

На правах рукописи

Рыбин Денис Константинович

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО
ГАЗОДЕТОНАЦИОННОГО АППАРАТА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ
ПРОДОЛЬНО СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТОЙ СМЕСИ

1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Научный руководитель: Ульяницкий Владимир Юрьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

Официальные оппоненты: Зайковский Алексей Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

Киверин Алексей Дмитриевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Защита состоится 7 июня 2024 г. в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.125.01 (Д003.035.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д.4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН и на сайте <http://www.itam.nsc.ru/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

С.А. Гапонов

Актуальность работы. В настоящее время актуальными в области газовой детонации являются работы, которые напрямую связаны с промышленными технологическими процессами. Одним из таких процессов является технология детонационного напыления (ДН) различных порошковых материалов.

В последнее время в технологии ДН одним из приоритетных направлений исследований является оптимизация существующих технологий формирования покрытий из распространенных порошковых материалов – металлокерамических композитов (карбид вольфрама, карбид хрома и др.), а также чистых керамических материалов (оксид циркония, оксид алюминия, оксид хрома и др.). Покрытия каждого из этих материалов отличаются функциональными свойствами и назначением: упрочнение поверхности, повышение электроизолирующих свойств, увеличение жаростойкости деталей механизмов нефтегазодобывающей промышленности, авиадвигателей и машин энергетического сектора. Расширение номенклатуры используемых порошковых материалов также является актуальной задачей. Одной из таких является задача о возможности получения детонационных покрытий из чистого вольфрама, рассмотренная в данной работе.

Другим актуальным направлением является поиск новых способов получения покрытий и применение альтернативных газовых топлив, которые могут использоваться взамен взрывоопасного, но широко распространенного ацетилена. К новым способам получения покрытий можно отнести, рассмотренный в данной работе, способ получения покрытий из суспензий наноразмерных порошков. Относительно применения новых углеводородных топлив и их потенциального использования в технологии ДН, нужно отметить, что процесс газовой детонации газообразных углеводородов из ряда алкенов в импульсном газодетонационном аппарате с проточной подачей компонентов взрывчатой смеси (ИГДА) практически не изучен. При этом, на сегодняшний день в технологии ДН по-прежнему используются в основном ацетилен-кислородные смеси с добавками углеводородов или инертного газа. По типу ингибитора различают две технологии: «D-Gun» – в случае применения чистого ацетилена в качестве топлива, и разбавлением взрывчатой смеси азотом, и «Super D-Gun» – когда взрывчатую смесь ацетилена и кислорода разбавляют другим, менее активным углеводородом (пропан, этилен, пропилен и др.). Несмотря на более чем полувековую историю данных топливных технологий, имеются предпосылки к новым исследованиям по поиску альтернатив, обладающих меньшей взрывоопасностью чем широко распространенный ацетилен, но при этом обладающих схожей энергетикой процесса детонации. К ним можно отнести этилен и пропилен, которые по своим детонационным свойствам близки к ацетилену.

Актуальной, является задача, которая рассматривает процесс газовой детонации с точки зрения синтеза новых материалов. В частности, при

детонационном разложении богатых смесей ацетилена образуется определенное количество конденсированного углерода. При этом работы по данной тематике выполнялись исключительно во взрывных камерах закрытого типа. Использование ИГДА в качестве синтез - реактора углеродных частиц и изучения детонации богатых ацетилен-кислородных взрывчатых смесей не изучалось.

Из доступного отечественного оборудования для технологии ДН на сегодняшний день заметно выделяется комплекс детонационного напыления CCDS2000 с прецизионной системой газопитания и компьютеризированным управлением. Первое упоминание об этой установке в научной и технической литературе появилось более пятнадцати лет назад, однако непрекращающийся процесс модернизации конструкции установки, большое количество исследований и поисковых работ по детонационному напылению, сопровождающихся регулярным внедрением их результатов в производство, позволяет говорить о ней как о наиболее современном и универсальном оборудовании с широкими возможностями для синтеза покрытий и материалов с уникальными функциональными свойствами.

В установке CCDS2000, которая является ИГДА с проточной подачей компонентов взрывчатой смеси, можно сказать, что в процессе наполнения ствола взрывчатой смесью формируется продольно стратифицированный заряд, стратами которого являются порции взрывчатой смеси с различным содержанием компонентов. При этом для интенсификации процесса детонации труднодетонирующих смесей применяется, опять же, стратифицированный заряд с легкодетонирующей стратой, которая формируется вблизи источника зажигания. Прецизионная система газопитания установки вместе с компьютеризированным управлением открывает для исследователя широкие возможности по изучению газовой детонации и реализации актуальных направлений исследований в этой области, которые описаны выше. Однако, применительно для этого ИГДА до сих пор остается не изученным процесс формирования стратифицированного заряда внутри ствола, что также является актуальной и важной задачей.

В представляемой диссертационной работе рассматриваются основные полученные автором и с участием автора научные результаты, связанные с применением стратифицированных зарядов в канале импульсного газодетонационного аппарата с проточной подачей компонентов взрывчатой смеси в различных технологических направлениях, и, в частности, в технологии детонационного напыления.

Цель диссертационной работы заключается в оптимизации технологии ДН и расширения технологических возможностей ИГДА на базе исследований процесса газовой детонации продольно стратифицированных зарядов взрывчатой смеси в канале ИГДА.

Задачи исследования:

1. Исследование процесса формирования стратифицированного заряда взрывчатой смеси в стволе ИГДА.
2. Исследование процесса газовой детонации смесей ацетилена, этилена и пропилена с окислителем воздушного состава и чистым кислородом в широком диапазоне концентрационных соотношений топлива и окислителя, включая смеси с повышенным содержанием топлива в смеси.
3. Изучение возможности генерации водорода и наноразмерного детонационного углерода (НДУ) в ИГДА в процессе детонационного разложения ацетилена в присутствии малых добавок кислорода.
4. Изучение возможности формирования покрытий из порошков тугоплавких металлов при помощи технологии ДН.
5. Изучение возможности применения ИГДА для формирования детонационных покрытий из суспензий наноразмерных порошковых материалов.

