представляют опасность для людей при дыхании.

Основные выводы и результаты по третьей главе

Раздел 3.1

1. Исследованы процессы горения, взрыва и детонации в газовых смесях CH_4/Air, CH_4/O_2 и в двухтопливных гетерогенных смесях (ДГС) CH_4/Air/уголь, CH_4/O_2/уголь, O_2/уголь с размером частиц до 200 мкм и среднеобъёмной плотностью до 700 г/м^3.

2. Проанализированы рентгенограммы исходного угольного порошка и образцов угля, подвергшихся воздействию высокотемпературных волн.

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

4. За фронтом волн горения, взрывных и детонационных волн в ДГС происходит воспламенение и горение частиц угля. Увеличение длины зоны реакции в газовых смесях способствует увеличению степени сгорания частиц угля и усилению волн сжатия.

5. В ДГС с химически активной газовой смесью могут распространяться стационарные детонационные волны. В ДГС с менее активной газовой смесью – затухающие взрывные волны, параметры которых зависят от энергии инициирования.

6. В исследованных двухтопливных гетерогенных смесях горение угля конкурирует с горением метана, но метан химически активней угля. На параметры волн горения и детонации определяющее влияние оказывает метан, а не углерод угля.

7. В ДГС 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 %.

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

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

10. Доля сгоревшего угля в волнах горения, взрывных и детонационных волнах после прохождения по угольной взвеси 2–3–х отражённых волн не превышает 20 % от стехиометрии.

Сжигание мелкодисперсного угля в волнах горения, взрывных и детонационных волнах менее эффективно, чем более длительное по времени сжигание угля в котельных и печах.

11. Моделирование взрывных и детонационных процессов в ДГС необходимо выполнять с учётом динамики, теплообмена, воспламенения и горения отдельных частиц угля за ударным фронтом. Термодинамические расчёты параметров детонации газоугольных систем в предположении, что углерод находится в газовой и конденсированной фазах, дают существенно завышенные по сравнению с экспериментом параметры детонации.

Раздел 3.2

1. Экспериментально исследованы взрывные и детонационные волны в газовых двухтопливных смесях $CH_4/H_2/O_2$ и гетерогенных трёхтопливных смесях $CH_4/H_2/O_2$ с взвесями частиц угля (размер частиц 0÷200 мкм, среднеобъёмная плотность 160÷400 г/м^3). Изучена структура и определены параметры падающих детонационных и отражённых волн.

2. Скорости установившейся детонации для богатой по кислороду газовой смеси $CH_4+2/3H_2+11O_2$ и смесей $(CH_4+2/3H_2+11O_2)$/угольная взвесь при p_0 = 0,1÷0,025 МПа $D \approx$ 1800÷1740 м/с. Скорости отражённых волн в смесях с угольной взвесью выше, чем в газовых смесях за счёт дополнительного горения частиц угля и изменяются по длине трубы примерно от $D' \approx$ 650–990 м/с до $D' \approx$ 1200–1250 м/с.

3. Рост содержания водорода в смесях $CH_4/H_2/O_2$ уменьшает энергию инициирования, газовая смесь становится более взрывоопасной.

4. Экспериментальные скорости детонации в смесях $(CH_4+2/3H_2+11O_2)$/угольная взвесь примерно на 1500 м/с ниже расчётной равновесной скорости детонации по термодинамической модели. Это объясняется тем, что из-за медленного и неполного сгорания частиц угля в зоне реакции детонационной волны энергия выделяется значительно меньшая, чем это предполагается в термодинамических расчётах с углеродом.

5. Газы метан и водород химически активнее частиц угля. Сгорание угля в зоне реакции неполное и не превышает 20 % от стехиометрии.

Раздел 3.3

1. Исследованы ударные и детонационные волны в газообразных двухтопливных смесях CH_4/H_2/воздух и гетерогенных трехтопливных смесях CH_4/H_2/воздух/уголь со средней плотностью угольной пыли 95÷560 г/м^3 и с частицами размером 0÷200 мкм.

2. Эксперименты проведены в вертикальной ударной трубе длиной 6,75 м и диаметром 70 мм. Измеренные в экспериментах параметры детонации сравниваются с расчетными равновесными термодинамическими значениями.

3. В смесях CH_4+nH_2+mAir (n = 0,1– 0,5, m = 10,52, 12) и в тех же смесях с угольной взвесью вблизи источника инициирования с $w_i \approx 23$ МДж/м^2 возбуждается детонация с практически постоянной скоростью (~ 1800 м/с).

4. Из–за существенного недогорания угля в зоне реакции параметры детонации в газовзвесях возрастают незначительно по сравнению с газовыми смесями, на параметры ДВ определяющее влияние оказывают метан и водород, а не взвесь угля.

5. При отражении затухающей взрывной волны из-за недогорания горючих компонентов смесей возбуждается либо низкоскоростная, либо высокоскоростная детонация. Поэтому взрывные волны представляют такую же опасность, как и детонационные волны.

6. С увеличением доли водорода наиболее существенно уменьшается энергия инициирования и облегчается инициирование смесей CH_4/H_2/Air и CH_4/H_2/Air/уголь, что повышает опасность взрыва и детонации этих смесей.

7. В зоне реакции ДВ сгорает примерно 1,2–9,7 % от взвешенного в трубе угля. Основная часть из перешедшего в газ угля (80–97 %) газифицируется и выделяет летучие при нагревании частиц угля в падающих детонационных, взрывных и отражённых волнах.

ГЛАВА 4. ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗАКРЫТОМ КАНАЛЕ В СМЕСЯХ CH_4/ВОЗДУХ, CH_4/ВОЗДУХ/ВЗВЕСЬ УГЛЯ

4.1 Волны горения, движущиеся сверху вниз в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/взвесь угля в вертикальной закрытой трубе

Распространение пламени в гетерогенных смесях метан/воздух/взвесь угля изучено меньше, чем в гомогенных смесях метан/воздух. В [29, 47] экспериментально исследованы волны горения, взрывные и детонационные волны в системах метан/воздух/взвесь угля, метан/кислород/взвесь угля. В [54, 55] экспериментально и численно исследовано распространение пламени в газовзвесях угольной пыли. В газовзвесях угольной пыли качественное соответствие теоретической и экспериментальной скорости пламени существует лишь для ламинарного режима горения [55, 56].

Пламёна в газовзвесях угольной пыли в длинных трубах, выработках угольных шахт распространяются преимущественно в турбулентном режиме. Теоретические расчёты скорости турбулентного пламени в газовзвесях отсутствуют. Для быстрых практических расчётов взрывов газа с угольной пылью в [57] использована величина экспериментальной скорости распространения пламени в качестве параметра в математической модели и показана пригодность такой модели [31].

О влиянии гравитации на волны горения в вертикальных трубах в [58] приводятся следующие сведения: при поджигании газовой смеси снизу трубы скорость распространения волны горения вверх больше, чем скорость распространения волны горения вниз по трубе при поджигании смеси сверху.

В вертикальном закрытом канале наиболее выражено влияние гравитации на процесс распространения пламени. Поясним это на таком примере. Представим, что мы осуществили инициирование волны горения в химически активной смеси слабой искрой сверху вертикального канала. Тогда фронт пламени и зона реакции начнут распространяться вниз, но горячие (более лёгкие) продукты реакции будут стремиться всплыть вверх, увлекая за собой и фронт пламени. Одновременно из зоны реакции будут распространяться звуковые возмущения, которые будут отражаться от торцов трубы. Эти процессы могут привести к возникновению продольных колебаний пламени, а волна горения будет двигаться со знакопеременной скоростью. Такие режимы горения обнаружены и изучены в газовых смесях и газовзвесях угольных пылей в [31].

В настоящем разделе 4.1 исследовано распространение пламени в системах метан/воздух и метан/воздух/взвесь угля при различных концентрациях угольной взвеси в вертикальном закрытом канале при инициировании сверху [31].

Результаты опытов

Исследованы смеси: стехиометрическая CH_4+9,524воздух (9,5 %CH_4/воздух); бедная по горючему CH_4+13,286воздух (7 %CH_4/воздух); CH_4+13,286воздух/уголь. Стехиометрическая смесь CH_4/воздух и смеси (CH_4+13,286воздух)/уголь легко инициируются искрой, и пламя устойчиво распространяется по трубе.

Для лучшего воспламенения бедной по метану смеси CH_4+13,286воздух сверху добавляли 0,5–2 л стехиометрической смеси CH_4/воздух. По смеси CH_4+13,286воздух лучше распространяется пламя, если в трубе изначально присутствует немного угольной пыли с $\rho_0 \le 1$ г/м^3. Такие твёрдые частицы играют роль горячих точек и поддерживают горение газовой смеси. С увеличением числа опытов количество пылевых частиц в трубе уменьшается, свечение в волне горения слабеет, и пламя затухает.

В бедной по метану смеси CH_4+13,286воздух коэффициент избытка воздуха $h \approx 39{,}5$ %. Смеси с углеродом CH_4+13,286воздух+0,79C и углем CH_4+13,286воздух+1,01уголь – стехиометрические (здесь в угле содержится 78,4 % углерода [29, 47]). Отсюда следует, что необходимая для стехиометрии масса угля в трубе $m_{st} \approx 0{,}93$ г ($\rho_{st} \approx 35{,}6$ г/м^3). В наших опытах содержание угля в газовзвесях превышало стехиометрическую концентрацию в 2,8÷11,8 раз. Среднеобъёмная концентрация частиц угольной пыли в трубе $\rho \approx 0{,}10 \div 0{,}42$ кг/м^3 [31].

Профили сигналов в волнах горения с датчиков и ФЭУ

Пьезодатчики в этих опытах были использованы как индикаторы давления и частично теплового воздействия для фиксации волны горения. Датчики данной конструкции вырабатывают электрический сигнал за счёт деформации пьезоэлемента при силовом действии со стороны газа и при длительном (более 1 мс) нагреве торцевой поверхности датчика. Поэтому шкала сигналов приведена в В/дел. Характерные осциллограммы сигналов в ВГ в стехиометрической смеси CH_4/воздух представлены на рисунке 4.1.1. Из анализа осциллограмм следует, что подъём сигналов на датчиках начинается примерно в момент прихода фронта пламени. Датчики Д4 и Д5 регистрируют неустойчивость пламени (рисунок 4.1.1*а*). На профилях сигналов ФЭУ1 и ФЭУ2 видны изменения яркости пламени с частотами относительно стенок трубы $f_1 \approx 50 \pm 2$ Гц, $f_2 \approx 54 \pm 4$ Гц (рисунок 4.1.1*б*), что указывает на наличие попутных и встречных потоков газа. В нижней части трубы на ФЭУ3 частота колебаний возрастает до $f_3 \approx 61 \pm 18$ Гц. Длительность свечения в пламени для стехиометрической смеси $\Delta\tau_{св} \approx 80 \div 300$ мс [31].

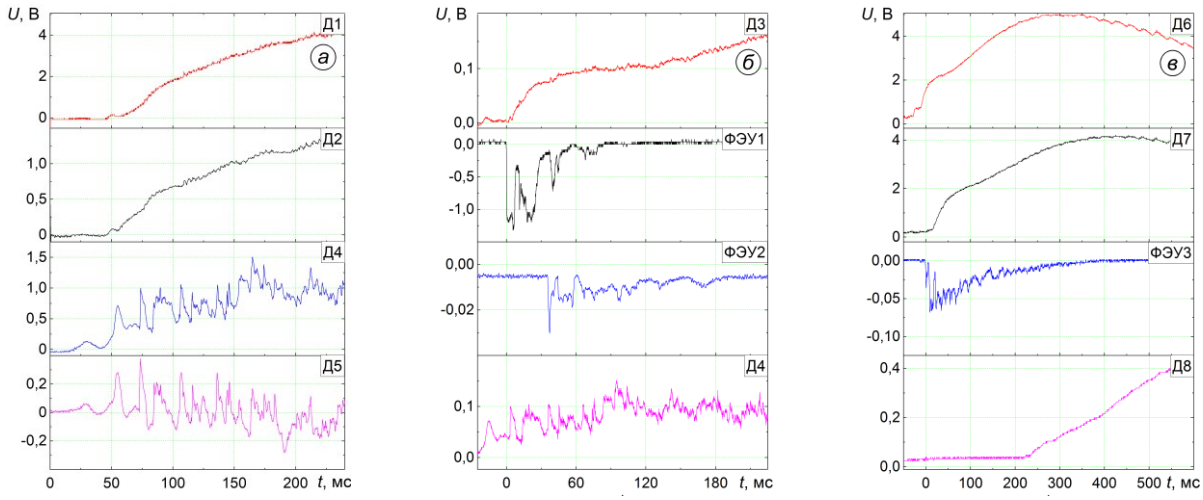


Рисунок 4.1.1 – Профили сигналов с пьезодатчиков и ФЭУ в волне горения в стехиометрической газовой смеси CH_4+9,524воздух

Характерные осциллограммы в ВГ для смеси CH_4+13,286воздух (рисунок 4.1.2) подобны осциллограммам стехиометрической смеси, пульсационный характер сигналов с датчиков и ФЭУ сохраняется, но интенсивность свечения уменьшается по сравнению со стехиометрической смесью в 10÷20 раз, длительность свечения $\Delta\tau_{св} \approx 50\div60$ мс. На ФЭУ1 и ФЭУ2 величины $f_1 \approx 45\pm8$ Гц, $f_2 \approx 33\pm3$ Гц, на ФЭУ3 частота возрастает до $f_3 \approx 43\pm3$ Гц [31].

В гетерогенных смесях (CH_4+13,286воздух)/уголь по сравнению с волной горения в газовой смеси CH_4+13,286Air яркость пламени возрастает в 50÷100 раз благодаря горению частиц угля (рисунок 4.1.2), $\Delta\tau_{св} \approx 100\div150$ мс. Здесь $f_1 \approx 31\pm8$ Гц, $f_2 \approx 29{,}5\pm6{,}5$ Гц, в нижней части трубы частота колебаний возрастает до $f_3 \approx 39\pm7$ Гц. В отличие от ударных и детонационных волн отражённая от торца трубы волна горения отсутствует [31].

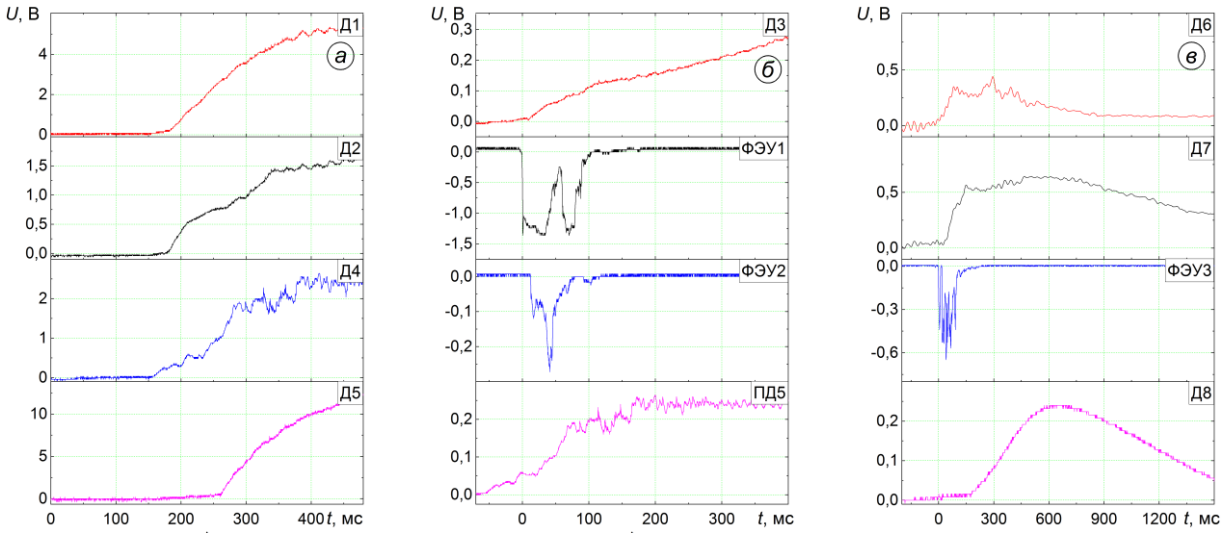


Рисунок 4.1.2 – Профили сигналов с пьезодатчиков и ФЭУ в волне горения в гетерогенной смеси (CH_4+13,286воздух)/уголь при $\rho \approx 114$ г/м^3

Кривые *1÷3* зависимости частот колебаний пламени $f_1 \div f_3$ от координаты вдоль трубы, полученные с помощью ФЭУ, приведены на рисунке 4.1.3. Кривая *1* для стехиометрической концентрации лежит выше кривых *2* и *3*. Во всех смесях наблюдается увеличение частоты колебаний пламени с расстоянием, по–видимому, из-за возрастания средней температуры газа в трубе по мере сгорания смесей. В фиксированных точках для всех смесей с заданным составом частоты f_i имеют разброс (рисунок 4.1.3). Например, в бедной по метану смеси CH_4/воздух в трёх точках измерения $f_2 \approx 30 \div 53$ Гц (кривая *2*). Приведённые на рисунке 4.1.3 данные носят скорее качественный характер, поскольку ошибки определения частот достигают 30÷50 %, и не всегда можно выделить основные частоты колебаний по сигналам с ФЭУ [31].

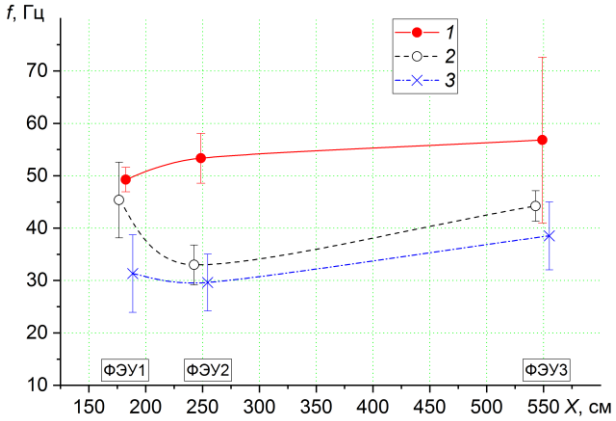


Рисунок 4.1.3 – Частоты пульсаций в волне горения по длине ударной трубы:
1 – CH_4+9,524воздух; *2* – CH_4+13,286воздух; *3* – (CH_4+13,286воздух)/уголь при $\rho \approx 0{,}1 \div 0{,}42$ г/м^3

Сделаем простую оценку частоты колебаний пламени, полагая, что зона реакции волны горения является источником звуковых возмущений. В момент инициирования (пламя вверху) средняя скорость звука в трубе $c \approx 340$ м/с, период собственных продольных колебаний $T \approx 2L/c \approx 40$ мс, частота $f \approx 25$ Гц. По мере движения волны горения вниз и сгорания газовой смеси, температура и средняя скорость звука в газе возрастают, поэтому частота колебаний пламени должна увеличиваться [31].

В угольных взвесях, несмотря на более яркое свечение (и более высокие температуры пламени), кривая *3* лежит ниже кривых *1*, *2* для газовых смесей. Этот факт можно объяснить более низкой скоростью распространения звуковых возмущений в газовзвесях по сравнению с газовыми смесями. Оценим скорость звука в газовзвесях. Газовзвесь – двухфазная среда с дисперсией, поэтому скорость звука C зависит от частоты ω и объёмной плотности взвеси $\rho_2 \equiv \rho$, т.е. $C = C(\omega, \rho_2)$. Рассмотрим два предельных случая: $\omega \to \infty$ и $\omega \to 0$. Первому случаю

соответствует замороженная скорость звука C_f, второму – равновесная скорость звука C_e. Для оценки значений C_f и C_e, воспользуемся выражениями из [59].