Научная новизна работы:

1. Применительно к ИГДА впервые изучены характеристики стратифицированного заряда:
 - определена протяженность границ между стратами заряда для различной геометрии ствола ИГДА. Установлена прямая зависимость между величиной объема смесителя камеры смещения-зажигания и объемом зоны размывания границы;
 - выполнена оценка энергии прямого инициирования зарядом-бустером труднодетонируемых взрывчатых смесей;
 - выполнена коррекция численной модели процесса воздействия продуктов детонации на дисперсные частицы порошкового материала внутри ствола ИГДА;
 - изучена особенность дополнительного динамического воздействия на частицы порошка, вызванная распадом детонационной волны на границе между стратами заряда;
 - применяя стратифицированную взрывчатую смесь, смоделирован процесс детонационного напыления порошков на основе карбида вольфрама и карбида хрома в программном пакете «ЛН».
2. С использованием ИГДА проведено исследование газовой детонации смесей этилена и пропилена с кислородом, и получены новые экспериментальные данные по скорости детонации и размеру ячейки.

3. Впервые исследован процесс газовой детонации топливовоздушных взрывчатых смесей на основе ацетилена, этилена и пропилена в ИГДА, и получены новые экспериментальные данные по скорости детонации, размеру ячейки; определены пределы распространения детонации.
4. В экспериментах по исследованию детонации переобогащенных взрывчатых смесей ацетилена, этилена и пропилена с кислородом получены новые экспериментальные данные о скорости детонации и размере детонационной ячейки. Определены предельные концентрации кислорода во взрывчатой смеси для верхнего предела детонации при различном калибре ствола ИГДА.
5. Используя ИГДА, который использовался в качестве синтез-реактора углеродных частиц, при давлении взрывчатой смеси равном атмосферному, впервые были получены образцы НДУ.
6. Получены данные о структуре и свойствах НДУ. Установлены особенности трансформации частиц углерода от полностью аморфного до графитизированного состояния, когда структура углерода представляет собой графеноподобные пластинки толщиной до 20 нм.
7. Предложен способ генерации водорода в импульсном газодетонационном аппарате в виде непрерывного цикла с сопутствующей генерацией НДУ.
8. Реализован способ получения детонационных покрытий из чистого вольфрама.
9. Впервые детонационным способом были получены детонационные покрытия из суспензий на основе наноразмерных порошковых материалов.

Научная значимость работы заключается в том, что процесс газовой детонации стратифицированных зарядов на основе различных углеводородных топлив впервые изучен применительно к ИГДА, в котором взрывчатая смесь формируется внутри реакционного объема в проточном режиме при давлении равном атмосферному. При этом получены данные о характеристиках стратифицированного заряда, что позволяет усовершенствовать численную модель процесса воздействия потока продуктов детонации на дисперсные частицы порошка внутри ствола ИГДА.

Практическая значимость работы состоит в применении стратифицированных взрывчатых смесей в ИГДА, как основного инструмента для совершенствования технологии ДН, и для создания основ новых направлений технологического применения ИГДА.

Исследование детонации смесей этилена, пропилена с кислородом и их применение в технологии ДН показало, что данные смеси можно рассматривать как альтернативу для традиционных топливных технологий, используемых для данного процесса, где основным топливом является ацетилен. Полученные экспериментальные данные по детонации топливовоздушных смесей в широком диапазоне содержания топлива в смеси представляют собой ценный экспериментальный материал, который можно использовать при обеспечении безопасности технологических процессов, где в качестве сырья используются данные топлива. Полученные результаты по детонации переобогащенных смесей ацетилена, этилена и пропилена с кислородом, в первую очередь могут быть полезны при оценке и корректировке существующих теоретических моделей, определяющих параметры детонационного процесса для смесей с низким содержанием окислителя. Разработанный способ получения НДУ, и проведенные исследования его свойств, будут полезны для предприятий и научных организаций, занимающихся синтезом и производством перспективных материалов на основе различных аллотропных форм углерода. Детонационные покрытия из чистого вольфрама представляют собой уникальную альтернативу покрытиям, получаемым при помощи вакуумного осаждения или плазменного напыления, которые, главным образом, используются в экспериментальных установках для ядерного синтеза. Такие покрытия обладают улучшенными характеристиками по сравнению с покрытиями, которые получают традиционными способами, а именно лучшей адгезией и низкой пористостью. Разработанный способ получения детонационных покрытий при помощи суспензий наноразмерных порошковых материалов, открывает собой новое направление в технологии ДН.

Личный вклад автора состоит в совершенствовании конструкции ИГДА и разработке узлов аппарата для реализации новых технологических процессов, а также в постановке задач, предложенных способах их решения, обработке и анализе полученных при этом основных научных результатов. Подготовка и проведение экспериментов по исследованию процесса детонации и детонационному напылению проводилась лично автором или при его непосредственном участии. Разработка плана исследования, подготовка публикаций по теме диссертации, формулировка выводов выполнены совместно с научным руководителем. Представление материалов диссертации согласовано с соавторами.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием в работе традиционных в эксперименте по газовой детонации и хорошо апробированных методов измерения скорости и структуры ячеистого фронта детонации. Использование для расчетов верифицированных численных моделей. Также достоверность подтверждается практическим применением разработанных методов, реализацией этих методов в действующих устройствах, допускающих прямые проверки и испытания в реальных условиях, результатами испытаний и сравнением экспериментальных данных с данными других авторов, полученными другими методами.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. В ИГДА в процессе заполнения ствола стратифицированной взрывчатой смесью между стратами формируется переходная зона протяженностью от 4 до 6 калибров ствола, объем которой определяется объемом смесителя камеры смешения-зажигания.
2. Возбуждение детонации труднодетонирующих смесей в ИГДА без протяженного участка перехода горения в детонацию возможно только с использованием зарядов-бустеров. При этом энергию прямого инициирования заряда-бустера можно оценить при помощи теории сильного точечного взрыва.
3. Верифицированное значение объема зоны смешения между стратами позволяет наиболее адекватно воспроизводить режимы напыления в расчетной программе «ЛН», которая, в свою очередь, позволяет дать оценку дополнительного динамического воздействия на частицы порошка ударной волной с повышенным динамическим напором, образующейся в зоне смешения двух страт при срыве детонации.

4. Для технологии детонационного напыления возможно применение этилена и пропилена в качестве основного топлива, используя заряды-бустеры для возбуждения детонации в основной смеси.
5. В процессе детонационного разложения ацетилена в присутствии малых добавок кислорода образуется наноразмерный детонационный углерод, свойства которого зависят от содержания окислителя в исходной взрывчатой смеси. Помимо генерации НДУ в процессе разложения ацетилена образуется также водород. Непрерывный процесс одновременной генерации НДУ и водорода можно реализовать в технологической цепочке с использованием ИГДА в качестве синтез-реактора.
6. Детонационным способом можно получать низкопористые покрытия из чистого вольфрама, применяя стратифицированную взрывчатую смесь в ИГДА.
7. Используя суспензии наноразмерных порошковых материалов и специальное дозаторное устройство, возможно получение покрытий при помощи технологии суспензионного детонационного напыления.