Поскольку доля сгоревшего угля и объём твёрдой фазы малы, будем считать, что фазовые переходы отсутствуют и $\alpha_2 = V_2/(V_1+V_2) = \rho_2 \big/ \rho_2^0 \ll 1$ (где V_1 и V_2 – объёмы газовой и твёрдой фаз, ρ_2^0 – плотность вещества твёрдой частицы, индексы 1 и 2 относятся соответственно к газовой фазе и к взвеси частиц). Тогда замороженная скорость звука в аэровзвеси $C_f = C_1 = \sqrt{\gamma_1 p_1^0 \big/ \rho_1^0}$, где C_1 – скорость звука в газе без пыли при локальном термодинамическом равновесии. Здесь γ_1, p_1^0, ρ_1^0, T_{10} – показатель адиабаты, давление, плотность и температура газа перед фронтом волны горения соответственно. При $\gamma_1 \approx 1{,}4$, $p_1^0 = 0{,}1$ МПа, $\rho_1^0 \approx 1{,}2$ кг/м^3, $T_{10} = 293$ K получим $C_1 \approx 343$ м/с [31].

Искомая равновесная скорость звука в аэровзвеси определяется выражением:

$$C_e = C_1 \cdot \sqrt{\gamma_e/(\gamma_1(1+\tilde{\rho}_2))},$$

где $\gamma_e = c_p/c_V$ – равновесный показатель адиабаты, $c_p = (c_1 + c_2\tilde{\rho}_2)/(1+\tilde{\rho}_2)$, $c_V = (c_1 - R_1 + c_2\tilde{\rho}_2)/(1+\tilde{\rho}_2)$, $c_1 \equiv c_{p1}$ – удельная теплоёмкость газа перед пламенем, $R_1 = R/\mu_1$, $R = 8{,}31\cdot10^3$ Дж/(кмоль·K) – универсальная газовая постоянная, μ_1 – молярная масса газа, c_2 – удельная теплоёмкость угля, $\tilde{\rho}_2 = \rho_2/\rho_1^0$. При $\mu_1 \approx 29$ г/моль, $c_1 \approx 10^3$ м^2/(с^2·K), $c_2 \approx 750$ м^2/(с^2·K), $\rho_2^0 \approx 1350$ кг/м^3, $\rho_2 \approx 0{,}1 \div 0{,}42$ кг/м^3, получим $\alpha_2 \approx (0{,}7 \div 3)\cdot10^{-4} \ll 1$, $\gamma_e \approx 1{,}37 \div 1{,}29$, $C_e \approx 326 \div 283$ м/с.

Заметим, что при тех же условиях (отсутствуют фазовые переходы и $\alpha_2 \ll 1$) существует второй подход [59] для описания равновесной схемы в виде калорически совершенного газа. Такая модель идеального газа для смеси в целом соответствует размеру частиц $\delta \to 0$. Замороженная схема соответствует случаю $\delta \to \infty$, когда частицы не оказывают влияния на газ, а газ – на частицы (частицы движутся прямолинейно и не меняют своей температуры). Выражения для равновесной и замороженной скорости звука при этом совпадают с формулами C_e и C_f при $\omega \to 0$ и $\omega \to \infty$ [31].

Поскольку $f \sim C_e$, то из данных, приведённых на рисунке 4.1.3, имеем среднее отношение $f_3/f_2 \approx 0{,}8$, из наших оценок $f_3/f_2 \sim C_e/C_f \approx 0{,}95 \div 0{,}83$. Т.е. совпадение отношения частот и скоростей звука в угольных газовзвесях и газовых смесях удовлетворительное.

Скорости волн горения по длине трубы

Результаты измерения осреднённых скоростей пламён с доверительными интервалами приведены на рисунке 4.1.4. На начальном участке трубы наибольшая скорость волны горения регистрируется в стехиометрической смеси *1* ($D \approx 31$ м/с). В конце трубы пламя стабилизируется,

скорости волн горения в смесях *1÷3* примерно одинаковые ($D \approx 2 \div 3$ м/с). Добавление в бедную газовую смесь частиц угля практически не влияет на скорость пламени D [31].

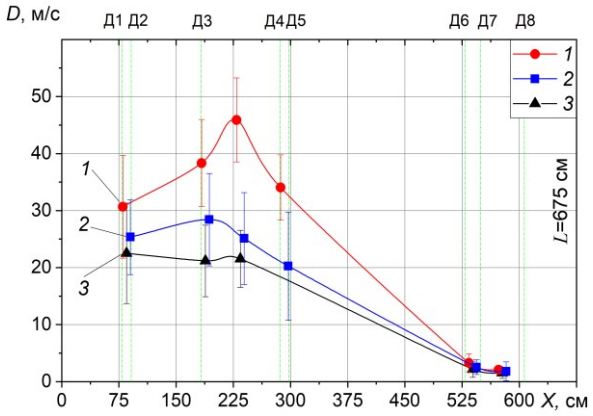


Рисунок 4.1.4 – Осреднённые на участках измерения скорости волны горения по длине ударной трубы: *1* – CH_4+9,524воздух; *2* – CH_4+13,286воздух; *3* – (CH_4+13,286воздух)/уголь при $\rho \approx 0{,}10 \div 0{,}42$ кг/м^3

На рисунке 4.1.5 представлены зависимости осреднённой скорости пламени D от координаты x для четырёх групп концентрации пыли ρ (здесь в нескольких точках приведены доверительные интервалы). В смесях (*1*) с меньшей концентрацией ρ скорость D убывает от 32±15 м/с до 0,8÷3,8 м/с в конце трубы. При немонотонном характере распространения пламени в группах *2–4* с большим значением ρ к концу трубы скорость волны убывает до значений $D \approx 0{,}5 \div 1{,}5$ м/с [31].

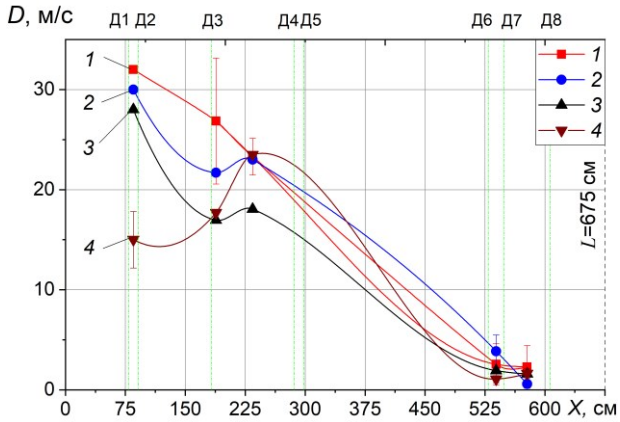


Рисунок 4.1.5 – Осреднённые на участках измерения скорости волны горения по длине ударной трубы в смесях (CH_4+13,286воздух)/уголь. *1* – $\rho = 0{,}1 \div 0{,}11$ кг/м^3; *2* – $\rho \approx 0{,}18 \div 0{,}22$ кг/м^3; *3* – $\rho \approx 0{,}27 \div 0{,}32$ кг/м^3; *4* – $\rho \approx 0{,}36 \div 0{,}42$ кг/м^3

С увеличением концентрации пыли ρ скорость пламени при $1{,}75 < x < 2{,}50$ м либо временно стабилизируется (*2*, *3*), либо возрастает (*4*). После $x > 2{,}5$ м средняя скорость пламени

падает, и в конце канала она примерно постоянная. Большие значения D на начальном участке канала обусловлены расширением области продуктов сгорания газовой смеси при быстром локальном повышении температуры. Осреднённая скорость пламени в конце трубы слабо зависит от массовой концентрации угольной пыли [31].

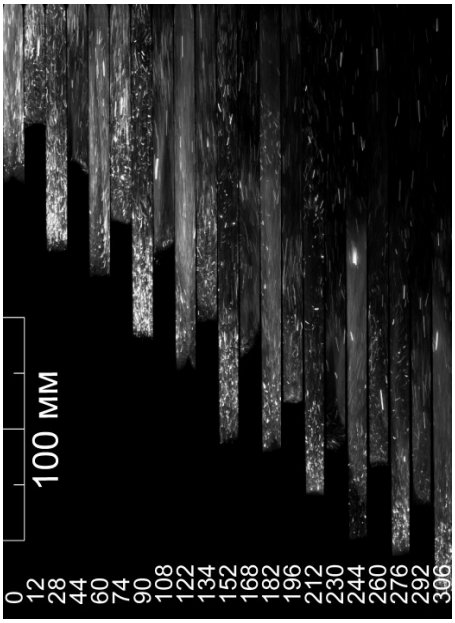
Оптическая съёмка волн горения в смесях метан/воздух

Максимальное время выдержки на камере ограничено величиной $1/F$. При сравнительно высокой частоте кадров ($F \geq 1000$ FPS) измерение скорости пламени в смеси CH_4+13,286воздух становится невозможным из-за низкой яркости свечения. С уменьшением частоты съемки ($F \leq 500$ кадр/с) время экспозиции увеличивается, свечение пламени можно различить, но из-за размазывания фронта волны горения возрастают ошибки определения скорости пламени и его местонахождения [31].

При изучении волны горения с помощью видеокамеры обнаружено сложное возвратно–поступательное движение пламени по длине трубы (рисунок 4.1.6). Свечение за фронтом волны горения в смеси CH_4+13,286 воздух слабое, неравномерное, яркие треки на снимках (рисунок 4.1.6*а*) – это частицы пыли, которые в небольшом количестве всегда находятся в газе, либо срываются со стенок трубы. Приведённые кадры соответствуют моментам остановок пламени. Видно, что фронт пламени неровный, протяженность светящейся области пламени изменяется от 5 до 20 см. Кривые мгновенных значений скорости v фронта волны горения в оптической секции построены в зависимости от координаты l (рисунок 4.1.6*б*) и времени t (рисунок 4.1.6*в*). Здесь и далее погрешности измерения скорости пламени 10 %, частоты колебаний пламени – 5 % [31].

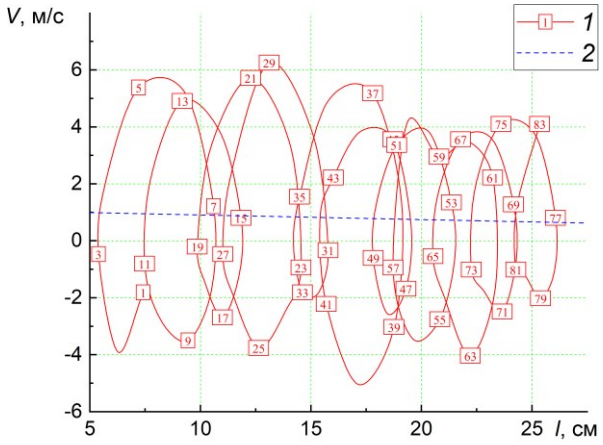
Непосредственно на кривой *1* (см. рисунок 4.1.6*б*) для облегчения правильного пространственного воспроизведения $v(l)$ размещены целые числа в порядке возрастания (1, 3, 5, 7...). Скорость фронта пламени принимает положительные (при движении вниз) и отрицательные (при движении вверх) значения. Волна горения распространяется вниз и вверх с периодом $T \approx 30{,}6$ мс, что соответствует частоте продольных колебаний пламени $f \approx 32{,}7$ Гц (рисунок 4.1.6). Мгновенные значения скорости фронта волны горения находятся в диапазоне -5 м/с $\leq v(l) \leq +6{,}2$ м/с. Максимальные положительные скорости пламени больше, чем отрицательные. Осреднённая по длине щели скорость пламени (прямая *2*) $\bar{v}(l) \approx +1$ м/с [31].

Кривая $v(t)$, построенная по точкам с шагом 4 мс, имеет более простой вид, чем зависимость $v(l)$, и похожа на синусоиду (рисунок 4.1.6*в*). Мгновенные скорости волны горения $v(t)$ принимают положительные и отрицательные значения. Благодаря сгоранию свежей смеси в волне горения площадь участков с положительной скоростью больше, чем с отрицательной скоростью. Пламя, распространяясь со знакопеременной скоростью, перемещается вниз по трубе, средняя скорость пламени (прямая *2*) $\bar{v}(t) \approx +1$ м/с [31].

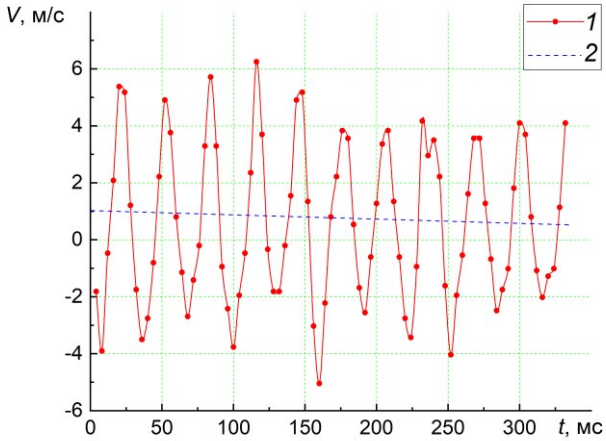


а

F = 500 FPS, *St* = 1/500 с. Снимки ВГ в моменты изменения направления движения волны (остановки). Цифры внизу – время от первого кадра, мс



б



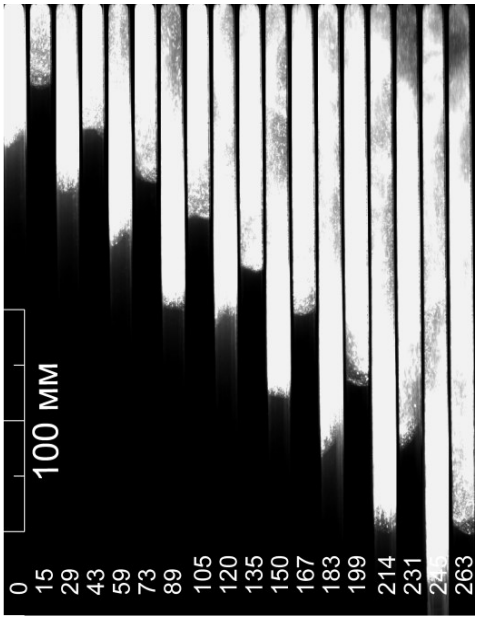
В

Рисунок 4.1.6 – Цифровые снимки пламени (*а*) и скорости фронта волны горения в оптической секции в зависимости от расстояния *l* (*б*) и времени *t* (*в*): *1* – скорости фронта волны горения, измеренные с шагом 4 мс; *2* – осредненные скорости фронта волны горения. Газовая смесь CH_4+13,286воздух (7 % об. метана)

Частоты колебаний пламени, измеренные в газовой смеси CH_4+13,286воздух с помощью оптической камеры, находятся в диапазоне $f \approx 32 \pm 1$ Гц. Аналогичные колебания скорости волны горения наблюдаются в стехиометрической смеси CH_4/воздух, где свечение пламени более яркое.

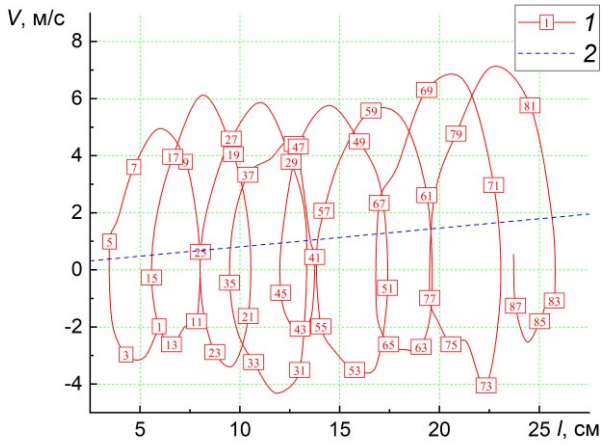
Оптическая съёмка волн горения в смесях CH_4/воздух/уголь

Интенсивность свечения в смесях (CH_4+13,286воздух)/взвесь угля на 1–2 порядка выше, чем в газовых смесях CH_4/воздух. Поэтому частота съёмки была повышена до *F* = 1000 кадр/с, а время выдержки уменьшено до *St* = 1/3000÷1/10000 с. Цифровые снимки свечения пламени и кривые скоростей фронта волны горения *v*(*l*) и *v*(*t*) приведены на рисунке 4.1.7 и 4.1.8. Частота колебаний пламени здесь $f \approx 32{,}2$ Гц [31].

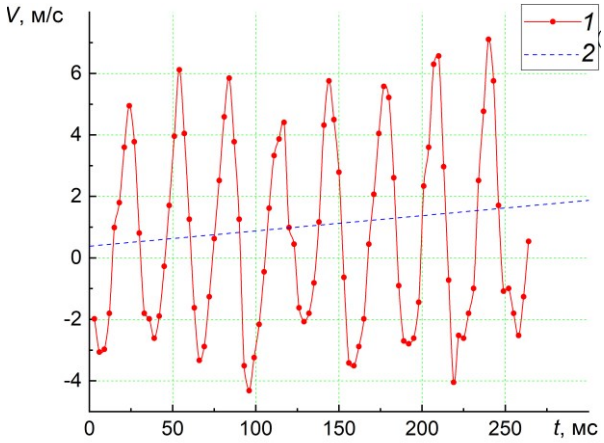


а

F = 1000 FPS, *St* = 1/3000 с. Снимки ВГ в моменты изменения направления движения волны (остановки). Цифры внизу – время от первого кадра, мс



б

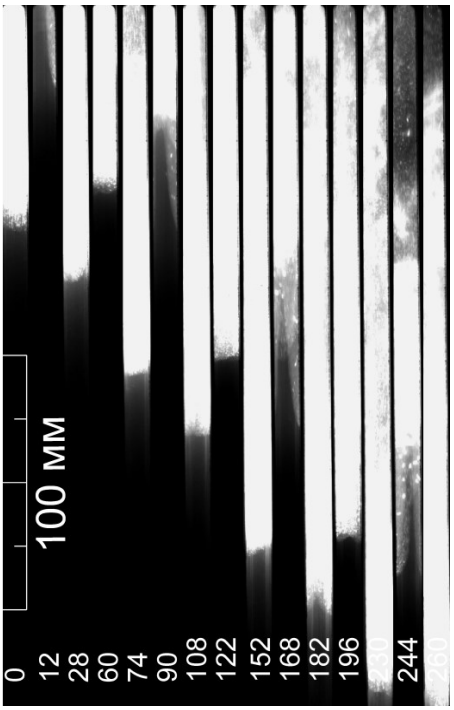


в

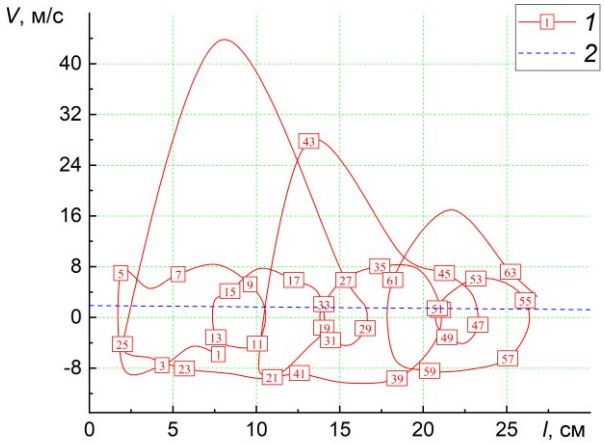
Рисунок 4.1.7 – Снимки пламени (*а*) и скорости распространения волны горения в оптической секции в зависимости от расстояния *l* (*б*) и времени *t* (*в*): *1* – скорости фронта волны горения, измеренные с шагом 3 мс; *2* – осредненные скорости фронта волны горения. Смесь (CH_4+13,286воздух)/взвесь угля при $\rho \approx 393$ г/м^3

На рисунке 4.1.7 фронт пламени также неровный, протяжённость яркой части пламени изменяется во времени и составляет 20÷30 см. Видны неоднородности свечения пламени. Максимальные значения скорости меняются в диапазоне –4,3 м/с ≤ *v* ≤ +7,3 м/с. Пламя распространяется вниз по трубе со средней скоростью $\bar{v}(l) \approx 0{,}4 \div 1{,}5$ м/с [31].

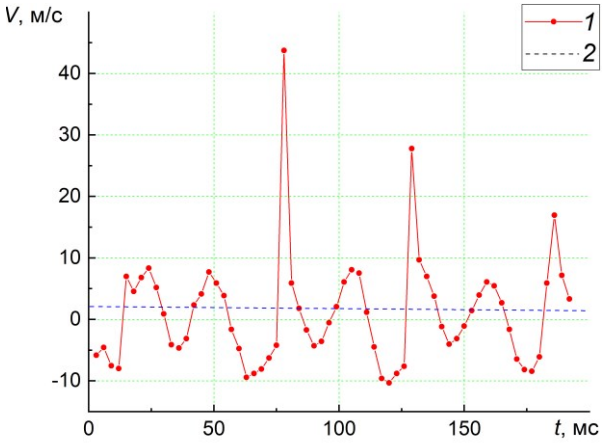
На рисунке 4.1.8 из-за увеличения частоты *F* и уменьшения величины *St* на переднем фронте пламени удаётся различить неоднородные струйные области. На графиках *v*(*l*) и *v*(*t*) разрешаются дополнительные подробности и зарегистрированы максимальные скорости $v \approx +45$ и $v \approx -10$ м/с. Частота колебаний пламени в этом опыте $f \approx 32{,}2$ Гц [31].



а



б



В

F = 1000 FPS, St = 1/5000 с. Снимки ВГ в моменты изменения направления движения волны (остановки). Цифры внизу – время от первого кадра, мс

Рисунок 4.1.8 – Снимки пламени (*а*) и скорости распространения волны горения в оптической секции в зависимости от расстояния l (*б*) и времени t (*в*): *1* – скорости фронта волны горения, измеренные с шагом 3 мс; *2* – осредненные скорости фронта волны горения. Смесь (CH_4+13,286воздух)/взвесь угля при ρ = 318 г/м^3

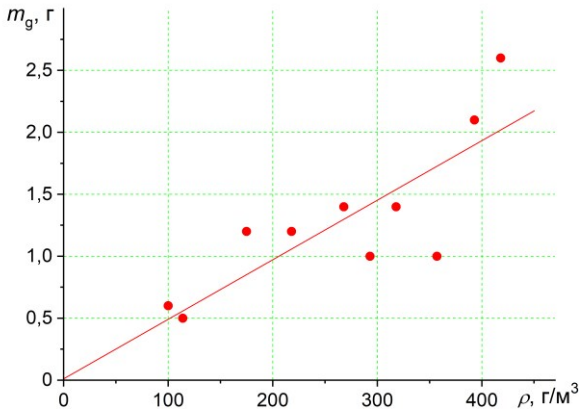


Рисунок 4.1.9 – Масса угля, перешедшего в газовую фазу, в зависимости от величины ρ

Масса угля $m_g(\rho)$, перешедшего в газовую фазу приведена на рисунке 4.1.9. Величину m_g определяли по формуле $m_g = m_1 – m_2 – m_3$, где m_1 – масса угля, поступившего в ударную трубу, m_2 – масса угля, оказавшегося на фланце, m_3 – масса угля на стенках.

Из рисунка 4.1.9 видно, что зависимость m_g от ρ близка к линейной. При $\rho \approx 100$ г/м^3 $m_g/m_{st} \approx 0,6$ – т. е. примерно половина стехиометрической массы угля переходит в газовую фазу, а при увеличении концентрации частиц угля в четыре раза величина $m_g/m_{st} \approx 2,3 \div 2,8$ [31].

4.2 Исследование распространения пламени в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/уголь в закрытом вертикальном канале

Экспериментальные результаты исследования пламён, взрывных и детонационных волн в системах метан/воздух/уголь, метан/кислород/уголь, метан/водород/воздух/уголь содержатся в [29, 30, 32, 57]. В частности, в [29, 30, 32, 57] показано, что параметры детонации в газовых и газоугольных смесях близки между собой, массовая доля сгоревшего угля не превышает 20 % от стехиометрической концентрации. Аналогичные результаты получены и для волн горения. Это означает, что основное энерговыделение в зоне реакции детонационных и дефлаграционных волн происходит за счёт горения метана, а не угольных частиц, которым не хватает времени для сгорания в высокотемпературной зоне.

Технические данные о нижнем концентрационном пределе распространения (НКПР) пламени метана в воздухе отличаются между собой. Например, в технических условиях на поставку природного газа по ГОСТ 5542–2014 и СТО Газпром 089–2010 НКПР пламени метана в воздухе α^* = 4,4 % (об.). Согласно ГОСТ Р 12.3.047–98 (Пожарная безопасность технологических процессов, общие требования, методы контроля) НКПР пламени метана α^* = 5,28 % (об.).

Анализ научной литературы показывает, что данные НКПР пламени метана отличаются у разных авторов и из-за разных условий проведения опытов. Так в стандартных условиях при поджигании смеси снизу в вертикальной трубке длиной l = 1,5 м и диаметром d = 0,05 м НКПР метана в воздухе α^* = 5,0 % (об.) [60] и α^* = 5,28 % (об.) [61]. Для смесей CH_4/воздух при распространении пламени вверх, горизонтально и вниз в закрытой трубке l = 1,5 м и d = 0,075 м в [58] приводятся НКПР пламени метана α^* = 5,35, 5,40 и 5,95 % (об.) соответственно. Из этих данных видно, что наиболее затруднено распространение пламени вниз (поджигание сверху). В [62] проведён анализ влияния различных факторов (температуры, давления, концентрации метана и добавок) на характеристики взрывоопасности метана на основе данных авторов и данных, взятых из литературы [33]. В [63] содержатся полезные данные о физических процессах и пожаровзрывоопасности промышленных пылей.

Исследованию газовых пламён в открытых с одного конца трубках посвящены работы [64–66], а также часть цитируемых в них работ. В [64] изучали пределы горения метановоздушных смесей в вертикальных трубках d = 0,045÷0,167 м, l = 1 и 3 м с открытым нижним или верхним концом при зажигании сверху (опыты по схемам I÷III). В двух постановках опытов пределы горения не зависели от диаметра трубы при d_{I} = 0,02÷0,167 и d_{III} = 0,057÷0,167 м. Теплообмен в

основном определялся свободной конвекцией. Полученные результаты сопоставлены с результатами опытов для пламён, движущихся вверх в открытых снизу трубах d = 0,019, 0,062 и 0,25 м, l = 1,5 и 2 м [33].

В [65] изучали распространение пламени в пропане и пропилене с хладонами (разбавителями) при зажигании сверху в открытой трубке d = 0,05 м, l = 1,5 м. Полученные результаты сопоставлены с результатами опытов для пламён, движущихся вверх. Отмечается, что область воспламенения движущегося вниз пламени значительно уже, чем распространяющегося снизу вверх, т.е. механизмы гашения в этих случаях разные и требуют дальнейшего изучения. В опытах [66] с газообразными углеводородами и хладонами на стандартной установке – трубке d = 0,05 м, l = 1,5 м при зажигании искрой снизу область воспламенения была меньше, чем в сосуде объёмом 53 л, значения НКПР пламени практически совпадали при всех концентрациях кислорода на установках обоих типов [33].

В длинном закрытом вертикальном канале при поджигании смеси сверху распространение пламени вниз затрудняют всплывающие вверх более лёгкие продукты горения. Для выяснения характера распространения и определения НКПР пламени в смесях CH_4/воздух и CH_4/воздух/уголь в вертикальной закрытой трубе необходимы дополнительные эксперименты.

В [63] описаны опыты, в которых на установке с открытым концом для трёх типов длиннопламённых углей при среднеобъёмной плотности $\rho \approx 400$ г/м^3 происходило искровое зажигание метаноугольных смесей с концентрацией метана, меньшей НКПР пламени α^* = 5,1 % (об.). Существует предположение, что при инициировании бедной смеси метан/воздух/уголь частицы угля наряду с метаном тоже воспламенятся и понизят метановый НКПР пламени в несколько раз. При таком существенном уменьшении α^* возрастёт пожароопасность в угольных шахтах. Для проверки этой гипотезы необходимо исследовать смеси CH_4/воздух/уголь с концентрацией метана $\alpha \leq 5$ % (об.). Ниже приведены результаты исследования распространения пламен в газовых метановоздушных смесях и гетерогенных смесях CH_4/воздух/угольная взвесь вблизи НКПР в длинном закрытом вертикальном канале при поджигании сверху [33]. Основные результаты настоящего раздела 4.2 опубликованы в [33].

Постановка экспериментов

Среднеобъёмная концентрация частиц угольной пыли в трубе $\rho_0 \approx 100 \div 530$ г/м^3. При изменении ρ_0 от 530 до 100 г/м^3 количество осевшего на стенках порошка угля после протирки трубы составляло соответственно 10÷30 % от массы угля в объеме трубы. Для более полного удаления угля со стенок трубу промывали и протирали, при этом способ очистки стенок трубы не влиял на параметры волны и НКПР пламени. Температура в помещении (и стенок трубы) 18 °С.

Результаты экспериментов

Смеси $\alpha CH_4+(1-\alpha)$воздух, αCH_4/воздух/уголь (α = 5,0; 5,5 %)

При искровом инициировании в газовых смесях α = 5,0; 5,5 % волны горения не возбуждались. При более сильном инициировании смесей открытым внешним огнём трубу заполняли до p_{01} = 0,09 и p_{02} = 0,08 МПа газовыми смесями α = 5,0 либо 5,5 %, затем сверху добавляли соответственно 0,01 и 0,02 МПа стехиометрической смеси (α_{st} = 9,5 %) на длину $x_1 \approx 0{,}7$ и $x_2 \approx 1{,}4$ м до достижения давления $p_0 = 0{,}1$ МПа. Длина столба стехиометрической смеси (x_1, x_2) определялась из уравнения состояния идеального газа для изотермического процесса при заданной величине добавки давления смеси. В стехиометрической смеси после искрового инициирования распространялось пламя. В исследуемых смесях, расположенных ниже, регистрировались расширяющиеся продукты горения стехиометрической смеси вплоть до расстояний $X_1 \approx 2{,}3$ и $X_2 \approx 3$ м (рисунок 4.2.1). На датчиках в момент прихода фронта свечения начинается либо спад, либо подъём сигнала. При $x > X_1$, X_2 свечение продуктов реакции прекращалось (рисунок 4.2.1, сигнал ФЭУ2, на Д5÷Д8 волна сжатия исчезала) [33].

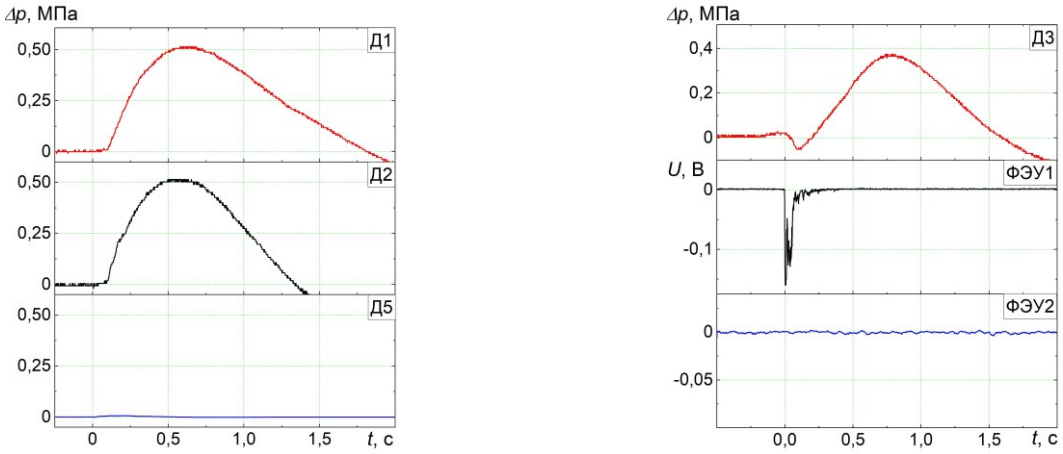


Рисунок 4.2.1 – Сигналы с датчиков и ФЭУ при прохождении волны горения по стехиометрической смеси 9,5 %CH_4/воздух ($x_1 \approx 0{,}7$ м), смесь 5,0 %CH_4+95 %воздух не воспламеняется (смесь расположена ниже стехиометрической смеси), $\Delta p = p - p_0$

Точно такие же профили давления, свечения и значения X_1, X_2 наблюдали и в случае, если трубу заполняли воздухом, а сверху добавляли то же количество стех. смеси 9,5 %CH_4/воздух. Выполненные опыты доказывают отсутствие волн горения в вертикальном канале в бедных метановоздушных смесях при α = 5,0; 5,5 % [33].

Смеси αCH_4/воздух/угольная взвесь, α = 5,0; 5,5 %, ρ_0 = 50–530 г/м^3 также не воспламенялись от искры ($W \geq 1 \div 10$ Дж). При заполнении трубы взвесью αCH_4/воздух/уголь (α = 5,0; 5,5 %), до p_{02} = 0,08 МПа и добавлении без задержки по времени сверху до p_0 = 0,1 МПа взвеси 9,5 %CH_4/воздух/уголь после инициирования продукты горения стех. смеси расширялись до $X_2 \approx 3$ м. Затем при $x > X_2$ свечение на ФЭУ и пучности давления на датчиках Д6÷Д8 полностью

исчезали. Пламя не образуется в ДГС при $\alpha =$ 5,0; 5,5 %, потому что метановоздушные смеси, как показано выше, при этих значениях α не воспламеняются, а частицы угля в отсутствие пламени не являются эквивалентной заменой метана [33].

Скорость D волны горения и расширяющихся продуктов реакции определяли по ФЭУ и датчикам. На рисунке 4.2.2 и 4.2.3 приведены осреднённые скорости пламени и переднего фронта расширяющихся продуктов горения стех. смеси, находящейся выше метановоздушных смесей $\alpha = 5{,}0$; 5,5 % (об.) или воздуха. При $x \geq 2{,}8$ м процесс полностью затухает. Для кривых приведены либо только положительные, либо только отрицательные значения доверительных интервалов, чтобы не было их наложения. Из–за нестационарности процесса и изменения профилей давления во времени ошибки измерения скорости здесь достигали 50 % [33].

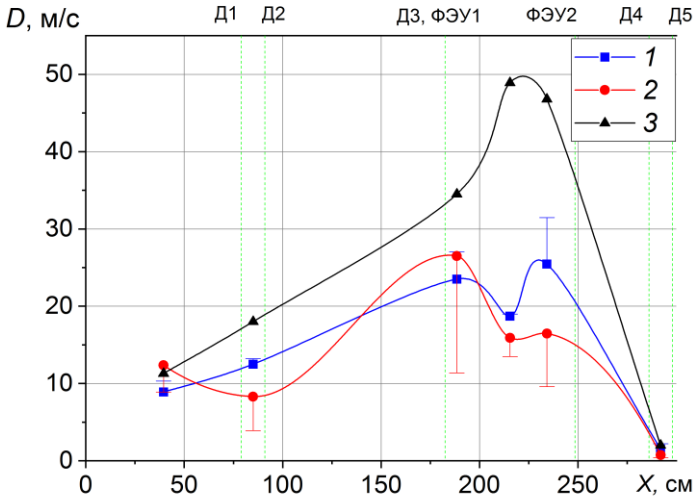


Рисунок 4.2.2 – Осреднённые скорости пламени и расширяющихся продуктов горения стехиометрической смеси 9,5 %CH_4/воздух по длине трубы:

1 – 9,5 %CH_4/воздух+5,0 %CH_4/воздух; *2* – 9,5 %CH_4/воздух/уголь + 5,0 %CH_4/воздух/уголь; *3* – 9,5 %CH_4/воздух + воздух. Смеси $\alpha = 5{,}0$ % и воздух (p_{02} = 0,08 МПа) расположены ниже стехиометрической смеси

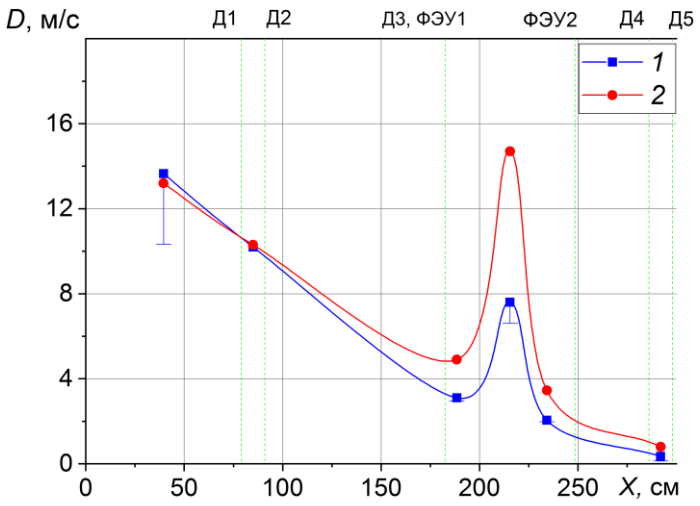


Рисунок 4.2.3 – Осреднённые скорости пламени и расширяющихся продуктов горения стех. смеси 9,5 %CH_4/воздух: *1* – 5,5 %CH_4/воздух+9,5 %CH_4/воздух; *2* – 5,5 %CH_4/воздух/уголь+9,5 %CH_4/воздух/уголь. Смеси α = 5,5 % (p_{01} = 0,09 МПа) расположены ниже стехиометрической смеси.

Высокие значения скорости фронта (10÷50 м/с) в начале трубы объясняются наличием участка активной стехиометрической смеси. Таким образом, открытый огонь (расширяющиеся продукты горения стех. метановоздушной смеси) не распространялся в воздухе и в исследуемых смесях αCH_4+(1–α)воздух, αCH_4/воздух/уголь (α = 5,0; 5,5 %) дальше расстояний X_1, X_2. Эти опыты доказывают отсутствие волн горения в вертикальном канале в бедных метановоздушных смесях при α = 5,0; 5,5 %. В вертикальной трубе при инициировании сверху НКПР горения метана α^* > 5,5 %, поэтому исследования газовых смесей и ДГС с более низкой концентрацией CH_4 не проводили.

Графики скорости построены на основе осциллограмм с датчиков давления и ФЭУ. Точки на графиках скорости расположены посередине между соответствующими базами датчиков и ФЭУ. Осреднение скорости проводилось по нескольким опытам, от 2 до 11 для различных условий. Вычислялись значения средних скоростей между соответствующими базами и среднеквадратичное отклонение.

Смеси $\alpha$$CH_4$+(1–$\alpha$)воздух, $\alpha$$CH_4$/воздух/уголь, α = 6,0 %

Газовые смеси при α = 6,0 % воспламенялись от искры, и вниз по трубе распространялись волны горения. Интенсивность свечения в пламёнах слабая. Пламя распространяется бесшумно со скоростью $D \approx$ 0,3–0,08 м/с в виде тонкого светящегося круга. При движении фронт пламени, плавно изгибаясь, остаётся близким к плоской форме. После прохождения пламени давление в трубе уменьшается до $p_2 \approx$ 0,091–0,093 МПа. Из–за постепенного уменьшения давления в трубе и низкого энерговыделения пламя в нижней части трубы в 70–80 % опытов затухает [33].

Снимки свечения волны горения в оптической секции приведены на рисунке 4.2.4 – пламя здесь короткое, скорость его на длине оптической секции в среднем постоянна.

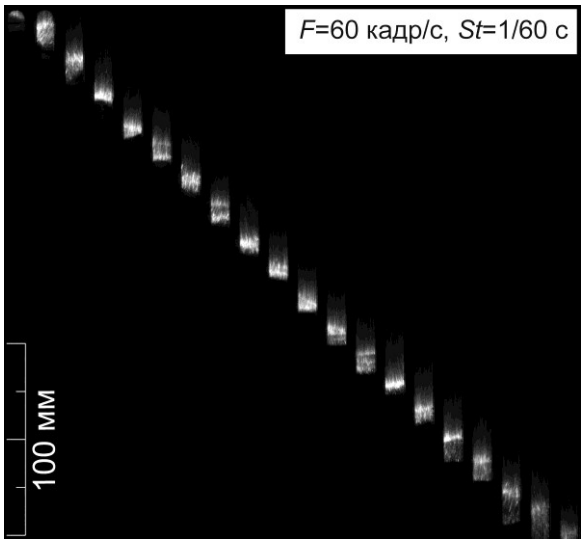


Рисунок 4.2.4 – Покадровые снимки свечения волны горения в оптической секции. Смесь 6,0 %CH_4/воздух. Кадры выбраны с частотой 5 кадр/с

Интенсивность свечения в ДГС 6,0 %CH_4/воздух/уголь примерно на порядок превышает свечение в газовой смеси. Пламя в нижней части трубы затухает (сигналы на Д7, Д8 исчезают).