Апробация работы:

Результаты представлялись на российских и международных конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе на Русско-Японской конференции «Advanced Materials: Synthesis, Processing and Properties of Nanostructures2» (Новосибирск, 2016), Японско-Русской конференции «Annual Meeting of Excellent Graduate Schools for Materials Integration Center and Materials Science Center in conjunction with 2017 Russia-Japan Conference "Advanced Materials: Synthesis, Processing and Properties of Nanostructures"» (Сендай, 2017), Всероссийской конференции с международным участием "Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва" посвященная 60-летию Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск, 2017), Русско-Японской конференции «Russia-Japan Joint Seminar Non-Equilibrium Processing of Materials: Experiments and Modelling» (Новосибирск, 2018), Всероссийской конференции «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложение» (Новосибирск, 2018), XVI Всероссийском симпозиуме по горению и взрыву (Черноголовка, 2022), Всероссийской конференции «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложение» (Новосибирск, 2023).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав с изложением результатов проведенных исследований, заключения, списка цитируемой литературы из 203 наименований, перечня используемых сокращений и обозначений. Общий объем

диссертационной работы составляет 191 страницу, включая 15 таблиц и 99 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулирована цель работы, поставлены задачи и показана научная новизна. Описаны научная и практическая ценность работы и основные положения диссертации, выносимые на защиту. Дана общая структура диссертации.

В первой главе представлен литературный обзор по теме исследования. Представлены основные достижения по выбранным направлениям исследования.

Во второй главе «Устройство ИГДА с проточной подачей компонентов взрывчатой смеси» дано описание, принцип работы и назначение основных узлов импульсного газодетонационного аппарата на примере установки детонационного напыления CCDS2000.

В третьей главе «Стратифицированный заряд взрывчатой смеси в ИГДА» представлены результаты исследования по изучению формирования стратифицированного заряда внутри ствола ИГДА. Двумя методами определена протяженность зоны размытия между стратами. Эксперименты по использованию различной протяженности ствола ИГДА показали, что зона размытия между стратами зависит исключительно от объема смесителя камеры смешения-зажигания. Применительно к использованию труднодетонируемых взрывчатых смесей в ИГДА выполнена оценка энергии прямого инициирования зарядом-бустером при помощи теории сильного точечного взрыва. Для этого была разработана экспериментальная методика, позволяющая получать значение скорости затухающей ударной волны на удалении от источника сильного взрыва, которым в экспериментальной постановке являлся заряд-бустер эквимольной взрывчатой смеси ацетилена и кислорода объемом 160 см³. Далее показано, что конкретизированное значение объема смешения между стратами позволяет скорректировать численную модель процесса воздействия потока продуктов детонации на дисперсные частицы порошка в стволе ИГДА реализованную в виде программного кода «ЛН». В частности показано, что изменение данного параметра приводит к существенному отклонению параметров частиц, вылетающих из ствола ИГДА. Учитывая дополнительное динамическое воздействие на частицы порошка внутри ствола от распадающейся детонационной волны на границе между стратами заряда, представлен анализ процесса с учетом конкретизированного значения зоны смешения между стратами. Выполненные модельные расчеты параметров частиц порошка на примере карбида вольфрама и карбида хрома показали возможность эффективного управления параметрами частиц (скорость и температура) за счет

использования стратифицированного заряда взрывчатой смеси, варьируя количество основного и вспомогательного заряда взрывчатой смеси.

Четвертая глава «Экспериментальное исследование процесса газовой детонации стратифицированных топливо-кислородных и топливо-воздушных взрывчатых смесей» посвящена изучению процесса детонации взрывчатых смесей на основе этилена и пропилена в ИГДА. Выполнены расчеты параметров процесса детонации смесей и проведены эксперименты по изучению процесса детонации на разработанном экспериментальном стенде, схема которого изображена на рис. 1.

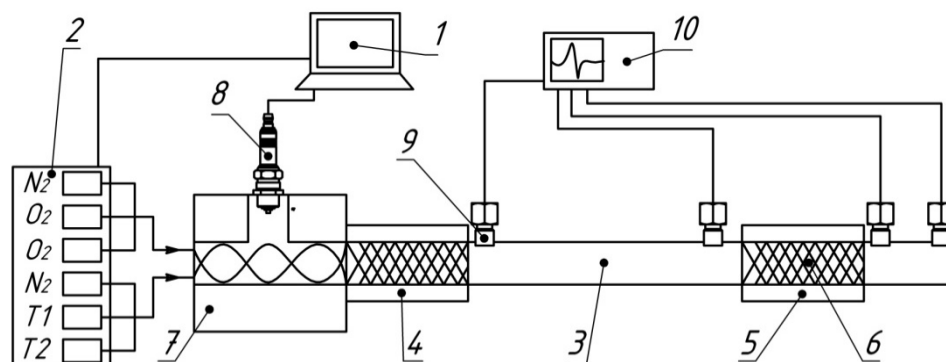


Рис. 1. Схема экспериментального детонационного стенда: 1 – управляющий компьютер, 2 – газораспределитель, 3 – ствол ($d = 26$ мм), 4, 5 – съемные втулки, 6 – закопченная фольга, 7 – камера смешения зажигания, 8 – свеча зажигания, 9 – пьезодатчик давления, 10 – осциллограф.

Полученные экспериментальные данные по скорости детонации и размеру ячейки показали, что в случае обедненных топливо-кислородных смесей наибольший диапазон инициирования (начиная от эквимолярного состава) имели смеси на основе этилена. Предел детонации фиксировался при 5 % содержания топлива в смеси. При этом пределом детонации, считался одно-двухголовой спин, который фиксировался при помощи следовых отпечатков. Для пропилен-кислородных взрывчатых смесей нижний предел распространения детонации наблюдался при концентрации топлива равной 4%. Наиболее активной из этилен-кислородных оказалась смесь, содержащая 49 % топлива ($k = 1.04$), у которой зарегистрирован наименьший продольный размер ячейки $b \approx 0.45$ мм, а из пропилен-кислородных, содержащая 21% топлива ($k = 3.76$), с продольным размером ячейки $b \approx 0.9$ мм. Расчет параметров детонации и продуктов детонации выполнялся при помощи программного пакета «DETON». При этом только благодаря использованию заряда-бустера ацетилен-кислородной взрывчатой смеси эквимолярного состава объемом 120 см^3 , который формировался вблизи источника зажигания, удалось достичь нижних и верхних пределов детонации для изучаемых топлив. Минимальное содержание топлива при прямом инициировании (от свечи

зажигания) составляло для этилен-кислородных смесей 10 %, а для пропилен-кислородных 6% соответственно. Полученные экспериментальные значения скорости детонации хорошо согласуются с результатами расчета вдали от пределов детонации, максимальное отклонение (порядка 5 %) регистрируется лишь вблизи пределов в около спиновых режимах. На рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные данные исследуемых топливо-кислородных смесей.