В смесях 6,0 %CH_4/воздух/уголь наблюдаются два режима распространения волн горения. Первый режим такой же, как и в газовой смеси 6,0 %CH_4/воздух. Пламя распространяется бесшумно, в среднем равномерно (рисунок 4.2.5) в виде тонкого ярко светящегося круга, скорость пламени $D \approx 0{,}35$–$0{,}1$ м/с выше, чем в газовой смеси 6,0 %CH_4/воздух [33].

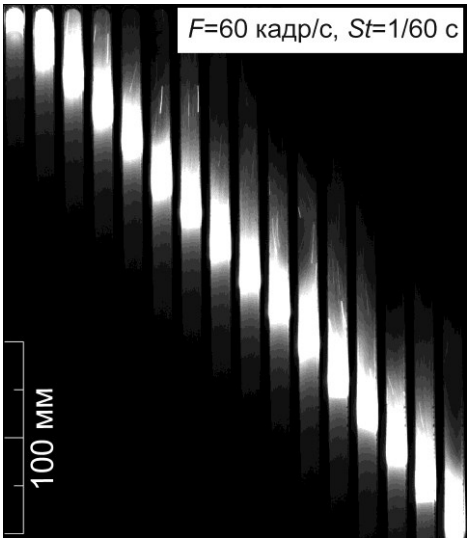


Рисунок 4.2.5 – Покадровые снимки свечения волны горения в оптической секции. Смесь 6,0 %CH_4/воздух/уголь при $\rho \approx 202$ г/м^3. Кадры выбраны с частотой 5 кадр/с

Второй режим наблюдается при увеличении концентрации угля, он более высокоскоростной по сравнению с первым режимом. Характерные осциллограммы сигналов с датчиков и ФЭУ приведены на рисунке 4.2.6. Волна горения по трубе распространяется с шипением, пламя ярче и длиннее на порядок (рисунок 4.2.7) по сравнению с первым режимом. На рисунке 4.2.6 и 4.2.7 приведены результаты измерений в одном и том же опыте. Во втором режиме, как и в разделе 4.1 ([31, 67]), вдоль щели наблюдаются многократные колебания пламени со знакопеременной скоростью, когда волна периодически останавливается и меняет направление движения (рисунок 4.2.7). Скорости волны горения по длине трубы $D \approx 0{,}45–1{,}6$ м/с, в конце трубы пламя замедляется до значений $D_{78} \approx 0{,}36$ м/с [33].

В [64], опыты I (верх трубы открыт, низ закрыт, зажигание сверху факелом) наблюдалось спокойное распространение пламени, в опытах III (верх трубы закрыт, низ открыт, зажигание искрой сверху) пламя совершало одно колебание: двигалось вниз, затем замедлялось, и при движении верх, приобретая форму колокола, затухало [33].

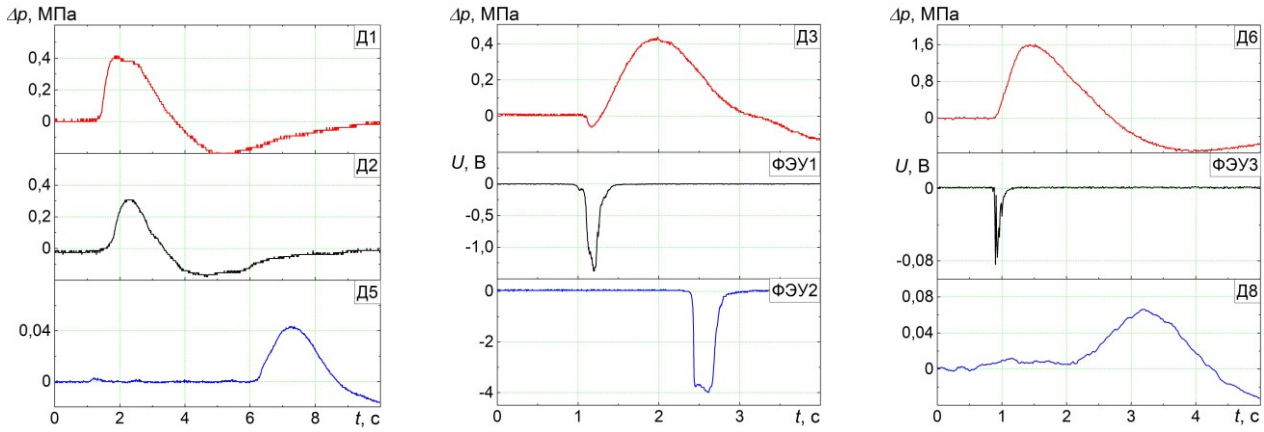


Рисунок 4.2.6 – Сигналы с датчиков Д1÷Д8 и ФЭУ1÷ФЭУ3 при прохождении волны горения в смеси 6,0 %CH_4/воздух/уголь при $\rho \approx 527$ г/м^3. Экспериментальные скорости: $D_{01} \approx 1{,}98$, $D_{12} \approx 0{,}48$, $D_{24} \approx 0{,}41$, $D_{34} \approx 0{,}43$, $D_{ФЭУ1–2} \approx 0{,}47$, $D_{45} \approx 1{,}2$, $D_{67} \approx 1{,}6$, $D_{78} \approx 0{,}36$ м/с

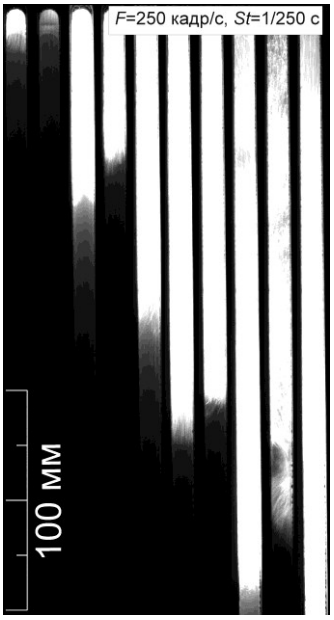


Рисунок 4.2.7 – Покадровые снимки свечения волны горения в оптической секции в смеси 6,0 %CH_4/воздух/уголь при $\rho \approx 527$ г/м^3. Кадры выбраны с частотой 50 кадр/с

Зависимости осреднённых скоростей $D(x)$ для волн горения в газовой смеси и в ДГС 6,0 %CH_4/воздух/уголь приведены на рисунке 4.2.8. Здесь для соседних кривых приведены либо положительные, либо отрицательные доверительные интервалы (чтобы исключить их пересечение на рисунке). Скорости волн горения в ДГС из-за наличия частиц угля и дополнительного энерговыделения во второй половине трубы выше, чем в смеси 6,0 %CH_4/воздух [33]. Вероятной причиной ускорения пламени может служить естественный процесс турбулизации газа перед волной горения, а также вклад от горения частиц угля.

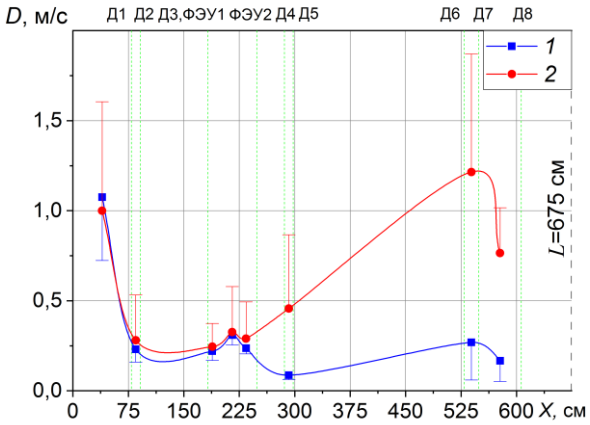


Рисунок 4.2.8 – Осреднённые скорости волн горения по длине трубы:
1 – 6,0 %CH_4+94 %воздух; *2* – ДГС 6,0 %CH_4/воздух/уголь при $\rho \approx 100 \div 530$ г/м^3

Небольшое замедление скорости волны горения в конце трубы происходит с уменьшением среднего давления в ударной трубе при сгорании газовой и газоугольной смесей.

Смеси αCH$_4$+(1–α)воздух, αCH$_4$/воздух/уголь, α = 8,0 %

Газовая смесь 8,0 %CH$_4$+92,0 %воздух легко инициируется искрой с $W \approx 1$–10 Дж. Пламя совершает продольные характерные колебания и движется вниз со знакопеременной скоростью.

В ДГС 8,0 %CH$_4$/воздух/уголь при инициировании искрой возбуждается волна горения. Яркость пламени в ДГС, существенно выше, чем в газовой смеси. Фронт пламени неровный, свечение за фронтом неоднородное. Пламя, как и в газовой смеси, совершает продольные колебания со знакопеременной скоростью. Яркость пламени возрастает благодаря горению частиц угля. Реакция между избыточным кислородом в газовой смеси и углем не приводит к росту скорости пламени в ДГС по сравнению с газовой смесью 8,0 %CH$_4$/воздух. В опытах не обнаружено влияние среднеобъёмной плотности угольной взвеси на скорость пламени [33].

4.3 Исследование влияния добавок угольной взвеси на продольные колебания волн горения и НКПР пламени в метановоздушных смесях

НКПР пламени метана в воздухе приводят в литературе с разбросом $4{,}4 \le \alpha^* \le 5{,}95$ % (об.) [58, 60–62, 68, 69]. Основная причина большого разброса данных обусловлена разными условиями проведения опытов.

Большинство экспериментов по определению НКПР пламени метана выполнено в коротких (1,5 и 3 м) вертикальных каналах в газовых смесях [58, 60–62, 65, 66, 68, 69]. Ниже исследована возможность воспламенения газовых смесей αCH_4/воздух и ДГС αCH_4/воздух/уголь вблизи критического значения α^*. Для сравнения результатов опыты проведены в длинной вертикальной трубе и в горизонтальной трубке. Изучение волн горения в метаноугольных смесях необходимо для выработки научно обоснованных рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности в угольных шахтах и для разработки теоретических моделей явления, описывающих неустойчивость пламени.

В [70–72] изучались пламёна в смесях метан/воздух/угольная пыль. В [70] в сферической камере 26 л исследована воспламеняемость смесей воздух/уголь, метан/воздух/уголь при различных концентрациях летучих веществ, дисперсности угля и энергиях химических воспламенителей $10^4 \div 50$ Дж. В [71] показано, что в крупномасштабной горизонтальной трубе добавление угольной пыли в смесь αCH_4/воздух (α = 5,0 и 7,5 % (об.)) влияет на профиль давления и скорость пламени. В [31] измерены температуры пламени в смесях метан/воздух/уголь в вертикальном канале при поджиге искрой сверху; установлено, что химическая реакция начинается при температуре около 200 °C, её интенсивность увеличивается до 500 °C, а затем постепенно снижается. Основные результаты раздела 4.3 содержатся в работе [34].

Постановка экспериментов

Опыты проводили в закрытой сверху и снизу вертикальной трубе и в кварцевой горизонтальной трубке. Горение смесей инициировали сверху искрой или открытым огнём. Среднеобъёмная концентрация частиц пыли в трубе $\rho_0 \approx 100 \div 550$ г/м^3. Трубу чистили сухой ветошью, либо ветошью, смоченной водой со стиральным порошком (затем трубу насухо протирали, сушили). Способ очистки трубы не влиял на параметры пламени и α^*. Ошибки измерения скорости волн D не превышали 5 %.

В опытах в горизонтальной кварцевой трубке $50 < \rho_0 \le 900$ г/м^3, ошибка определения ρ_0 достигала 20 %. Смеси поджигали внутри трубки у открытого левого конца раскалённой нихромовой спиралью. После опыта с газовзвесями стенки трубки очищали ветошью.

Результаты экспериментов в вертикальной трубе

В газовой смеси αCH4+(1–α)воздух и в ДГС αCH4/воздух/уголь (α = 5,0; 5,5 %) при искровом инициировании и инициировании открытым огнём волны горения не возбуждаются. При инициировании открытым огнём трубу заполняли смесями αCH4+(1–α)воздух и ДГС αCH4/воздух/уголь, после чего сверху добавляли стех. смесь 9,5 %CH4/воздух на длину трубы $x_1 \approx$ 0,5–1 м до p_0 = 0,1 МПа. В стех. смеси α = 9,5 % после искрового инициирования распространялось пламя, ниже в исследуемых смесях регистрировались расширяющиеся продукты горения стех. смеси вплоть до расстояний от верхнего фланца трубы $X \approx$ 1,7–2,5 м. На расстоянии $x > X$ свечение прекращалось, волна сжатия исчезала. Такие же профили давления, свечения и значения X регистрировали, когда трубу заполняли воздухом, а сверху добавляли стех. смесь 9,5 %CH4/воздух. Опыты доказывают отсутствие волн горения в газовых смесях и ДГС в вертикальном канале при $\alpha \le$ 5,5 %, – это означает, что $\alpha^* >$ 5,5 % CH4 [34].

Газовые смеси при α = 6,0 % воспламенялись от искры. Пламя в виде тонкого слабо светящегося круга двигалось бесшумно вниз по трубе со скоростью D, убывающей от 30 до 8 см/с. Пламя движется вдоль оптической щели со средней скоростью $\bar{D} \approx$ +12 см/с. После прохождения волны горения давление в трубе уменьшалось до $p_2 \approx$ 0,092 МПа. Из-за уменьшения давления и низкого энерговыделения пламя в нижней части трубы в 70–80 % опытов затухало [34].

В ДГС 6,0 %CH4/воздух/уголь при сравнительно небольших ρ пламя распространяется бесшумно, в виде ярко светящегося круга, по длине трубы $D \approx$ 35÷9 см/с, в оптической щели $\bar{D} \approx$ +9 см/с.

При α = 6,0 % с увеличением концентрации угля в ДГС скорость пламени увеличивается, и на порядок возрастают длительность и интенсивность свечения. Как и в нашей работе [31], регистрируются сильные низкочастотные колебания пламени со знакопеременной скоростью – волна периодически останавливается, после чего резко меняет направление движения с частотой $f \approx$ 27–35 Гц. Вдоль оптической щели средняя скорость фронта пламени при движении вниз $\bar{D}_+ \approx$ +6,6 м/с – больше, чем средняя скорость при колебаниях вверх ($\bar{D}_- \approx$ – 2,2 м/с), $\bar{D} \approx$ +2 м/с, величина $|\bar{D}_+|$ всегда больше, чем $|\bar{D}_-|$. Знак скорости при движении вниз принят положительным, вверх – отрицательным. По трекам свечения видно, что газ с частицами угля при колебаниях перемещается вверх и вниз вместе с фронтом пламени, продукты горения поднимаются вверх по каналу (с отрицательной скоростью). Для этого режима горения на рисунке 4.3.1 приведены сигналы с датчиков и ФЭУ, здесь $\Delta p = p - p_0$, p – давление в волне, p_0 = 0,1 МПа. Начало свечения совпадает с началом подъёма давления в волне горения. Протяжённость области сжатия приблизительно на порядок больше области свечения.

Длительность области сжатия по осциллограммам 1,6÷2,5 с, протяжённость 0,8÷4 м. Средние скорости волны горения на участках измерения $D_{ij} \approx 0{,}3 \div 2{,}5$ м/с, в конце трубы $D_{78} \approx 1{,}1$ м/с (рисунок 4.3.1). Пламя за время прохождения оптической щели ($t_1 \approx 0{,}25$ с) совершает 7–8 колебаний [34].

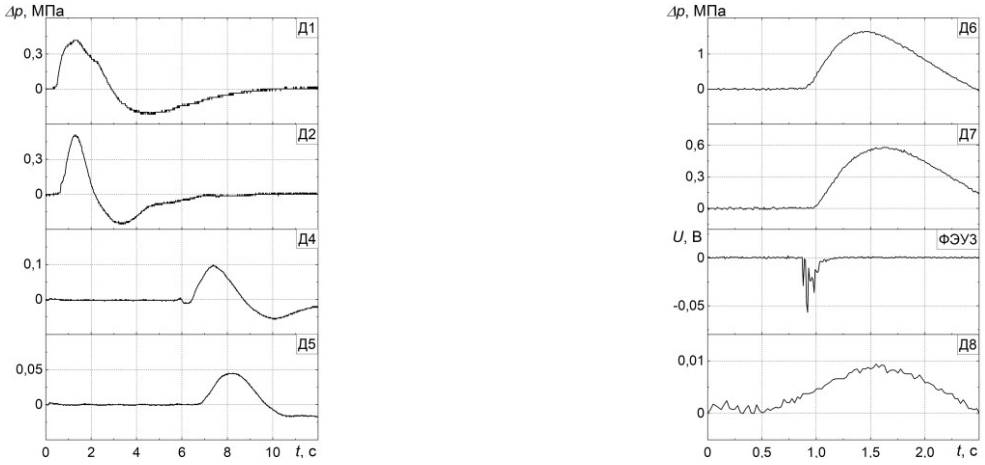


Рисунок 4.3.1 – Сигналы с датчиков Д1÷Д8 и ФЭУ1÷ФЭУ3 при прохождении волны горения в ДГС 6,0 %CH_4/воздух/уголь при $\rho \approx 390$ г/м^3. Экспериментальные скорости: $D_{01} \approx 1{,}79$, $D_{12} \approx 0{,}65$, $D_{24} \approx 0{,}33$, $D_{34} \approx 0{,}42$, $D_{ФЭУ1–2} \approx 0{,}83$, $D_{45} \approx 0{,}45$, $D_{67} \approx 2{,}4$, $D_{78} \approx 1{,}08$ м/с

Вблизи α^* скорости волн горения в ДГС при α = 6,0 % из-за дополнительного энерговыделения частиц угля выше, чем в смеси 6,0 %CH_4/воздух. Из опытов следует, что НКПР волн горения 6,0 % ≥ α^* > 5,5 % CH_4.

Аналогично смеси с α = 6,0 %CH_4 газовая смесь 7,0 %CH_4+93,0 %воздух инициируется искрой, пламя совершает колебания и движется вниз со знакопеременной скоростью, $\bar{D}_+ \approx +3{,}6$ м/с, $\bar{D}_- \approx -1{,}7$ м/с, в оптической щели $\bar{D} \approx +1{,}2$ м/с, $f \approx 31$ Гц. ДГС 7,0 %CH_4/воздух/уголь также инициируется искрой, яркость пламени существенно выше, чем в газовой смеси. Фронт пламени неровный, свечение за фронтом неоднородное. Пламя совершает колебания со знакопеременной скоростью, $\bar{D}_+ \approx +5$ м/с, $\bar{D}_- \approx -2$ м/с. Химические реакции между избыточным кислородом в газовой смеси и углем не приводят к существенному росту скорости пламени в ДГС по сравнению с газовой смесью 7 %CH_4/воздух. В ДГС с удалением от нижнего предела при α = 7,0 % не обнаружено существенного влияния среднеобъёмной плотности угольной взвеси на скорость пламени [34].

Физическая модель распространения пламени со знакопеременной скоростью

Физическая модель такой неустойчивости представляется следующей. После инициирования смеси вверху трубы фронт пламени распространяется вниз, одновременно более лёгкие продукты горения под действием выталкивающей силы Архимеда поднимаются вверх и

увлекают за собой в область разрежения часть свежей смеси. В результате фронт ВГ замедляется, останавливается, вектор скорости разворачивается на 180°, и пламя движется некоторое время вверх. По мере сгорания этого всплывшего вверх объёма смеси пламя вновь останавливается, меняет направление движения и движется вниз по свежей смеси. Процесс повторяется с частотой $f \approx 32\pm1$ Гц – возникают колебания фронта ВГ со знакопеременной скоростью. Скорость фронта ВГ после изменения направления движения примерно на порядок превышает среднюю скорость пламени $\bar{v} \approx 1\pm0{,}5$ м/с, амплитуда продольных колебаний пламени составляет 5–10 см [34].

Продукты горения за пульсирующим фронтом пламени постоянно всплывают вверх по трубе. Одновременно с возвратно–поступательным движением пламени в канале возникают низкочастотные звуковые колебания при отражении от торцов трубы возмущений давления из зоны реакции. Скорости и характерные масштабы этих двух процессов разные.