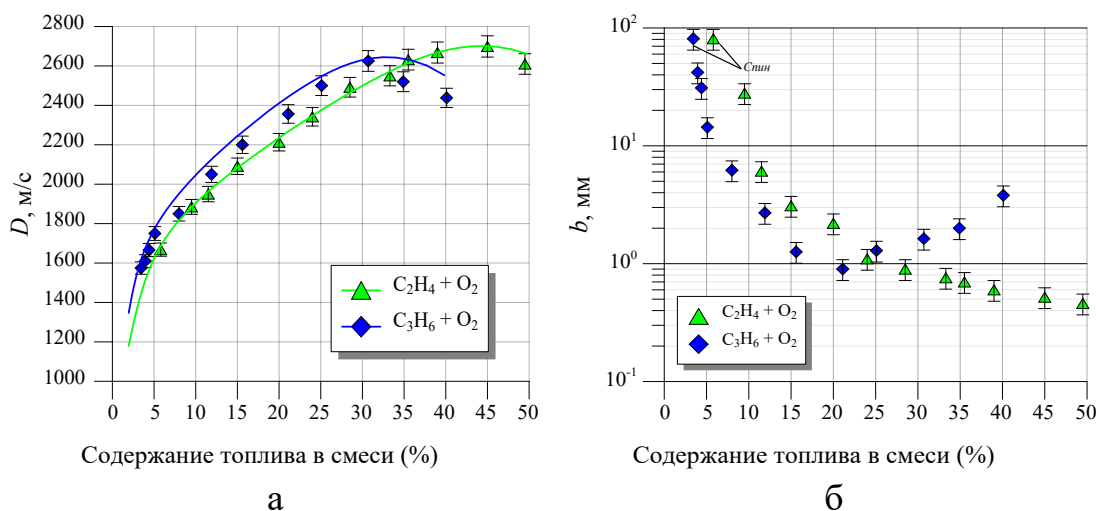


Рис. 2. Полученные экспериментальные данные по изучению детонации обедненных этилен- и пропилен-кислородных взрывчатых смесей.

Исследование детонации топливо-кислород-азотных взрывчатых смесей на основе ацетилена, этилена и пропилена показало, что в случае с разбавлением взрывчатых смесей азотом до воздушного состава окислителя значения параметров детонации монотонно снижаются для всех исследуемых топлив, что подтверждают и расчетные, и экспериментально полученные данные.

В смесях ацетилена с воздухом стационарная детонация существует в широком диапазоне концентраций – от 4 % до 32 % содержания топлива в смеси с выходом на спиновый режим в диапазоне от 4 % до 5 % на нижнем пределе и в диапазоне 30 % ÷ 32 % – на верхнем. В этилен-воздушных смесях пределы детонации сокращаются до 4 % ÷ 16 % содержания топлива в смеси. Спин фиксируется в диапазоне 4 % ÷ 6 % внизу и 14 ÷ 16 % – вверху. Еще более узкие пределы детонации в воздушных смесях пропилена – 4 % ÷ 10 %, в которых регистрируемый в стехиометрических составах двухголовый спин трансформируется в одноголовый в 2-х процентном интервале вблизи границ.

При исследовании детонации переобогащенных взрывчатых смесей было установлено, что верхним пределом детонации является содержание ацетилена – 90 %, для пропилена – 47 % и для этилена - 60 %.

Для устойчивого возбуждения самоподдерживающейся детонации всех топлив вплоть до спинового режима оказалось достаточно от 70 мл до 120 мл

заряда-бустера из смеси $C_2H_2 + O_2$. Форсирование детонации было возможно и с использованием смесей на основе этилена и пропилена: $C_2H_4 + 1.5O_2$ и $C_3H_6 + 3O_2$ с соотношением $O/C > 1$, у которых размер ячейки был менее 1 мм.

Это исследование показало, что, используя стратифицированные заряды в ИГДА, вне зависимости от типа окислителя, для топлив на основе ацетилена, этилена и пропилена удастся добиться реализации самоподдерживающейся детонации вплоть до предельных спиновых режимов в широком диапазоне концентраций компонентов взрывчатой смеси.

В пятой главе «Расширение технологических возможностей ИГДА за счет применения стратифицированных зарядов взрывчатой смеси» изучалась возможность синтеза НДУ в циклическом режиме работы ИГДА, разработанного на базе установки детонационного напыления CCDS2000. В качестве исходных взрывчатых смесей использовались богатые смеси ацетилена с кислородом в диапазоне содержания кислорода в смеси от 45% до 10%. Для возбуждения детонации, по аналогии с исследованием, проведенным в четвертой главе, использовались бустерные заряды.

Для накопления углеродного конденсата в циклическом режиме посредством серии выстрелов был разработан трехступенчатый водоохлаждаемый осадитель-уловитель частиц, работающий по принципу циклона. В качестве реакционного объема для генерации частиц использовались водоохлаждаемые стволы калибром 26 мм с длиной 750 мм и 1500 мм.

Принципиальная схема установки показана на рис. 3.

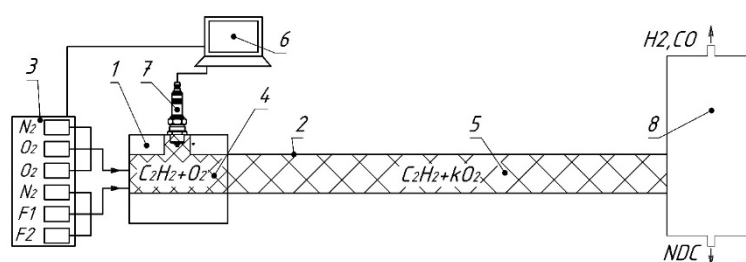


Рис. 3. Схема ИГДА для генерации и накопления углеродного конденсата:

- 1 – камера смешения зажигания, 2 – водоохлаждаемый ствол,
 3 – газораспределительное устройство, 4 – заряд бустер ацетилен-кислородной смеси эквимольного состава, 5 – основная ВС, 6 – управляющий компьютер,
 7 – свеча зажигания, 8 – коллектор.

При этом было установлено, что предложенная схема улавливания частиц конденсированного углерода обеспечивает эффективность улавливания порядка 90%. На рисунке 4 представлен лабораторный вариант уловителя частиц НДУ.



Рис. 4. Общий вид лабораторного ИГДА: 1 – газораспределитель, 2 – ствол, 3 – первая ступень уловителя частиц, 4 – вторая ступень уловителя частиц.

Анализ свойств углеродного конденсата при помощи методов СЭМ, ПЭМ и спектроскопии комбинационного рассеяния, полученного при различном содержании кислорода во взрывчатой смеси показал, что степень графитизации материала растет с увеличением содержания кислорода во взрывчатой смеси, и при $k = 0.51$ (34% содержания кислорода в смеси) наблюдается максимум графитизации. Частицы представляет собой скрученные пластинки, напоминающие графеновые листы. Зависимость плотности НДУ ρ от k также не монотонна: имеется максимум $\rho = 0.055$ г/см³ при $k = 0.42$ и минимум $\rho = 0.013$ г/см³ при $k = 0.11$. Такое большое различие в плотности (почти в 5 раз) свидетельствует о различии в морфологии частиц НДУ, получаемого при разном концентрационном соотношении топлива и окислителя в детонирующей смеси. Рис. 5 иллюстрирует различие в морфологии НДУ, полученного при различном содержании кислорода во взрывчатой смеси.

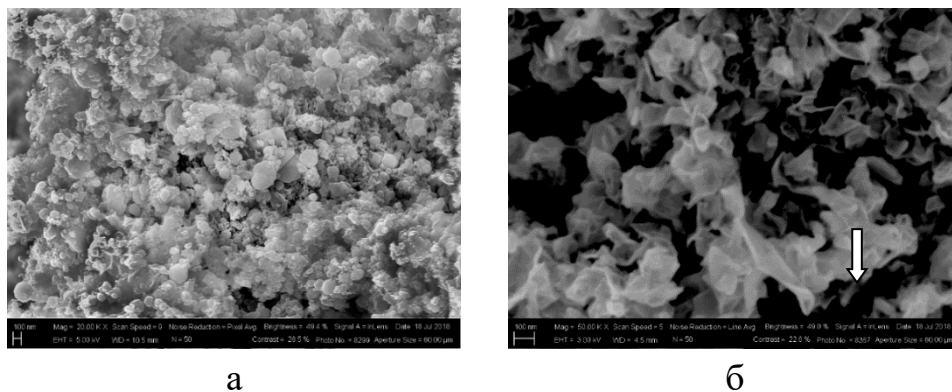


Рис. 5. СЭМ снимки углеродных частиц, полученные в стволе 1500 мм при $k = 0.51$ (а) и $k = 0.82$ (б). Белая стрелка указывает на частицу, напоминающую графеновый лист.

Удельная поверхность $S_{уд}$ образцов НДУ, полученных при $k = 0.11, 0.25, 0.43$ и 0.68 оказалась равной $230, 158, 120$ и $107 \text{ м}^2/\text{г}$ соответственно. Это подтвердило, что с ростом параметра k увеличивается и размер частиц НДУ. При этом снимки ПЭМ (рис. 6) демонстрируют слоистую структуру НДУ, полученного при различных k . Толщина слоистой структуры может достигать нескольких десятков нанометров.

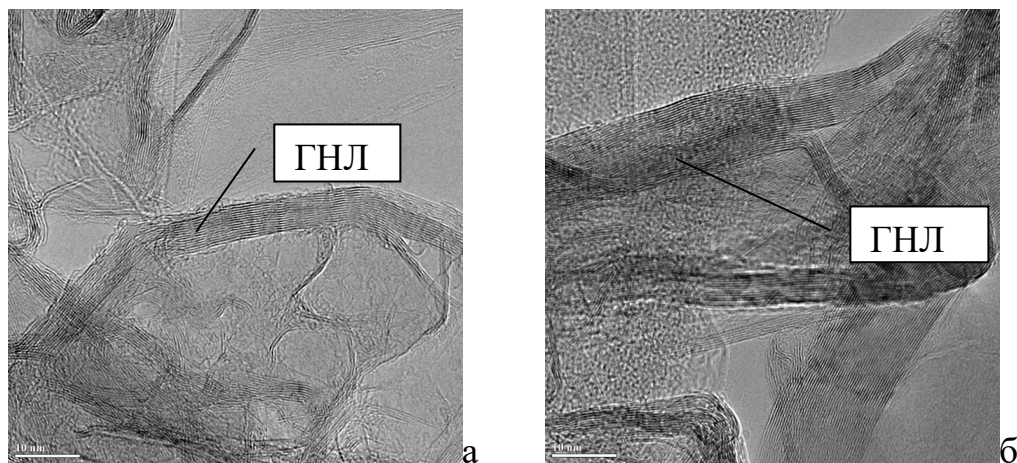


Рис. 6. ПЭМ снимки НДУ, который был получен в стволе длиной 1500 мм при $k = 0.68$ (продувочный газ - азот). ГНЛ – графеновые нанолисты.

Далее процесс разложения ацетилена в присутствии малых добавок кислорода был рассмотрен с точки зрения получения водорода, как сопутствующего продукта реакции разложения ацетилена. Известно, что концентрация водорода в ПД при разложении смеси ацетилена и кислорода с уменьшением k возрастает вплоть до получения из исходных продуктов чистого водорода и НДУ ($k = 0$).

Расчеты количества водородосодержащих и углеродсодержащих компонентов в ПД ацетиленокислородных смесей $\text{C}_2\text{H}_2 + k\text{O}_2$ были выполнены с использованием разработанного в ИГиЛ СО РАН программного комплекса. Результаты расчета представлены на рис. 7 (а, б и в). Полученные данные показывают, что при остывании ПД эквимольярной смеси образуется синтез газ $2\text{CO} + \text{H}_2$ со стопроцентным выходом содержащегося в ацетилене водорода. С дальнейшим увеличением содержания кислорода в исходной смеси при $k > 1$ в ПД появляется двуокись углерода и начинается окисление водорода с резким увеличением содержания окислов по мере достижения стехиометрического состава при $k = 2.5$. При охлаждении ПД смеси стехиометрического состава в результате рекомбинации ряда компонентов конечными продуктами являются углекислый газ и вода. Таким образом, максимальная и постоянная, независимо от содержания кислорода, генерация водорода путем детонационного разложения взрывчатой смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + k\text{O}_2$ реализуется при условии $k \leq 1$. При этом уменьшение содержания

кислорода позволяет минимизировать «углеродный след» в виде выделяемых окислов углерода, сводя его до нуля при разложении чистого ацетилена. И лишь незначительный выброс CO остается от заряда-бустера из эквимольярной ацетилено-кислородной смеси $C_2H_2 + O_2$.