Результаты экспериментов в горизонтальной трубке

Смеси αCH₄+(1–α)воздух, αCH₄/воздух/уголь, α = 5,5 %

Поджиг смеси спиралью осуществляли при плавном сбросе давления подачи смеси на редукторе баллона в момент времени, близкий к окончанию подачи смеси. При этом спираль переставала охлаждаться потоком газа и краснела, поджигая смесь. Такой способ инициирования смеси гарантировал синхронность между покраснением спирали (поджигом) и остановкой смеси, обеспечивая постоянство её состава в момент поджига. Газовая смесь 5,5 %CH₄/воздух не воспламенялась спиралью у левого открытого конца трубки. Смесь загоралась, когда спираль вдвигали внутрь трубки на расстояние более 15 см. В этом случае едва различимое ламинарное пламя распространялось в обе стороны от спирали с убывающей скоростью $V \approx 38\div20$ см/с на расстояние до 1–3 см, затем волна горения исчезала (рисунок 4.3.2*а*, кривая *1*) [34].

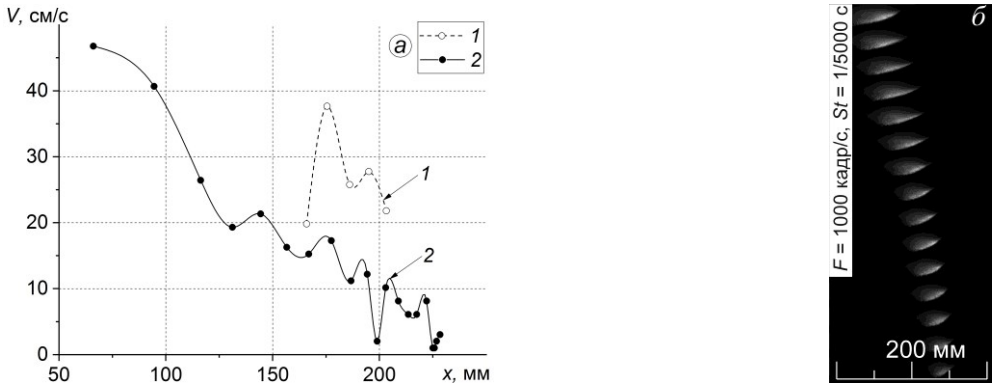


Рисунок 4.3.2 – Скорость пламени и соответствующие снимки свечения при $\rho \approx 80$ г/м^3: *а* – 5,5 %CH₄/воздух (кривая *1*) и 5,5 %CH₄/воздух/уголь (кривая *2*); *б* –5,5 %CH₄/воздух/уголь. Кадры приведены через Δt = 50 мс, диафрагма объектива 11

ДГС 5,5 %CH_4/воздух/уголь более активная, чем газовая смесь – она воспламенялась от спирали внутри трубки и вблизи левого открытого конца трубки. После воспламенения пламя распространялось вправо по трубке с убывающей скоростью от 47 до 2–5 см/с (рисунок 4.3.2*а*, кривая *2*). Благодаря горению частиц угля интенсивность свечения пламени в ДГС больше, чем в газовой смеси. На расстоянии $x \geq 13$ см здесь возникают небольшие колебания скорости фронта пламени. На кадрах (рисунок 4.3.2*б*) видно, что фронт пламени наклонён и вытягивается в верхней части трубки узким языком вперёд. По мере распространения пламя становится короче, и исчезает примерно на расстоянии 15 см от места образования.

Для сравнения, в вертикальной трубе при поджигании сверху газовые смеси и ДГС с $\alpha = 5{,}5$ % не загорались и волны горения не возбуждались.

Смеси α%CH_4+(1–α)воздух, α%CH_4/воздух/уголь, α = 6,0 %

Газовые смеси и ДГС при $\alpha = 6$ % воспламенялись от нагретой спирали, расположенной у открытого конца трубки, и по всей длине распространялось ламинарное пламя. Свечение пламени в газовой смеси слабое (рисунок 4.3.3*а*). Волны горения распространяются равномерно, со скоростью $V \approx 23$–24 см/с в виде изогнутого вперёд и вверх языка.

Фронт пламени в ДГС (рисунок 4.3.3*б*) более крутой по сравнению с газовой смесью, по–видимому, из-за увеличения конвекции продуктов горения при повышении температуры пламени за счёт горения частиц угля. Свечение пламени в ДГС более яркое из-за горения угля.



Рисунок 4.3.3 – Снимки свечения ламинарного пламени: *а* – 6,0 %CH_4+94,0 %воздух; *б* – (6,0 %CH_4+94,0 %воздух)/уголь при $\rho \approx 430$ г/м^3. Кадры приведены через $\Delta t = 50$ мс, диафрагма объектива 5,6

На рисунке 4.3.4 приведены средние между кадрами скорости ламинарного пламени (ЛП), соответствующие опытам рисунке 4.3.3. Осреднённая скорость для метаноугольной взвеси ($\bar{V} \approx 28$ см/с) выше, чем в метановоздушной смеси примерно на 4 см/с. В смесях наблюдаются колебания скорости фронта пламени с частотой $f_1 \approx 5$ Гц и $f_2 \approx 7$ Гц. По–видимому, из-за более высокой температуры частота колебаний скорости в ДГС выше, чем в газовой смеси.

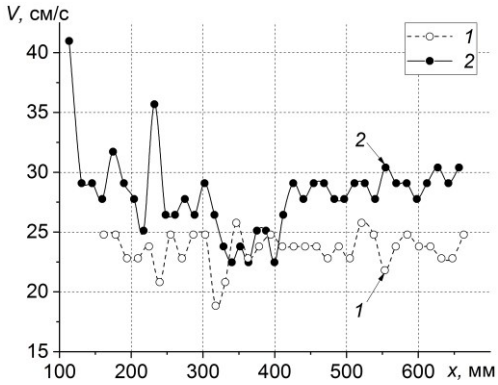


Рисунок 4.3.4 – Скорость ламинарного пламени по длине трубки:

1 – смесь 6,0 %CH_4+94,0 %воздух; *2* – смесь (6,0 %CH_4+94,0 %воздух)/уголь при $\rho \approx 430$ г/м^3

Смеси $\alpha$$CH_4$+(1–$\alpha$)воздух, $\alpha$$CH_4$/воздух/уголь, α = 7,0 %

Смеси с α = 7,0 % более активные, чем смеси с α = 6,0 %, свечение пламени ярче. При α = 7,0 % скорость волны горения больше, чем в смесях с α = 6,0 %, наблюдаются характерные слабые колебания скорости пламени (рисунок 4.3.5, кривая *1*). Амплитуда колебаний скорости пламени в ДГС меньше, чем в газовой смеси. При малых концентрациях угольной взвеси волна горения распространяется в среднем с постоянной скоростью (рисунок 4.3.5, кривая *2*). Осреднённые скорости в газовых смесях и ДГС при α = 7,0 % приблизительно одинаковы ($\bar{V} \approx 35$ см/с).

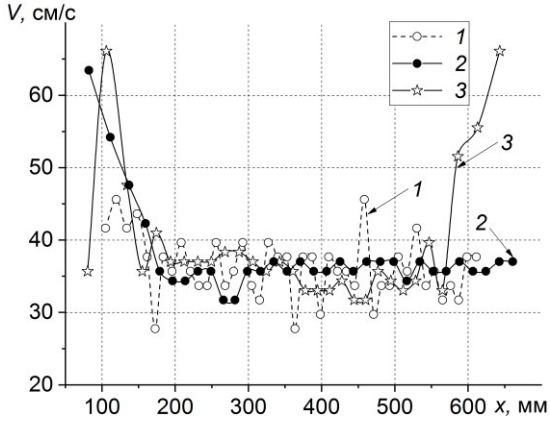


Рисунок 4.3.5 – Скорости ламинарного пламени по длине трубки:

1 – смесь 7,0 %CH_4+93,0 %воздух; *2*, *3* – смеси (7,0 %CH_4+93,0 %воздух)/уголь.

2 – $\rho \approx 63$ г/м^3, 3 – $\rho \approx 870$ г/м^3

С возрастанием концентрации угольной взвеси усиливается турбулизация потока, и наблюдается ускорение волны горения в конце трубки (рисунок 4.3.5, кривая *3*).

Смеси $\alpha$$CH_4$+(1–$\alpha$)воздух, $\alpha$$CH_4$/воздух/уголь, α = 8,0 %

При возрастании объёмной доли метана в смеси 8,0 %CH_4+92,0 %воздух крутизна пламени существенно увеличилась по сравнению с предыдущими опытами, и она приблизительно совпадает с наклоном пламени в ДГС с α = 8,0 % (рисунок. 4.3.6*а*, *б*).

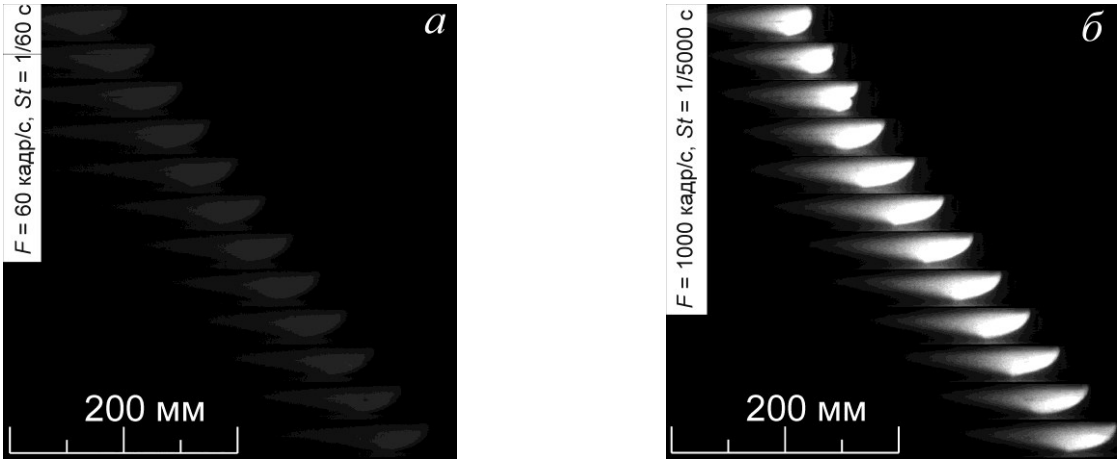


Рисунок 4.3.6 – Снимки свечения ламинарного пламени: *а* –8,0 %CH_4+92,0 %воздух; *б* – (8,0 %CH_4+92,0 %воздух)/уголь при $\rho \approx 65$ г/м^3. Кадры приведены через Δt = 50 мс, диафрагма объектива 11

Для газовой смеси и ДГС с α = 8,0 % осреднённые скорости возросли до $\bar{V} \approx 50$ см/с (см. рисунок 4.3.7, кривые *1*, *2*), и по сравнению с α = 7,0 % увеличились на 15 см/с. При малых концентрациях угольной взвеси волна горения в среднем распространяется с постоянной скоростью (рисунок 4.3.7, кривая *2*).

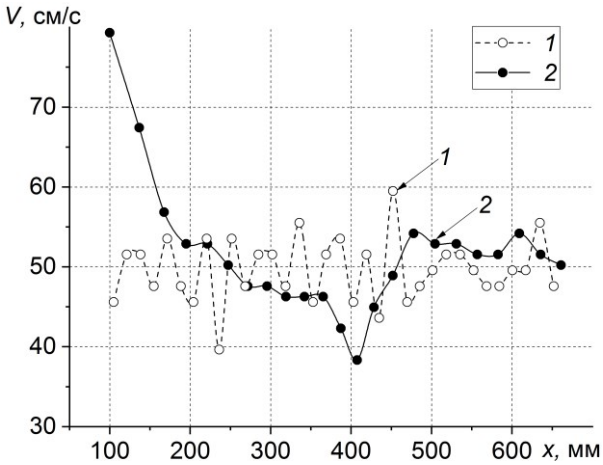


Рисунок 4.3.7 – Скорость ламинарного пламени по длине трубки: *1* – 8,0 %CH_4+92,0 %воздух; 2 – (8,0 %CH_4+92,0 %воздух)/уголь при $\rho \approx 65$ г/м^3. Кривые *1* и *2* соответствуют опытам рисунке 4.3.6

Колебания скорости фронта пламени наблюдаются только в газовой смеси. В ДГС α = 8,0 % в момент инициирования скорость пламени $V \approx 80$ см/с. Затем на расстоянии 10 см

скорость пламени убывает до 50 см/с. В ДГС по сравнению с газовой смесью α = 8,0 % яркость пламени возрастает благодаря горению частиц угля. Реакция между избыточным кислородом в газовой смеси и углеродом угля не приводит к росту скорости пламени в ДГС.

При более высоких значениях ρ из-за возрастания общей поверхности частиц и доли мелких частиц угля, как и в смесях α = 7,0 %, наблюдается влияние среднеобъёмной плотности угольной взвеси на скорость пламени. Колебания скорости в ДГС усиливаются по сравнению с меньшими значениями ρ. На снимках свечения форма фронта пламени качественно отличается от предыдущих опытов. Фронт пламени становится выпуклым в центральной области, верхняя и нижняя части фронта загибаются назад, продукты горения образуют сужающийся конус (рисунок 4.3.8*а*). Скорости пламени в газовой смеси и ДГС приблизительно одинаковы ($V \approx 50$ см/с) вплоть до $x \approx 550$ мм. Затем скорость пламени в ДГС на коротком участке уменьшается до $V \approx 32$ см/с. После чего пламя быстро ускоряется, и скорость фронта увеличивается приблизительно в три раза (рисунок 4.3.8*б*, кривая *2*), кривая *2* здесь построена по снимкам опыта на рисунке 4.3.8*а*.

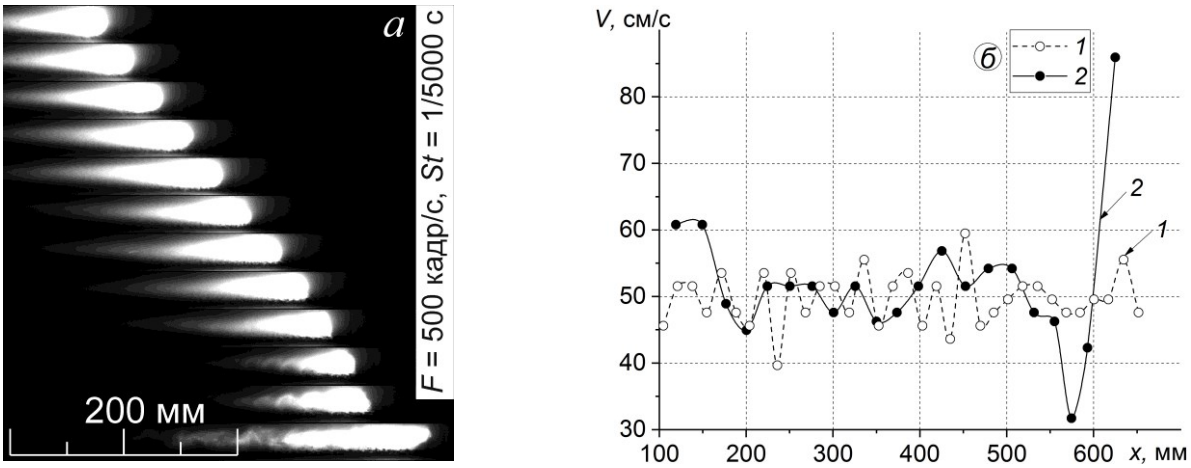


Рисунок 4.3.8 – Снимки свечения и скорость пламени по длине трубки:
а – 8,0 %CH_4/воздух/уголь при $\rho \approx 900$ г/м^3; *б* –в смесях 8,0 %CH_4+92,0 %воздух (кривая *1*) и (8,0 %CH_4+92,0 %воздух)/уголь при $\rho \approx 900$ г/м^3 (кривая *2*). Кадры приведены через Δt = 50 мс, диафрагма объектива 11

В обзорах [73–75] приведены ламинарные (нормальные) скорости U_n пламён в метановоздушных смесях, полученные в горелках, соплах, прозрачных трубках, бомбах и мыльных пузырях. Разброс значений U_n при p_0 = 0,1 МПа превышает ± 30 %. Минимальные концентрации метана $\alpha \approx 5{,}9 \div 6{,}0$ % (об.) и соответствующие им $U_n \approx 0{,}08 \div 0{,}16$ м/с приведены для опытов в горелках и бомбах. В трубках минимальным $\alpha \approx 6{,}5 \div 7{,}0$ % (об.) соответствуют значения $U_n \approx 0{,}1 \div 0{,}15$ м/с, при α = 8,0 % $U_n \approx 0{,}2 \div 0{,}25$ м/с. В [75] при разных методах

определения скоростей ламинарного пламени для α = 6,0, 7,0 и 8,0 % U_n ≈ 0,10÷0,17, 0,13÷0,25 и 0,2÷0,4 м/с соответственно.

В наших экспериментах в смесях CH_4/воздух в горизонтальной трубке при α = 6,0, 7,0 и 8,0 % U_n ≈ 0,23, 0,35 и 0,50 м/с; при тех же α в смесях CH_4/уголь/воздух ламинарная скорость U_n ≈ 0,28, 0,35 и 0,50 м/с соответственно. То есть в смесях CH_4/воздух и в ДГС с увеличением α от 6,0 до 8,0 % ламинарные скорости пламен возрастают, но примерно равны между собой в газовых смесях и в ДГС. Видимо, возрастание яркости пламени в волнах горения в ДГС по сравнению с пламёнами в смесях метан/воздух не означает, что температура в зоне реакции ДГС выше, чем в газовой смеси. В пользу этого предположения можно привести из [75] обобщённую зависимость $U_n = f(T_a)$ для углеводородов (где T_a – адиабатическая температура пламени).

4.4 Волны горения, движущиеся против направления силы тяжести в вертикальном закрытом канале в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/уголь

Распространение взрывных, детонационных волн и волн горения в газовых смесях и в газовых смесях с взвесями угольных и инертных частиц исследовали в [3, 6–10, 17–22, 27, 29–34, 40, 42–44, 46, 49, 57, 58, 65]. Скорости детонации и давления за фронтом детонационных волн в смесях αCH_4/воздух и в двухтопливных гетерогенных смесях (ДГС) αCH_4/воздух/угольная взвесь близки между собой, поскольку в ДГС сгорает малая часть угля от стехиометрии, и энерговыделение определяется в основном метаном, а не медленно горящими угольными частицами [29, 32, 57]. В газоугольных смесях расчётные термодинамические параметры детонации [49] завышены по сравнению с экспериментальными параметрами из-за малой доли сгоревшего угля [29, 30].

В [29, 31, 33] при исследовании волн горения в газоугольных смесях была установлена определяющая роль энерговыделения метана, несмотря на более длительное, по сравнению с детонацией, время нахождения угольных частиц в зоне реакции.

Исследованию неустойчивости волн горения в зависимости от направления их скорости относительно силы тяжести посвящено небольшое количество работ. В частности, в [31, 33] обнаружены сильные колебания волн горения со знакопеременной скоростью при движении пламени в закрытом вертикальном канале сверху вниз. В горизонтальной открытой с одного торца трубке пламя движется в одном направлении либо равномерно, либо с небольшими продольными осцилляциями скорости [34]. Направление скорости ВГ относительно вектора силы тяжести, как показали наши опыты, влияет на устойчивость волн горения.

В [58, 65] обнаружено влияние направления скорости пламени относительно вектора поля тяжести на величину НКПР пламени α^*. Большинство экспериментов по определению НКПР пламени метана выполнено в коротких (1,5÷3 м) вертикальных каналах. В этом разделе волны горения в смесях αCH_4/воздух и αCH_4/воздух/уголь, исследованы при инициировании снизу в длинной вертикальной трубе (когда достигается приблизительное постоянство скорости ВГ). Исследование неустойчивости ВГ и области α вблизи α^* представляет интерес для создания моделей горения и разработки мероприятий по обеспечению пожаробезопасности в угольных шахтах. Сравнительно точное (до сотых долей процента) определение α^* нецелесообразно, поскольку для этого потребуется провести большое число опытов, а найденные α^* будут зависеть от постановки эксперимента, состава и длительности хранения используемого угля.

Постановка экспериментов

Газовые смеси и ДГС поджигали высоковольтной искрой между двумя электродами снизу трубы или открытым огнём при сгорании стех. смеси $\alpha_{st}CH_4$/воздух, α_{st} = 9,5 % (об.). После заполнения трубы исследуемой смесью до давления p_0 = 0,09 МПа снизу добавляли стех. смесь (~ 0,7 м) до p_0 = 0,1 МПа. В стех. смеси 9,5 %CH_4/воздух после искрового инициирования распространялась ВГ. Ошибки измерения скорости волн не превышали 5 %.

Среднеобъёмная плотность частиц угольной пыли в трубе $\rho_0 \approx 130 \div 670$ г/м^3. При изменении ρ_0 от 130 до 670 г/м^3 масса осевшего на стенках угля – соответственно 30÷10 % от массы угля в объеме трубы. Трубу после опыта протирали и определяли количество осевшего на стенках трубы угля путём взвешивания ветоши с погрешностью 0,1 г.

Исследовали смеси αCH_4/воздух ($5,5 \le \alpha \le 9,5$ % (об.)), предполагалось, что воздух (Air) имеет состав $0,21O_2+0,79N_2$. Для бедных по метану смесей состава CH_4+k_1Air коэффициент избытка воздуха (по отношению к стехиометрии) $h = (k_1 - k_{1st})/k_{1st}$, где k_{1st} = 9,524. При записи состава смесей в виде $\alpha CH_4+(1-\alpha)$Air коэффициент $k_1 = (1-\alpha)/\alpha$, $h = (1-\alpha)/(\alpha k_{1st})-1$, откуда для α = 5,5 и 6,0 % получим $h \approx$ 80,4 и 64,5 % соответственно.

Соответствующие стехиометрические составы ДГС с углеродом: CH_4+17,182Air+1,608C и CH_4+15,667Air+1,29C. Для α = 5,5 и 6,0 % в трубе объёмом 26,2 л стехиометрические массы углерода $m_{st\,C} \approx$ 1. 168 и 1,022 г, им соответствуют массы угля $m_{st\,Carbon} \approx$ 1,49 и 1,304 г; $\rho_{st} \approx$ 56,9 и 49,8 г/м^3 (в угле 78,4 % углерода [29]). Содержание угля в газовзвесях превышало стех. концентрации приблизительно в 3÷11 раз.

Результаты экспериментов

Смеси $\alpha CH_4+(1-\alpha)$ воздух, αCH_4/воздух/уголь (α = 5,5 %)

При искровом инициировании снизу в газовой смеси α = 5,5 % волны горения не возбуждались. При инициировании смеси открытым огнём на нижнем участке трубы регистрировались сигналы от сгорания небольшого объёма стехиометрической смеси (рисунок 4.4.1). Здесь вся труба заполнена смесью 5,5 %CH_4/воздух, открытый огонь здесь и ниже создавали добавлением внизу трубы ~ 0,7 м смеси 9,5 %CH_4/воздух (стех. смесь). Скорость пламени в ОС $D \approx 9,1 \pm 7,8$ м/с, выше датчика Д6 ВГ затухла. Таким образом, волны горения не возбуждаются в вертикальном канале в смесях αCH_4/воздух $\alpha \le 5,5$ % при их инициировании снизу.

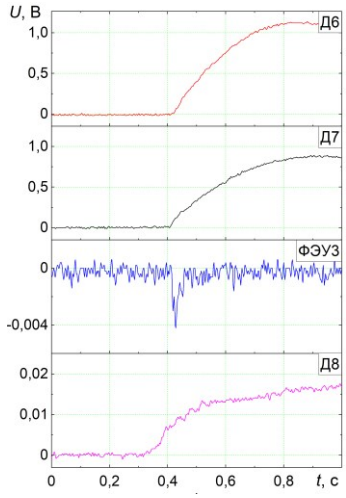


Рисунок 4.4.1 – Сигналы с датчиков Д8÷Д6 и ФЭУ3 в затухающей ВГ. В трубе смесь 5,5 %CH_4/воздух, внизу трубы ~ 0,7 м смеси 9,5 %CH_4/воздух (стех.). Скорость пламени в ОС $D \approx 9{,}1 \pm 7{,}8$ м/с, выше датчика Д6 ВГ затухла

В ДГС 5,5 %CH_4/воздух/уголь инициирование осуществляли открытым огнём снизу. Волна горения с ярким свечением распространялась по всей длине трубы, – горит не только метан, но и часть угля. Поверхность фронта пламени неровная, неплоская, ВГ устойчива и распространяется в ОС без продольных колебаний вдоль трубы (рисунок 4.4.2).

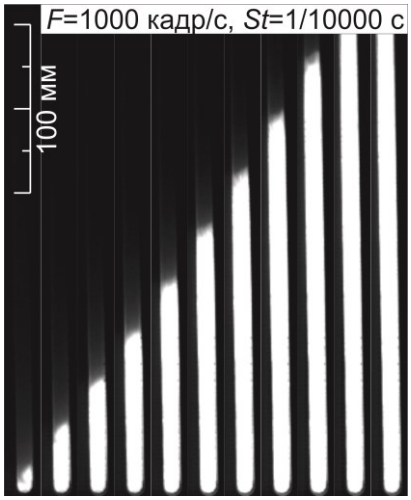
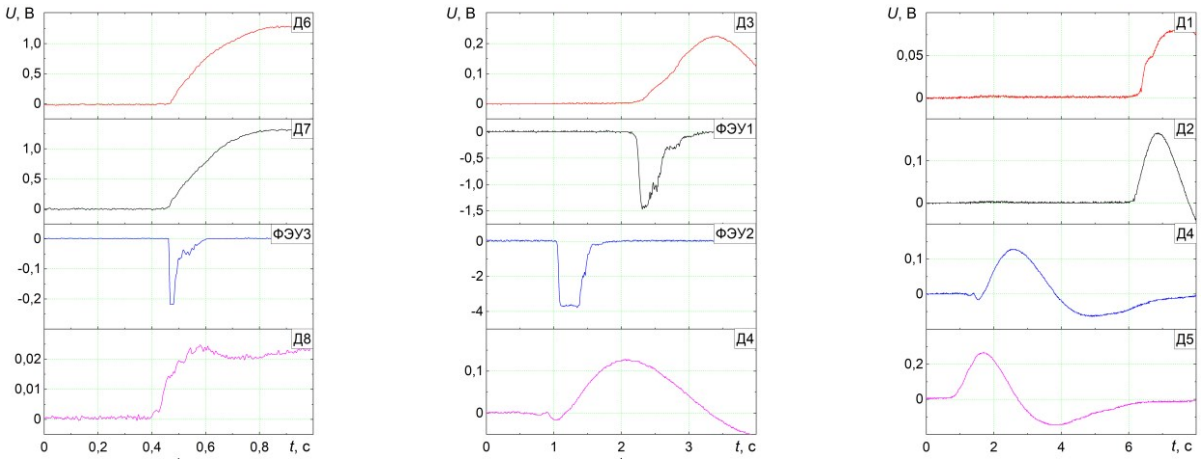


Рисунок 4.4.2 – Снимки свечения волны горения. Смесь 5,5 %CH_4/воздух/уголь при $\rho_0 \approx 670$ г/м^3, инициирование открытым огнём (внизу трубы ~ 0,7 м смеси 9,5 %CH_4/воздух), в ОС $D \approx 30{,}4 \pm 3{,}9$ м/с

Характерные осциллограммы сигналов с датчиков и ФЭУ в ВГ приведены на рисунке 4.4.3, начало сигналов на датчиках всегда совпадает с передним фронтом сигналов свечения. Длительность свечения $\tau_{св} \approx 0{,}7$ с, $D \approx 0{,}6$ м/с, длина зоны свечения здесь $\lambda_{ФЭУ2} = \tau_{св} \cdot D \approx 0{,}4$ м.



Рисунке 4.4.3 – Сигналы в ВГ с датчиков Д8÷Д1 и ФЭУ3÷ФЭУ1. ДГС 5,5 %CH_4/воздух/уголь при $\rho_0 \approx 670$ г/м^3, инициирование открытым огнём

Скорости ВГ по длине трубы при инициировании открытым огнём в газовых и газоугольных смесях $\alpha = 5{,}5$ % приведены на рисунке 4.4.4. Здесь при $x \geq 1{,}5$ м в газовой смеси пламя затухает (*1*). В ДГС на начальном участке трубы величина скорости ВГ $D \approx 10 \div 32$ м/с (кривая *2*), затем D убывает, и при $x \geq 3{,}8$ м скорость пламени $D \approx 0{,}3 \div 1{,}2$ м/с.

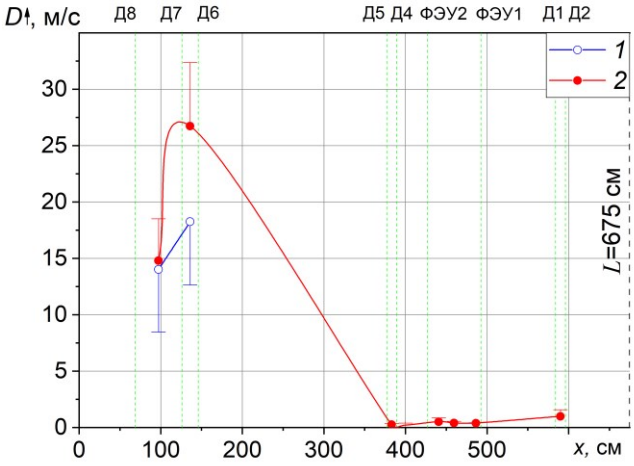


Рисунок 4.4.4 – Скорости пламени по длине трубы: 1 – 5,5 %CH_4/воздух; 2 – 5,5 %CH_4/воздух/уголь при $\rho_0 \approx 176 \div 670$ г/м^3. Инициирование открытым огнём (внизу трубы для возбуждения ВГ находится смесь 9,5 %CH_4/воздух)

На рисунке 4.4.4 и далее приведены либо положительные, либо отрицательные доверительные интервалы, чтобы исключить их пересечение.

Смеси αCH_4+(1–α)воздух, αCH_4/воздух/уголь, $\alpha = 6{,}0$ %

Газовые смеси 6,0 %CH_4/воздух поджигали открытым огнём, волна горения распространялась вверх по трубе без продольных колебаний скорости фронта. Свечение в ВГ слабое (рисунок 4.4.5*а*), $\lambda_{ФЭУ2} \approx 0{,}5$ м, средняя скорость пламени в ОС $\bar{D} \approx 28$ м/с.

ДГС 6,0 %CH_4/воздух/уголь инициировали открытым огнём, на снимках видны многочисленные горящие частицы угля, ВГ движется без продольных колебаний, $\bar{D} \approx 25$ м/с (рисунок 4.4.5*б*). Из осциллограмм следует, что в ДГС α = 6,0 % интенсивность свечения в ВГ на ФЭУ3–ФЭУ1 возрастает по сравнению с газовой смесью α = 6,0 % в 65–430 раз.

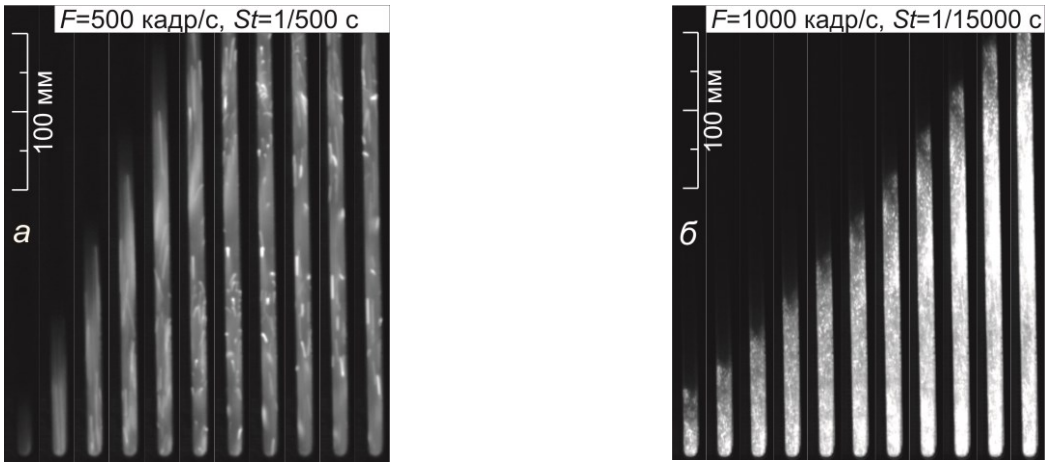


Рисунок 4.4.5 – Снимки свечения ВГ: *а* – смесь 6,0 %CH_4/воздух, в ОС $D \approx 28{,}3 \pm 0{,}7$ м/с, *б* – смесь 6,0 %CH_4/воздух/уголь при $\rho_0 \approx 145$ г/м^3, в ОС $D \approx 25 \pm 4{,}3$ м/с

При α = 6,0 % скорости ВГ в газовой смеси и в ДГС ($\rho_0 \approx 145 \div 549$ г/м^3) на начальном участке близки между собой ($\bar{D} \approx 17 \div 22$ м/с), а во второй половине трубы практически совпадают ($\bar{D} \approx 1 \div 2$ м/с) (рисунок 4.4.6*а*). Это означает, что в ВГ сгорает небольшое количество угля, что подтверждает взвешивание угля в контейнере, на фланце и на стенках трубы. Величина D в ДГС на начальном участке трубы ниже, чем в газовой смеси, вероятно, из-за того, что основная масса частиц угля при больших значениях D играет роль инертной завесы.

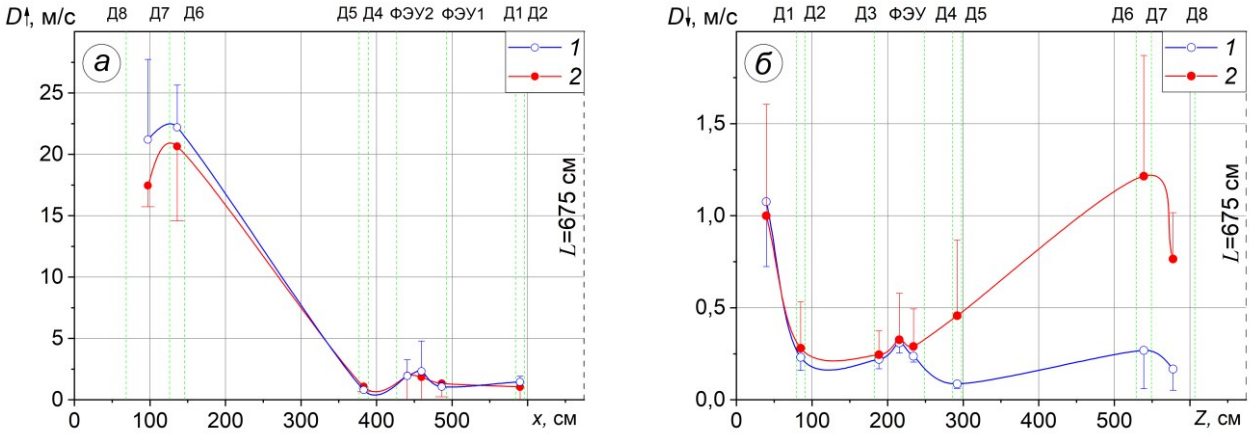


Рисунок 4.4.6 – Скорости волн горения по длине трубы: *а* – ВГ движутся снизу вверх; *б* – ВГ движутся сверху вниз ($z = L - x$, ось z направлена вниз от верха трубы). Смеси 6,0 %CH_4/воздух (кривые *1*) и 6 %CH_4/воздух/уголь (кривые *2*)

Для сравнения на рисунок 4.4.6*б* приведены данные по скоростям ВГ, распространяющихся сверху вниз, в газовой смеси и ДГС ($\rho \approx 100 \div 530$ г/м^3), α = 6,0 %. При движении по направлению силы тяжести пламя неустойчиво, совершает продольные колебания со знакопеременной скоростью (раздел 4.2, [33]). На длине трубы отношение $D\uparrow/D\downarrow \approx 20 \div 3$, где $D\downarrow$ и $D\uparrow$ скорости волн горения, распространяющихся соответственно вниз и вверх. При движении ВГ снизу вверх пламя более устойчиво, а скорость выше, чем при движении сверху вниз, по–видимому, из-за того, что горячие (более лёгкие) продукты реакции, всплывая по направлению вектора скорости ВГ, увеличивают *D*.

В газовых смесях и ДГС с $\alpha \leq 5{,}0$–$5{,}5$ % (об.) ВГ не возбуждаются при инициировании сверху, а НКПР пламени метана находится в диапазоне $5{,}5 < \alpha^*\downarrow \leq 6{,}0$ % (об.) (раздел 4.2, [33]). Из наших опытов следует, что при движении пламени снизу вверх НКПР пламени метана для ДГС: $5{,}0 < \alpha^*\uparrow \leq 5{,}5$ % (об.), т.е. $\alpha^*\uparrow < \alpha^*\downarrow$ ($\alpha^*\downarrow$ и $\alpha^*\uparrow$ – значения НКПР пламени метана, распространяющегося соответственно вниз и вверх).

Нижний участок стехиометрической смеси (0,7 м) расширяется при сгорании менее чем в 2 раза. За фронтом пламени газ остывает, продукты реакции во всех исследованных смесях перемещаются вдоль щели ОС вниз, давление в трубе после опыта понижается до 0,088–0,09 МПа.

Смеси αCH$_4$/воздух, αCH$_4$/воздух/уголь, α = 9,5 % (стех.)

Эксперименты выполнены с целью выяснения возможности горения угля в условиях дефицита кислорода в стехиометрической (по метану) смеси. Волны горения в газовой смеси и ДГС инициировали искрой, характерные осциллограммы и снимки свечения представлены на рисунке 4.4.7÷4.4.9. Изменение яркости свечения в некоторых опытах (например, на рисунке 4.4.7), вероятно, означает, что продукты реакции, всплывая вверх, опережают фронт пламени. Уголь в зоне реакции ВГ в стех. смеси вступает в реакцию с кислородом наряду с метаном, яркость свечения в ДГС выше, а средняя скорость пламени в ОС ниже, чем в газовой смеси α = 9,5 % (рисунок 4.4.8 *а*, *б*).

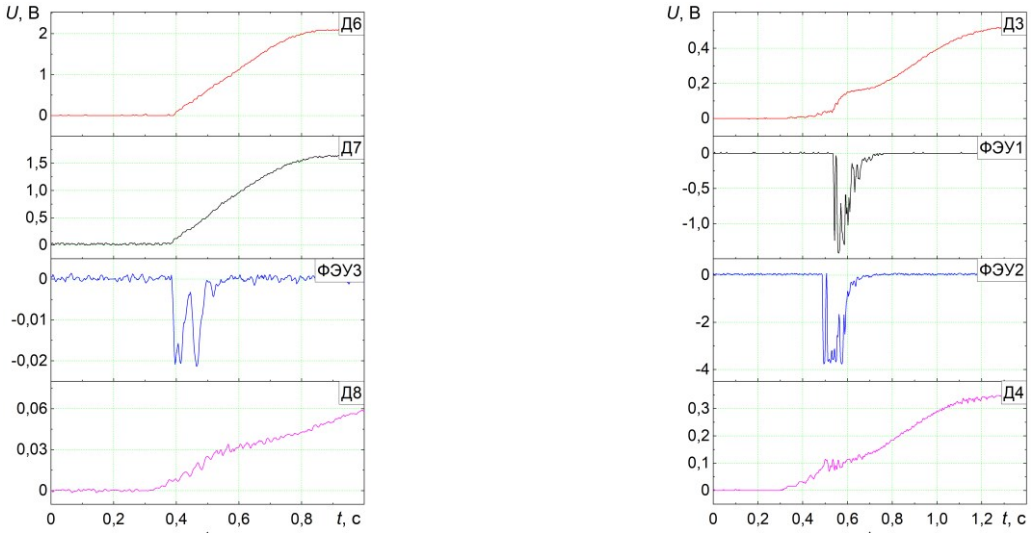


Рисунок 4.4.7 – Сигналы с датчиков Д8÷Д3 и свечения ФЭУ3÷ФЭУ1 в ВГ. Смесь 9,5 %CH_4+90,5 %воздух (стех.) при p_0 = 0,1 МПа

Из осциллограмм с ФЭУ1÷ФЭУ3 следует, что интенсивность свечения газовой смеси 9,5 %CH_4/воздух по сравнению со смесью 6,0 %CH_4/воздух выше в 20–400 раз. В ДГС 9,5 %CH_4/воздух/уголь из-за горения частиц угля интенсивность свечения выше, чем в смеси 9,5 %CH_4/воздух в 1,2–15 раз.