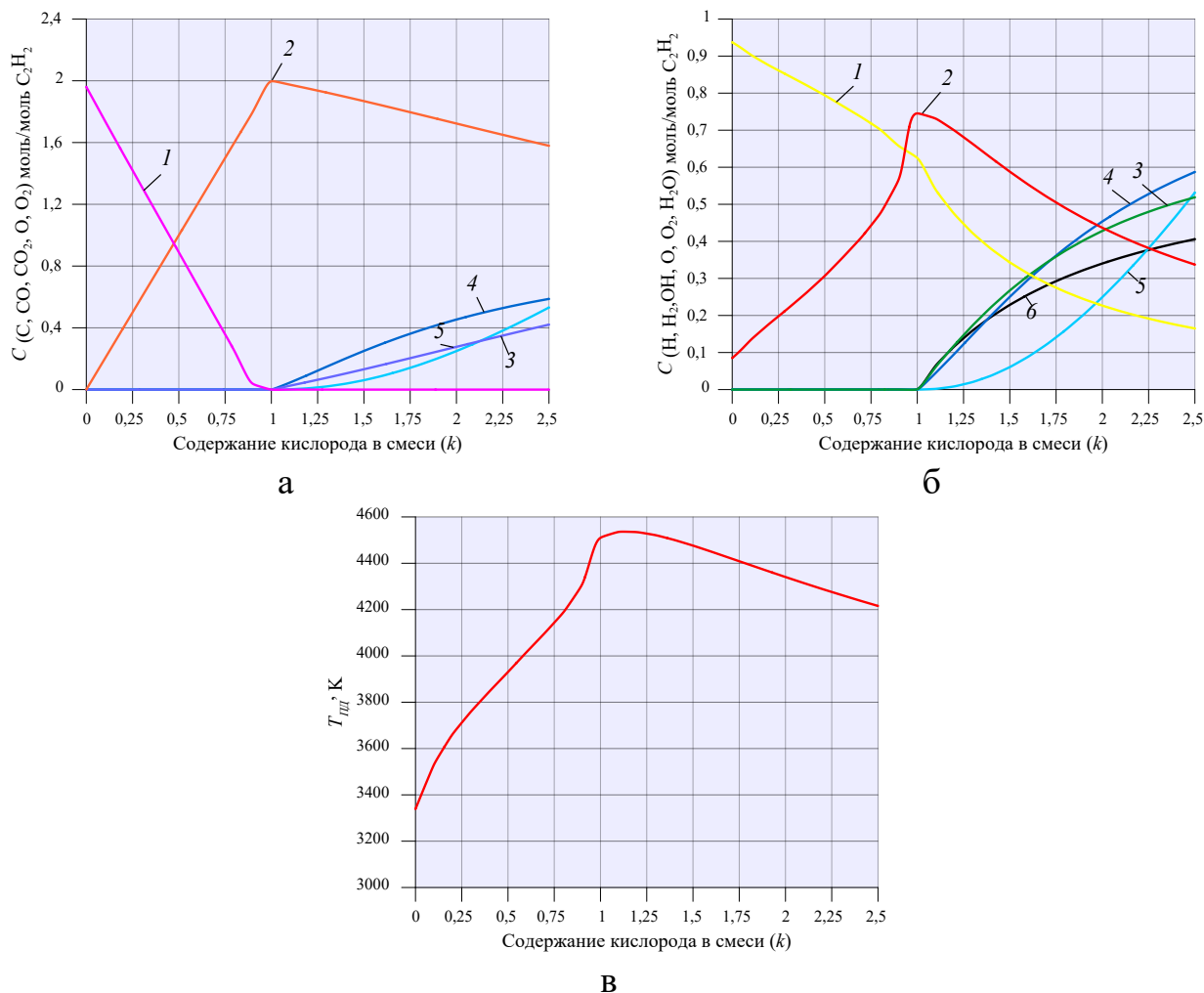


Рис. 7. Зависимость содержания углеродосодержащих (а) компонентов и кислорода в ПД от содержания кислорода во взрывчатой смеси: 1- конденсированный углерод, 2- CO, 3-CO₂, 4-O, 5-O₂; зависимость содержания водородосодержащих (б) компонентов и кислорода в ПД от содержания кислорода во взрывчатой смеси: 1- H₂, 2- H, 3-OH, 4-O, 5-O₂, 6-H₂O; зависимость температуры ПД от содержания кислорода во взрывчатой смеси.

Учитывая теоретические рекомендации по разложению ацетилена, наиболее подходящим вариантом разложения выглядит процесс детонационного разложения чистого ацетилена. Однако экспериментально было установлено, что в ИГДА данный процесс возможен в случае использования калибра ствола более 135 мм, о чем свидетельствует график зависимости предельной концентрации кислорода во взрывчатой смеси от используемого калибра ствола в эксперименте,

представленный на рис. 8. Схема проведения эксперимента по исследованию детонации ацетиленокислородных смесей в ИГДА с различным калибром ствола представлена на рис. 9.

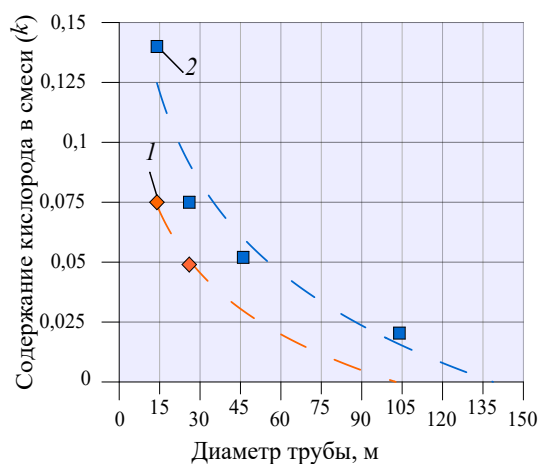


Рис. 8. Предельная концентрация кислорода во взрывчатой смеси в зависимости от диаметра ствола: 1 – галопирующая детонация, 2 – спиновая детонация.

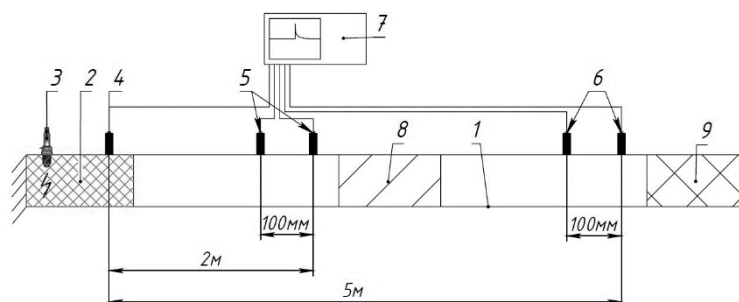


Рис. 9. Схема экспериментального стенда: 1- ствол ИГДА, 2 – камера смешения-зажигания (заряд-бустер), 3 – свеча зажигания, 4 – датчик запуска измерений, 5 – первая пара датчиков, 6 – вторая пара датчиков, 7 - осциллограф Tektronix TDS 2004B, 8, 9 – разъемные секции.

При этом в экспериментах для инициирования труднодетонирующих смесей применялся бустерный заряд. Необходимый объем заряда вблизи верхнего предела детонации определялся экспериментально для каждого калибра ствола. Для ствола калибром 26 мм были определены значения минимального объема бустера во всем исследуемом диапазоне концентраций кислорода в смеси (рис. 10).

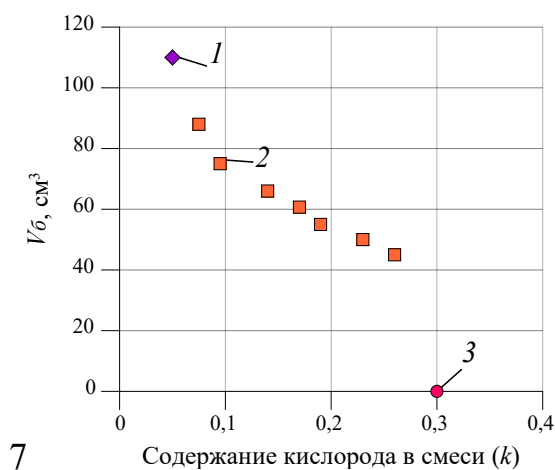


Рис. 10. Зависимость объема бустера V_b от содержания кислорода во взрывчатой смеси. Калибр ствола ИГДА 26 мм: 1– галопирующая детонация, 2- спиновая детонация, 3- прямое инициирование от свечи зажигания.

Проведенные исследования показывают, что стабильное инициирование детонации ацетиленокислородных смесей с малым содержанием кислорода при атмосферном давлении требует применения достаточно больших по объему бустерных зарядов. По этой причине уменьшить выброс СО до нуля в технологии получения водорода путем детонационного разложения ацетилена с использованием бустера не представляется возможным. Однако рассмотренный способ получения НДУ при одновременной генерации водорода обладает определенными перспективами для дальнейшего развития данной технологии, так как рассмотренная цепочка получения водорода, включающая детонационное разложение ацетилена, позволяет приблизительно в 12 раз снизить углеродный след по сравнению с традиционными технологиями риформинга метана.

Шестая глава «Практические приложения использования стратифицированных зарядов в импульсных газодетонационных аппаратах для детонационного напыления» посвящена изучению использования стратифицированных зарядов в технологии детонационного напыления на примере двух исследований – получению низкопористых детонационных покрытий из чистого вольфрама, и получению покрытий из наноразмерных порошковых материалов при помощи подачи в ствол суспензий на их основе.

В процессе формирования покрытий из чистого вольфрама было обнаружено, что данный материал реакционноспособен, а фазовый состав покрытия сильно зависит от исходного состава взрывчатой смеси. При этом эксперименты по детонационному напылению проводились с использованием параметров процесса, которые были определены при помощи программного пакета «ЛИН» (О/С = 1,0, калибр ствола 20 мм, длина ствола 1500 мм, заполнение ствола 100%, глубина загрузки порошка 200 мм). Было обнаружено, что покрытие формировалось с заметным содержанием окислов. Для того чтобы избавиться от

окисления вольфрама, был реализован способ формирования взрывчатой смеси в канале ствола, при котором вблизи дульного среза формировался небольшой объем чистого ацетилена (около $5 \text{ см}^3 - 7 \text{ см}^3$), который в процессе напыления частично окислялся и вступал в реакцию с воздухом, и частично разлагался на углерод и водород. Экспериментально варьируя заряд из чистого ацетилена вблизи позиции инъекции, удалось снизить до минимума содержание кислородсодержащих компонентов в продуктах детонации, что позволило получить покрытие из чистого вольфрама, о чем говорят данные рентгенофазового анализа, изображенные на рис. 11. Микроструктура покрытия изображена на рис. 12.

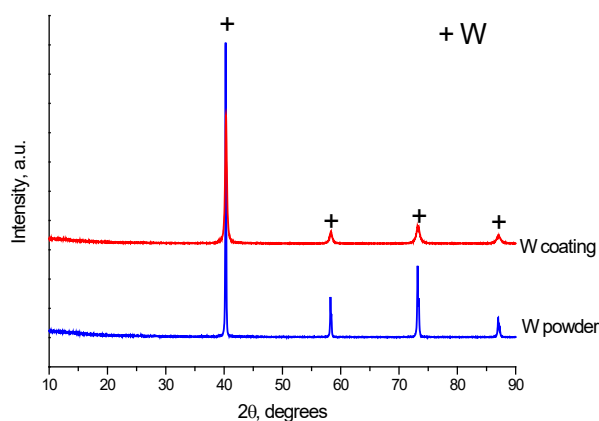


Рис. 11. РФА-диаграммы исходного порошкового материала и покрытия.