При α = 9,5 % длительность свечения в газовых смесях $\tau_{св} \approx 0{,}1$ с, $D \approx 15$–20 м/с, длина зоны свечения $\lambda_{ФЭУ2} = \tau_{св} \cdot D \approx 1{,}5$–$2$ м. В ДГС $\tau_{св} \approx 0{,}1$–$0{,}3$ с, $D \approx 5$–10 м/с, $\lambda_{ФЭУ2} \approx 0{,}5$–$3$ м.

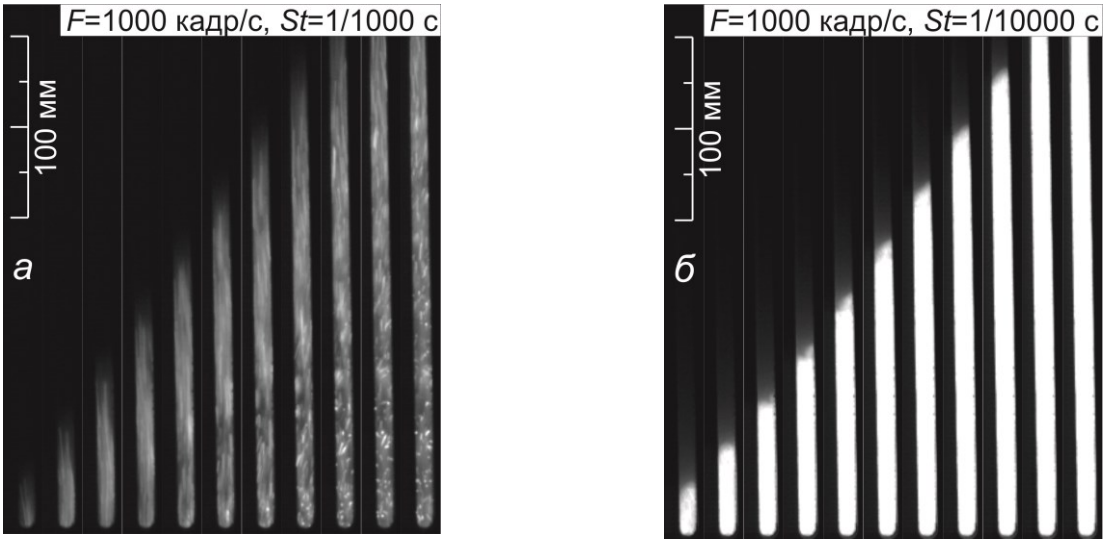


Рисунок 4.4.8 – Снимки свечения ВГ, инициирование снизу искрой: *а* – смесь 9,5 %CH_4/воздух, в ОС $D \approx 32{,}6 \pm 2{,}7$ м/с; *б* – смесь 9,5 %CH_4/воздух/уголь при $\rho_0 \approx 313$ г/м^3, в ОС $D \approx 28{,}5 \pm 4{,}1$ м/с

Как и в предыдущих опытах, на снимках свечения (рисунок 4.4.8 *а*, *б*) поверхность фронта пламени отличается от плоской, свечение за фронтом неравномерное, уголь, вступая в реакцию с кислородом, увеличивает свечение продуктов реакции (рисунок 4.4.8*б*). Колебания пламени в оптической секции не регистрируются.

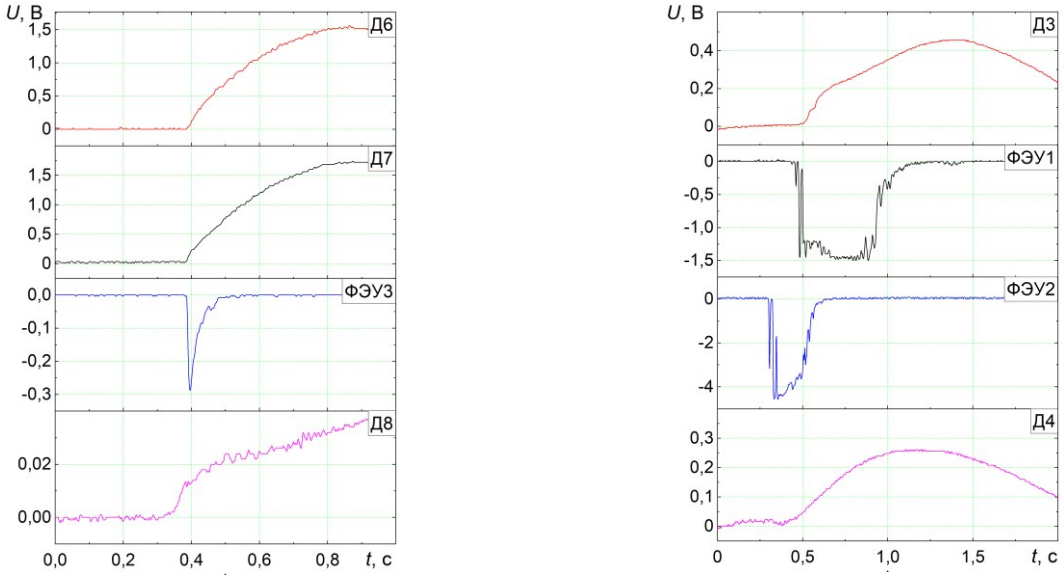


Рисунок 4.4.9 – Сигналы с датчиков Д8÷Д3 и ФЭУ3÷ФЭУ1 в ВГ.

Смесь 9,5 %CH_4/воздух/уголь при $\rho_0 \approx 313$ г/м^3

Несмотря на более интенсивное свечение в ДГС по сравнению с газовой стех. смесью величина D в ДГС при $x > 1{,}8$ м меньше, чем в газовой смеси (рисунок 4.4.10). Это объясняется дефицитом кислорода и тем, что основная часть угольной пыли является инертной пылевой завесой.

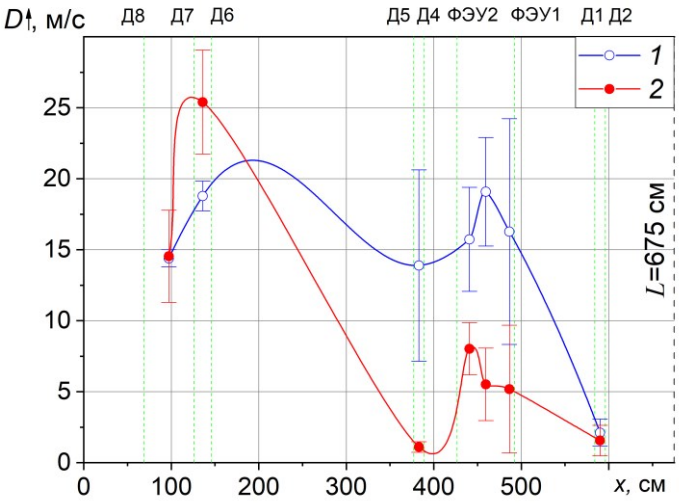


Рисунок 4.4.10 – Скорости пламени по длине трубы: *1*– в смесях 9,5 %CH_4/воздух;

2 – в смесях 9,5 %CH_4/воздух/уголь при $\rho_0 \approx 130 \div 442$ г/м^3

Основные выводы и результаты по четвертой главе

Раздел 4.1

1. В вертикальной закрытой ударной трубе при инициировании искрой сверху изучены волны горения в стех. смеси 9,5 %CH_4/воздух, бедной смеси 7 %CH_4/воздух и гетерогенных смесях 7 %CH_4/воздух/уголь при концентрациях угольной пыли 0,10÷0,42 кг/м^3.

2. В гетерогенных смесях по сравнению с волной горения в газовой смеси яркость пламени возрастает в 50÷100 раз. Горение угольных частиц повышает энерговыделение, но скорость волны горения практически не изменяется. В исследованных смесях скорость пламени по длине трубы уменьшается от нескольких десятков м/с до значений ~ 1 м/с.

3. Во всех исследованных смесях в**о**лны горения меняют направление движения с частотой $f \approx 31 \div 33$ Гц, скорость волны горения принимает положительные (при движении вниз) и отрицательные (при движении вверх) значения.

4. В смеси CH_4+13,286воздух пламя совершает колебания в оптической щели с частотой 32±1 Гц. Мгновенные значения скорости фронта пламени по длине щели находятся в диапазоне от плюс 6,2 до минус 5 м/с. Максимальные модули положительных скоростей пламени больше, чем отрицательных, осреднённая по длине щели скорость пламени $\bar{v}(l) \approx 1$ м/с. Фронт пламени неровный, протяженность светящейся области пламени 5–20 см.

5. В смесях CH_4/воздух/уголь фронт пламени неровный, различаются неоднородные струи, протяжённость яркой части пламени 20–30 см, свечение пламени неоднородно. Пламя распространяется со знакопеременной скоростью, мгновенные скорости волны горения изменяются от минус 10 до плюс 45 м/с, средняя скорость пламени $\bar{v}(l) \approx 0{,}4 \div 1{,}5$ м/с.

6. Из–за уменьшения скорости звука в аэровзвеси частота колебаний пламени по длине трубы в смесях CH_4/воздух/уголь меньше, чем в газовых смесях CH_4/воздух.

7. В вертикальной трубе сложное возвратно–поступательное движение волн горения со знакопеременной скоростью в смесях с различным энерговыделением обусловлено влиянием силы тяжести.

Раздел 4.2

1. Исследованы возможность существования и характер распространения волн горения в закрытой вертикальной ударной трубе в смесях $\alpha$$CH_4$/воздух ($\alpha$ = 8,0, 6,0, 5,0 и 5,5 % (об.)) и в тех же газовых смесях с взвешенной угольной пылью (размер частиц 0÷200 мкм, массовая концентрация пыли $\rho \approx 100 \div 530$ г/м^3).

2. Волны горения не распространяются в вертикальном закрытом канале при инициировании сверху в газовых и газоугольных смесях при $\alpha \leq 5{,}0$–$5{,}5$ % (об.). НКПР пламени

метана $5,5 < \alpha^* \leq 6,0$ % (об.). В двухтопливной гетерогенной смеси (6,0 %CH_4/воздух)/уголь по сравнению с волной горения в газовой смеси 6,0 %CH_4/воздух существенно возрастает яркость пламени.

3. В ДГС с α = 6,0 % (об.) обнаружены два режима распространения пламени – с короткой и длинной областью свечения. Пламя с коротким свечением движется в среднем равномерно вдоль щели. При большей концентрации угольной взвеси протяжённое пламя совершает продольные колебания со знакопеременной скоростью и распространяется быстрее короткого пламени.

4. При α = 8,0 % (об.) добавление угольной взвеси в газовую смесь не увеличивает скорость волны горения, не обнаружено влияние концентрации угольной взвеси на скорость пламени.

5. Обнаружено влияние направления силы тяжести на зажигание и процесс горения смесей и низкий по сравнению с метаном энергетический вклад угольных частиц.

Раздел 4.3

1. В вертикальном закрытом канале пламя не инициировалось при зажигании сверху в газовых и газоугольных смесях с содержанием метана $\alpha \leq 5,5$ % (об.); при $\alpha \geq 6,0$ % (об.) в канале распространялись волны горения. Добавки угольной взвеси в газовую смесь усиливают яркость и колебания пламени со знакопеременной скоростью, не увеличивая среднюю скорость волны горения. При колебаниях пламени со знакопеременной скоростью амплитуды скорости почти на порядок превышают среднюю скорость распространения волны горения.

2. В горизонтальной трубке ламинарное пламя распространяется в газовых смесях с $\alpha \geq 6,0$ % (об.) и в газоугольных смесях с $\alpha \geq 5,5$ % (об.). Добавки угольной взвеси уменьшают НКПР пламени, усиливают яркость пламени, но слабо влияют на скорость пламени. Осреднённые скорости ламинарного пламени в газовых и ДГС смесях возрастают с увеличением объёмной доли метана. При высоких концентрациях угольной взвеси обнаружено ускорение пламени. В исследованных газовых смесях наблюдаются слабые продольные колебания скорости фронта пламени.

3. Обнаружено совместное влияние направления движения волны горения относительно вектора тяжести и добавок угольной взвеси в смесях метан/воздух на развитие колебаний и на величину НКПР пламени.

Раздел 4.4

1. В вертикальном закрытом канале пламя не возбуждалось в газовых смесях с $\alpha \leq 5,5$ % (об.) при зажигании снизу. Волны горения распространялись в ДГС α%CH_4/воздух/уголь с $\alpha \geq 5,5$ % (об.) и в смесях α%CH_4/воздух при $\alpha \geq 6,0$ %. При движении пламени снизу вверх НКПР

пламени метана для газовых смесей $5{,}5 < \alpha^* \leq 6{,}0$ % (об.), в ДГС $\alpha^* \leq 5{,}5$ % (об.). НКПР пламени метана, движущегося вверх, меньше, чем для движущегося вниз.

2. Добавки угольной взвеси в метановоздушной смеси не увеличивают скорость волн горения, среднеобъёмная плотность угольной взвеси на скорость пламени влияет слабо.

3. Эксперименты по изучению волн горения в указанной постановке опытов необходимо проводить в сравнительно длинных трубах, поскольку скорость волн горения устанавливается на длине не менее 4 м от низа трубы.

4. Новизна исследований состоит в том, что в исследованных смесях ($\alpha \leq 9{,}5$ % об.) при движении пламени вверх не наблюдаются продольные колебания скорости фронта пламени в отличие от случаев распространения пламени вниз и горизонтально; скорость ВГ вниз по длине трубы меньше, чем при движении вверх в 3–20 раз; НКПР пламени в газовых смесях и смесях метан/воздух/уголь зависит от направления распространения пламени относительно направления силы тяжести.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально определено, что детонация в аэровзвесях сульфидных руд с содержанием серы менее 32 % не возбуждается при действии взрывных волн с температурой $T \sim 4000$ K и ударных волн (УВ) с температурой, превышающей T воспламенения сульфидов железа. За УВ с $T \geq 700$ K на поверхности частиц уменьшается количество пирротина (Fe_7S_8) и образуется сернистый газ.

2. Экспериментально изучено затухание детонации во взвесях кварцевого песка в смесях $CH_4/O_2/N_2$ при начальных давлениях $p_0 = 0{,}1 \div 0{,}01$ МПа. Обнаружено немонотонное уменьшение скорости ДВ и возникновение вторичной детонации в горячих точках (на частицах). При $p_0 = 0{,}01$ МПа, $\delta = 90 \div 120$ мкм, среднеобъёмной плотности взвеси $\rho_s = 2$–$2{,}5$ г/л на длине около 6 м происходит гашение детонации до скорости 400–150 м/с; предложен критерий гашения детонации пылевой завесой.

3. В газовых смесях CH_4/воздух, CH_4/O_2 и в двухтопливных гетерогенных смесях (ДГС) CH_4/воздух/уголь, CH_4/O_2/уголь ($\delta \leq 200$ мкм и $\rho_s \leq 700$ г/м^3) на параметры волн горения и детонации определяющее влияние оказывает метан, а не уголь. В ДГС по сравнению с газовыми смесями температура в ДВ увеличивается на 15 %, и распространяется низкоскоростная детонация, при отражении которой от твёрдой стенки возбуждается низкоскоростная, либо высокоскоростная детонация.

4. Доля сгоревшего угля в волнах горения, взрывных и ДВ менее 15–20 % от стехиометрии. Термодинамические расчёты параметров детонации газоугольных систем дают существенно завышенные по сравнению с экспериментом результаты.

5. Экспериментально исследованы взрывные и ДВ в газовых двухтопливных смесях $CH_4/H_2/O_2$ и гетерогенных трёхтопливных смесях $CH_4/H_2/O_2$/уголь ($\rho_s = 160 \div 400$ г/м^3). Изучена структура и определены параметры детонационных и отражённых волн. При росте содержания водорода в смесях $CH_4/H_2/O_2$ уменьшается энергия инициирования. Экспериментальные скорости детонации в смесях $CH_4/H_2/O_2$/уголь на 1000–1500 м/с ниже расчётных равновесных скоростей детонации по термодинамической модели.

6. В смесях $CH_4 + nH_2 + m$ воздух ($n = 0{,}1 \div 0{,}5$, $m = 10{,}52$, 12) и в тех же смесях с угольной взвесью ($\rho_s = 95 \div 560$ г/м^3, $\delta \leq 200$ мкм) вблизи источника инициирования с удельной энергией $w_i \approx 23$ МДж/м^2 возбуждается стационарная детонация ($D \approx 1800$ м/с). В зоне реакции ДВ сгорает 1,2–9,7 % от взвешенного в трубе угля, параметры ДВ в основном зависят от метана и водорода. При отражении затухающей взрывной волны из-за недогорания горючих веществ возбуждается низкоскоростная, либо высокоскоростная детонация.

7. В вертикальной закрытой трубе при инициировании искрой сверху экспериментально изучены волны горения в смесях αCH$_4$/воздух, αCH$_4$/воздух/уголь (α = 9,5÷6 %, ρ_s = 0,10÷0,42 кг/м^3). Обнаружено, что волны горения (ВГ) меняют направление движения с частотой $f \approx 31 \div 33$ Гц. Скорость пламени v принимает положительные (при движении вниз) и отрицательные (при движении вверх) значения $v \approx (+6{,}2) \div (-5)$ м/с, осреднённая скорость $\bar{v}(l) \approx +1$ м/с.

8. Движение волн горения со знакопеременной скоростью в газовых смесях и газовзвесях угольной пыли обусловлено влиянием силы тяжести. Волны горения не распространяются в вертикальном закрытом канале при инициировании сверху в смесях αCH$_4$/воздух с $\alpha \le 5{,}0$–$5{,}5$ % (об.), НКПР пламени $5{,}5 < \alpha^* \le 6{,}0$ % (об.). В ДГС αCH$_4$/воздух/уголь ($6 \le \alpha \le 9{,}5$ %) величина ρ_s на скорость пламени практически не влияет.

9. В горизонтальной трубке ламинарное пламя распространяется в газовых смесях с $\alpha \ge 6{,}0$ % (об.) и в газоугольных смесях с $\alpha \ge 5{,}5$ % (об.). Осреднённые скорости ламинарного пламени в газовых смесях и в ДГС незначительно возрастают с увеличением объёмной доли метана. При высоких концентрациях угольной взвеси обнаружено резкое ускорение пламени. В исследованных газовых смесях наблюдаются слабые продольные колебания скорости фронта пламени.

10. В вертикальном закрытом канале при зажигании снизу пламя не возбуждалось в газовых смесях с $\alpha \le 5{,}5$ % (об.). ВГ распространялись в ДГС αCH$_4$/воздух/уголь с $\alpha \ge 5{,}5$ % (об.) и в смесях αCH$_4$/воздух при $\alpha \ge 6{,}0$ %. При движении пламени снизу вверх НКПР пламени метана для газовых смесей $5{,}5 < \alpha^* \le 6{,}0$ % (об.), для ДГС $\alpha^* \le 5{,}5$ % (об.): НКПР пламени метана, движущегося вверх, меньше, чем движущегося вниз. Добавки угольной взвеси в метановоздушной смеси на скорость пламени влияют слабо.

11. В смесях αCH$_4$/воздух, αCH$_4$/воздух/уголь ($\alpha \le 9{,}5$ % об.) при движении пламени вверх не наблюдаются продольные колебания (в отличие от случаев распространения пламени вниз и горизонтально); скорость ВГ вниз по длине трубы меньше, чем при движении вверх в 3–20 раз.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВВ – взрывчатое вещество

УВ – ударная волна

ДВ – детонационная волна

ПВ – падающая волна

ОВ – отраженная волна

ВГ – волна горения

НКПР – нижний концентрационный предел

ДГС – двухтопливная гетерогенная смесь

РС – рабочая секция

СИ – секции инициирования

ПД – пьезодатчик

ФЭУ – фотоэлектрический фотоумножитель

TGA – термогравиметрический анализ

DTA – дифференциально–термический анализ

DTG – деривативная термогравиметрия

*SO*1 – богатая руда

*SO*2 – медистая руда

*SO*3 – вкрапленная руда

*SO*4 – закладка (пустая порода)

e_i – энергия инициирования, Дж

q_i – энергия детонационного сгорания смеси, Дж

w_i – удельная энергия детонационного сгорания смеси, Дж/м^2

a_{st} – средний размер ячейки для стехиометрической смеси, мм

a – средний размер детонационной ячейки, мм

α – объемная концентрация метана в смеси, %

D_{CJ} – расчетная скорость детонации Чепмена–Жуге, м/с

T_{CJ} – температура в плоскости Чепмена–Жуге, К

p_{CJ} – давление в плоскости Чепмена–Жуге, Па

P_D – давление во фронте ДВ, Па

p_o – начальное давление в рабочей секции, Па

p_{oi} – начальное давление в секции инициирования, Па

p_2 – давление в ударной трубе после опыта, Па

p_j – абсолютное давление, Па

$\Delta p_j = p_j - p_0$ – скачок давления, Па

j – номер пьезодатчика

D – скорость ДВ, УВ и ВГ

F – частота съемки камеры FastCam SA5

S_t – время экспозиции камеры FastCam SA5

τ – постоянная времени пьезодатчиков, с

l_s – размер конгломерированных частиц *SO*1–*S0*4 после помола, мкм

$\overline{l_s}$ – средний размер разделенных частиц *SO*1–*S0*4, мкм

d – размер частиц Кузбаского угля, мкм

δ –размер инертных частиц, мкм

ρ – объемная плотность частиц, г/м^3

t_j – время прихода фронта ДВ, УВ и ВГ на пьезодатчик, с

λ_j – расстояние между фронтом УВ и пламенем, м

D_{fin} – скорость УВ вблизи нижнего торца ударной трубы, м/с

M – число Маха

D_{ref} – скорость отраженной волны, м/с

P_{ref} – давление в отраженной волне, м/с

Q_2 – тепловой поток, Дж/с

S_2 – площадь поверхности частицы, м^2

a – конвективный коэффициент передачи тепла, Вт/(м²·К)

K – радиационный коэффициент передачи тепла, Вт/(м²·К)

λ_S – расстояние между частицами пыли, мм

L_r – длина зоны реакции, мм

ρ_S – среднеобъемная плотность частиц, г/м^3

λ – длина пылевой завесы, м

Λ – размер плотного ядра пылевой завесы, м

ρ_Λ – средняя плотность плотного ядра пылевой завесы, г/м^3

d_1, d_2, d_3 – диаметр выходного отверстия у контейнера с песком, мм

V – объем песка в контейнере, см^3

$\rho_{d\ st}$ – критическая плотность пыли для стехиометрической смеси, г/м^3

ρ_d – критическая плотность пыли смеси, г/м^3

K – постоянный размерный коэффициент

Q – удельное тепловыделение смеси, кал/г

M – масса песка, необходимая для гашения в шахте с условным диаметром 6 м, кг

C_1 – скорость звука в продуктах детонации в падающей волне, м/с

C_2 – скорость звука в продуктах детонации в отраженной волне, м/с

ρ^* – предельная концентрация угольной пыли для нижнего предела взрываемости, г/м^3

m_C – масса углерода, г

m_{coal} – масса угля, г

$D^{`}$ – скорость отраженной волны, м/с

E_3 – критическая энергия инициирования сферической детонации, Дж

E_1 – критическая энергия инициирования плоской детонации, Дж

n – количество молей H_2 в смеси, моль

m – количество молей воздуха в смеси, моль

β – количество молей угля в смеси, моль

h – коэффициент избытка воздуха, %

f_{1j} – частота вращения «головы» спиновой детонации для j датчика в падающей волне, Гц

f_{2j} – частота вращения «головы» спиновой детонации для j датчика в отраженной волне, Гц

$\bar{D}_1$ – средняя скорость падающей волны, м/с

$\bar{D}_2$ – средняя скорость отраженной волны, м/с

m_{CG}, m_g – масса угля, перешедшая в газовую фазу, г

f_1, f_2, f_3 – частоты колебаний волны горения на ФЭУ1, ФЭУ2 и ФЭУ3, Гц

C_f – замороженная скорость звука, м/с

C_e – равновесная скорость звука, м/с

ω – частота возмущения звуковой волны, которая распространяется в среде с дисперсией, Гц

α_2 – объемное содержание твердой фазы

V_1 – объем газовой фазы, см^3

V_2 – объем твердой фазы, см^3

ρ_2^0 – плотность вещества твердой частицы, г/м^3

$\rho_2 \equiv \rho$ – объемная плотность взвеси, г/м^3

ρ_1^0 – плотность газа перед фронтом волны горения, г/м^3

p_1^0 – давление газа перед фронтом волны горения, Па

T_{10}– температура газа перед фронтом волны горения, К

γ_1 – показатель адиабаты

γ – равновесный показатель адиабаты

μ_1 –молярная масса газа, г/моль

$c_1 \equiv c_p$ – удельная теплоемкость газа перед пламенем, м^2/(с^2·К)

c_2 – удельная теплоемкость угля, м^2/(с^2·К)

f – частота колебаний пламени, Гц

α^* – НКПР пламени метана, %

D_+ – скорость пламени при движении вниз, м/с

D_- – скорость пламени при движении вверх, м/с

v – скорость волны горения, изменяющей направление движение, м/с

V – скорость волны горения в горизонтальной трубке, м/с

U_{n} – нормальная скорость пламени, м/с

$D\uparrow$ – скорость волны горения при движении вверх, м/с

$D\downarrow$ – скорость волны горения при движении вниз, м/с

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weiss, E. S. Secondary explosion hazards during blasting in oil shale and sulfide ore mines / E. S. Weiss, K. L. Cashdollar, M. J. Sapko, E. M. Bazala; U.S. Bureau of Mines. – Report of Investigations 9632. – 1995. – 55 p.

2. ПБ–03–553–03. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом: утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 13.05.2003 № 30.

3. Pinaev, A. V. Suppression of gas detonation by a dust cloud at reduced mixture pressures / A. V. Pinaev, A. A. Vasil'ev, P. A. Pinaev // Shock Waves. – 2015. – Vol. 25, № 3. – P. 267–275.

4. Пинаев, А. В. О критических параметрах пылевой завесы, обеспечивающих полное гашение волны газовой детонации / А. В. Пинаев, А. А. Васильев, П. А. Пинаев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 2. – С. 113–120.

5. Пинаев, А. В. Результаты исследования параметров пылевой завесы в ударной трубе / А. В. Пинаев, П. А. Пинаев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 2. – С. 57–62.

6. Cybulski, W. Coal dust explosions and their suppression. – Warsaw, 1976. – 583 p.

7. Лебецки, К. А. Пылевая взрывоопасность горного производства / К. А. Лебецки, С. Б. Романченко. – Москва: Горное дело: Киммерийский центр, 2012. – 464 с. – (Библиотека горного инженера; т. 6, кн. 10). – ISBN 978–5–905450–23–5.

8. Айруни, А. Т. Взрывоопасность угольных шахт / А. Т. Айруни, Ф. С. Клебанов, О. В. Смирнов. – Москва: Горное дело: Киммерийский центр, 2011. – 264 с. – (Библиотека горного инженера; т. 9, кн. 2). – ISBN 978–5–9950–0131–7.

9. Палеев, Д. Ю. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах / Д. Ю. Палеев, И. М. Васенин, В. Н. Костеренко [и др.]. – Москва: Горное дело: Киммерийский центр, 2011. – 312 с. – (Библиотека горного инженера; т. 6, кн. 3).

10. Шолль, Э. В. Подавление взрывов в подземных выработках автоматическими заслонами системы BVS / Э. В. Шолль, В. Виманн // Глюкауф–форшунгсхефте. – 1979. – № 1. – С. 38–46.

11. Yang, Fu–qiang. Spontaneous combustion tendency of fresh and pre–oxidized sulfide ores / Fu–qiang Yang, Wu Chao, Zi–jun Li // Journal of Central South University. – 2014. – Vol. 21, № 2. – P. 715–719.

12. Wei, Pan. Oxidation activity evaluation of sulfide ores based on weight gain rate fusion under different oxidation conditions / Pan Wei, Chao Wu, Zi–jun Li, Zhi–wei Wu // Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress, January 2019. – 2019. – P. 991–1002.

13. Özdeniz, A. Hadi. A study of self–heating characteristics of a pyrrhotite–rich sulphide ore stockpile / A. Hadi Özdeniz, S. Kelebek // International Journal of Mining Science and Technology. – 2013. – Vol. 23, № 3. – P. 381–386.

14. Пинаев, А. В. Исследование взрывчатости аэровзвесей сульфидных руд при динамическом нагреве / А. В. Пинаев, П. А. Пинаев, А. А. Васильев [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 2. – С. 45–51.

15. Pinaev, A. V. On the explosiveness of suspensions of sulfide ore dust in air in shock waves / A. V. Pinaev, P. A. Pinaev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1382. – Art. 012095. – P. 1–6.– URL: https://iopscience.iop.org/issue/1742–6596/1382/1.

16. Pinaev, A. V. Shock waves in air suspensions of sulfide ores / A. V. Pinaev, P. A. Pinaev // Shock Waves. – 2021. – Vol. 31, № 1. – P. 63–74.

17. Laffite, P. Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders / P. Laffite, R. Bouchet // 7th Symposium (Intern.) on Combustion. – Butterworth, London, 1959. – P. 504–508.

18. Kauffmann, C. W. Dust, hybrid and dusty detonation / C. W. Kauffmann, P. Wolanski, A. Arisoy [et al.] // AIIA Progress in Astronautics and Aeronautics. – 1984. – Vol. 94. – P. 221–239.

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

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

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

22. Фёдоров, А. В. Физико–математическое моделирование подавления детонации облаками мелких частиц / А. В. Фёдоров, П. А. Фомин, В. М. Фомин [и др.]. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2011. – 156 с. – ISBN 978–5–7795–0517–8.

23. ГОСТ 12.1.044–89 (ИСО 4589–84). ССБТ. Пожароопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – Доступ из справ.–правовой системы «Техэксперт».

24. Сазонов, М. С. Исследование взрывчатости угольной пыли различного дисперсного состава / М. С. Сазонов, С. И. Голоскоков // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2019. – № 1. – С. 5–13.

25. Протокол испытания автоматических систем взрывоподавления–локализации взрывов АСВП–ЛВ.1М разработки ЗАО «МВК по ВД при АГН» по заказу компании «Шандунская компания Ли Е по шахтным автоматическим системам и оборудованию». – 2011. – 9 с.

26. Guideline for the compilation of a mandatory code of practice for the prevention of coal dust explosions in underground coal mines. – Department of Mineral Resources of South Africa, 2002.

27. Джигрин, А. В. Автоматическая система взрывоподавления – локализации взрывов метановоздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт / А. В. Джигрин, Ю. В. Горлов, В. Д. Чигрин // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 8. – С. 22–26.

28. Горлов, Ю. В. Повышение эффективности локализации взрывов метановоздушной смеси и угольной пыли / Ю. В. Горлов, В. И. Постников // Проблемы ускорения научно–технического прогресса в отраслях горного производства : материалы Междунар. конф., Люберцы, 2002. – С. 330–336.

29. Пинаев, А. В. Волны горения и детонации в смесях газов CH_4/Air, CH_4/O_2, O_2 с взвесями каменного угля / А. В. Пинаев, П. А. Пинаев // Физика горения и взрыва. – 2020. – Т. 56, № 6. – С. 56–68.

30. Пинаев, А. В. Детонационные волны в системах метан/водород/кислород/взвесь угля / А. В. Пинаев, П. А. Пинаев // Физика горения и взрыва. – 2022. – Т. 58, № 4. – С. 91–96.

31. Пинаев, А. В. Пламена со знакопеременной скоростью в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/взвесь угля в вертикальной закрытой трубе / А. В. Пинаев, П. А. Пинаев // Физика горения и взрыва. – 2023. – Т. 59, № 5. – С. 3–12.

32. Pinaev, A. V. Structure of shock and detonation waves propagating in hybrid methane/hydrogen/air/coal dust mixtures / A. V. Pinaev, P. A. Pinaev // Shock Waves. – 2023. – Vol. 33, № 6. – P. 473–482.

33. Пинаев, А. В. Исследование распространения пламени в смесях CH_4/воздух, CH_4/воздух/угольная взвесь в закрытом вертикальном канале / А. В. Пинаев, П. А. Пинаев // Физика горения и взрыва. – 2025. – Т. 61, № 2. – С. 10–17.

34. Пинаев, А. В. Исследование влияния добавок угольной взвеси на устойчивость горения и нижний по метану концентрационный предел распространения пламени в метановоздушных смесях / А. В. Пинаев, П. А. Пинаев // Физика горения и взрыва. – 2026. – Т. 62, № 2. – С. 84–94.

35. Лямин, Г. А. Пьезоэлектрики для измерения импульсных и статических давлений / Г. А. Лямин, А. В. Пинаев, А. С. Лебедев // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т. 27, № 3. – С. 94–103.

36. Пинаев, А. В. Пьезоэлектрические датчики давления, методы их тарировки / А. В. Пинаев, Г. А. Лямин // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 2. – С. 236–239.

37. Васильев, А. А. Газодинамические параметры горения и детонации смесей метан–воздух–угольная пыль / А. А. Васильев, В. А. Васильев, А. В. Пинаев [и др.] // XIV Минский международный форум по тепло– и массообмену, 10–13 сентября 2012, Минск, Беларусь: труды форума. – 2012. – Т. 2, № 2. – С. 422–425.

38. Солоухин, Р. И. Методы измерений и основные результаты в экспериментах на ударных трубах / Р. И. Солоухин // 7–й Международный симпозиум по ударным трубам, Новосибирск, 1969.

39. Cook, P. M. The inhibition of coal dust explosions with rock dust in a large–scale explosion gallery / P. M. Cook. – CSIR Report ENER 93001. – 1992.

40. Азатян, В. В. Кинетические аспекты химических способов предотвращения и тушения пожаров / В. В. Азатян // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. – 1985. – № 1. – С. 4–12.

41. Азатян, В. В. Химическое управление цепным горением – перспективный метод предотвращения возгораний и взрывов метановоздушных смесей / В. В. Азатян // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 2. – С. 40–44.

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

43. Bouchet, R. L’extinction des ondes par les substances pulverisees / R. Bouchet, P. Laffite // C. R. Acad. Sci. – 1958. – Vol. 246. – P. 1858–1861.

44. Васильев, А. А. Полное подавление волн горения и детонации пылевой завесой / А. А. Васильев, А. В. Пинаев, А. В. Троцюк [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 4. – С. 12–21.

45. Васильев, А. А. Оценки условий возбуждения и гашения взрывных волн при шахтных взрывах / А. А. Васильев, А. В. Пинаев, П. А. Фомин [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 2. – С. 91–105.

46. Васильев, А. А. Что горит в шахте: метан или угольная пыль? / А. А. Васильев, А. В. Пинаев, А. А. Трубицын [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 11–18.

47. Пинаев, А. В. Изучение сравнительной химической активности метана и взвесей частиц угля при горении, взрывах и детонации / А. В. Пинаев, П. А. Пинаев // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2019. – № 4. – С. 5–16.

48. Пинаев, А. В. Измерение давления за фронтом волны детонации в гетерогенной системе газ–плёнка / А. В. Пинаев // Физика горения и взрыва. – 1983. – Т. 19, № 1. – С. 105–111.

49. Васильев, А. А. Расчётные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли / А. А. Васильев, В. А. Васильев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 2. – С. 8–39.

50. Войцеховский, Б. В. Структура фронта детонации в газах / Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 1963. – 168 с.

51. Cybulski, W. Coal Dust Explosions and Their Suppression / W. Cybulski; National Technical Information Service. – Springfield: U.S. Department of Commerce, 1975.

52. Vasil’ev, A. A. What is burning in coal mines: methane or coal dust? / A. A. Vasil’ev, A. V. Pinaev, A. A. Trubitsyn [et al.] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2017. – Vol. 53, № 1. – P. 8–14.

53. Пинаев, А. В. Взрыв, детонация в смесях метан–водород–воздух, метан–водород–воздух–взвесь угля / А. В. Пинаев, П. А. Пинаев // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2022. – № 3. – С. 26–38.

54. Niu, Yihui. Methane–Coal Dust Mixed Explosion in Transversal Pipe Networks / Yihui Niu, Leilin Zhang, Biming Shi [et al.] // Combustion Science and Technology. – 2021. – Vol. 193, № 10. – P. 1746.

55. Дементьев, А. А. Сопоставление результатов моделирования распространения пламени в гибридной газовзвеси с экспериментальными данными / А. А. Дементьев, К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов, Д. Ю. Палеев // Инженерно–физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 6. – С. 1538–1546.

56. Крайнов, А. Ю. Моделирование искрового зажигания бидисперсной аэровзвеси угольной пыли / А. Ю. Крайнов, К. М. Моисеева // Инженерно–физический журнал. – 2018. – Т. 91, № 5. – С. 1328–1334.

57. Моисеева, К. М. Исследование горения углеметановоздушной взвеси в длинном закрытом канале / К. М. Моисеева, А. В. Пинаев, А. А. Васильев [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2022. – Т. 58, № 5. – С. 54–63.

58. Льюис, Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе; пер. с англ. – Москва: Мир, 1968. – 592 с.

59. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1 / Р. И. Нигматулин. – Москва: Наука, 1987. – 464 с.

60. Zabetakis, M. G. Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors / M. G. Zabetakis. – Bulletin 627. – Washington: U.S. Bureau of Mines, 1965.

61. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник / под ред. А. Н. Баратова, А. Я. Корольченко. – Москва: Химия, 1990.

62. Бунев, В. А. Анализ влияния различных факторов на характеристики взрывоопасности метана / В. А. Бунев, А. А. Коржавин, П. К. Сеначин // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 5–16.

63. Корольченко, А. Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли / А. Я. Корольченко. – Москва: Химия, 1986. – 216 с.

64. Бабкин, В. С. Влияние диаметра трубы на пределы распространения гомогенных газовых пламён / В. С. Бабкин, В. В. Замащиков, А. М. Бадалян [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1982. – Т. 18, № 2. – С. 44–52.

65. Шебеко, Ю. Н. Особенности горения смесей горючих газов с парами хладонов при распространении пламени сверху вниз / Ю. Н. Шебеко, В. Н. Цап, А. Я. Корольченко [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1982. – Т. 18, № 6. – С. 27–30.

66. Шебеко, Ю. Н. Влияние хладонов на концентрационные пределы воспламенения углеводородов при горении в окислительных средах с повышенным содержанием кислорода / Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, А. Б. Ильин, В. Л. Малкин // Физика горения и взрыва. – 1986. – Т. 22, № 1. – С. 14–18.

67. Пинаев, А. В. Колебания пламени в вертикальном закрытом канале / А. В. Пинаев, П. А. Пинаев // Вестник НЦ ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2023. – № 1. – С. 38–46.

68. ТУ на поставку природного газа. – Введ. 2014. – Соответствует ГОСТ 5542–2014 и СТО Газпром 089–2010.

69. ГОСТ Р 12.3.047–98. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – Москва: Изд–во стандартов, 1998.

70. Amyotte, P. R. The ignitability of coal dust–air and methane–coal dust–air mixtures / P. R. Amyotte, K. J. Mintz, M. J. Pegg, Y. H. Sun // Fuel. – 1993. – Vol. 72, № 5. – P. 671–679.

71. Ajrash, M. J. The flame deflagration of hybrid methane coal dusts in a large–scale detonation tube (LSDT) / M. J. Ajrash, J. Zanganeh, B. Moghtaderi // Fuel. – 2017. – Vol. 194, № 15. – P. 491–502.

72. Chen, D. L. Combustion behaviors and flame structure of methane/coal dust hybrid in a vertical rectangle chamber / D. L. Chen, J. H. Sun, Q. S. Wang, Y. Liu // Combustion Science and Technology. – 2008. – Vol. 180, № 8. – P. 1518–1528.

73. Andrews, G. E. Determination of Burning Velocities: A Critical Review / G. E. Andrews, D. Bradley // Combustion and Flame. – 1972. – Vol. 18, Issue 1. – P. 133–153.

74. Andrews, G. E. The Burning Velocity of Methane–Air Mixtures / G. E. Andrews, D. Bradley // Combustion and Flame. – 1972. – Vol. 19, Issue 2. – P. 275–288.

75. Полежаев, Ю. В. Нормальная скорость распространения пламени и анализ влияния на неё параметров системы / Ю. В. Полежаев, И. Л. Мостинский // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43, Вып. 6. – С. 933–942.