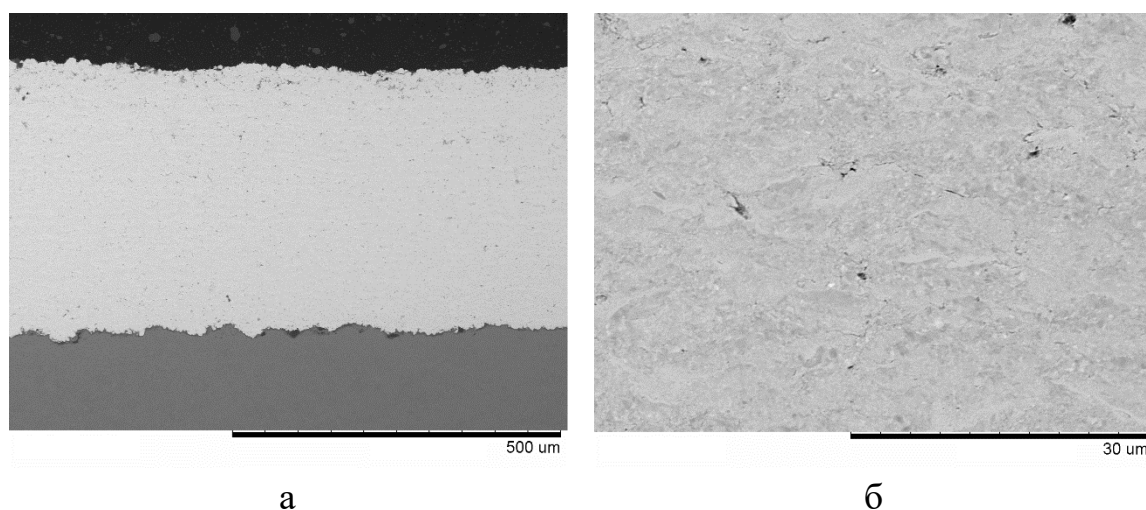


Рис. 12. Общий вид покрытия (а) и микроструктура покрытия из вольфрама (б).

Полученные покрытия обладают хорошей адгезией (более 100 МПа), что можно считать когезионным пределом прочности материала покрытия, и достаточно низкой пористостью (менее 1.0 %). Важным результатом является и то, что остаточные напряжения в покрытии имеют сжимающий характер, что, как известно, положительным образом сказывается на эксплуатационных характеристиках покрытия в целом.

Последний раздел работы посвящен изучению процесса формирования детонационных покрытий при помощи суспензий из наноразмерных порошковых материалов, и формированию основ технологии суспензионного детонационного напыления (СДН).

На первом этапе исследований на имеющемся оборудовании для детонационного напыления были выполнены предварительные эксперименты по нанесению керамических покрытий из наноразмерных порошковых материалов. В экспериментах использовались наноразмерные порошковые материалы на основе оксида алюминия Al_2O_3 , оксида титана TiO_2 и гидроксипатита $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$. Для общего сравнения методов ДН и СДН использовался порошок оксида титана TiO_2 с размером частиц от 30 мкм до 90 мкм. Суспензии приготавливались путем смешивания порошков с этиловым спиртом в пропорции 40% / 60% об. Для подачи использовался атомайзер аэрографа, обеспечивающий дробление капель на уровне 20 – 30 мкм. Однако добиться формирования покрытия не удалось ввиду чрезмерно малой по массе порции инжектируемого материала в ствол.

Второй этап заключался в применении порошкового дозатора установки CCDS2000 в качестве инжектирующего устройства. В данном эксперименте удалось получить покрытия из указанных порошковых материалов по свойствам, не уступающим покрытиям, которые получают традиционным способом. Однако выявленные в эксперименте недостатки процесса инжектирования суспензии, основным из которых являлась достаточно слабая атомизация капель, привели к созданию нового по принципу действия устройства подачи суспензии.

Устройство, схематическое изображение которого представлено на рис. 13, состоит из трёх кольцевых каналов, два из которых предназначены для эжекции и атомизации суспензии при помощи формируемых воздушных потоков, а третий канал служит для подачи суспензии в ствол. Поочередность подачи сжатого воздуха в каналы осуществляется при помощи пневматических быстродействующих (~ 6 мс) электромагнитных клапанов фирмы FESTO (Германия) модели МНР4, открывающихся и закрывающихся в соответствии с заданной циклограммой управляющего компьютера. Подача суспензии осуществляется при помощи электромагнитного клапана МНР4, что обеспечивает дозированную подачу и отсутствие стекания жидкости в ствол через подающую щель под действием силы тяжести в перерыве между выстрелами.

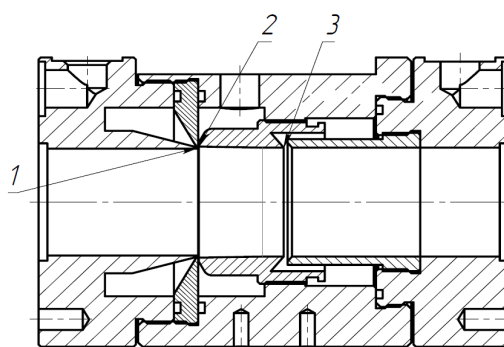


Рис. 13. Схематическое изображение устройства для эжекции суспензии в ствол детонационной установки: 1 – канал подачи эжектирующего воздуха, 2 – канал подачи эжектируемой суспензии, 3 – канал подачи воздуха для распыления суспензии.

Работа устройства была экспериментально оптимизирована: определялись расходные характеристики, оптическими методами был изучен процесс дробления капель суспензии, были выполнены оценочные расчеты по времени испарения жидкости-носителя в стволе детонационной установки в процессе выстрела, а также рассчитаны режимы напыления частиц суспензии используемых порошковых материалов при помощи программного кода «ЛН». При помощи оборудования для высокоскоростной съемки были определены значения скоростей частиц, вылетающих из ствола в процессе выстрела. Было установлено, что расчетная скорость частиц, с хорошей точностью коррелирует с экспериментальным значением при условии использования в расчете критерия дробления частиц, и корректных значений размера капель суспензии.

В результате экспериментов по напылению суспензий были получены покрытия из вышеуказанных порошков оксида алюминия и оксида титана. Микроструктура полученных покрытий представлена на рисунке 14. Микротвердость покрытий по Виккерсу при нагрузке 100 г составила $HV = 820 \pm 80$ и $HV = 527 \pm 150$ для Al_2O_3 и TiO_2 соответственно.

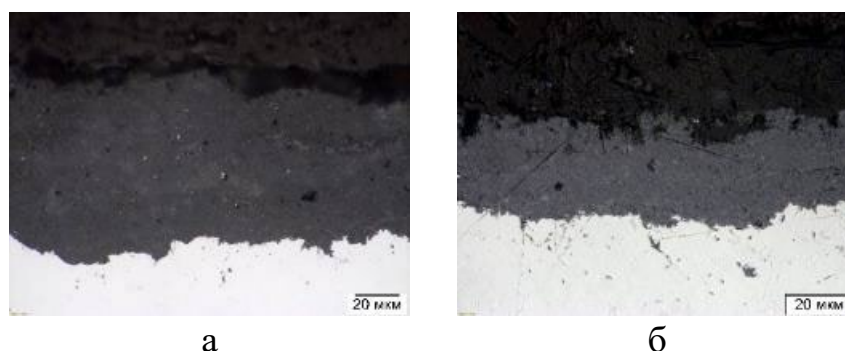


Рис. 14. Покрытия из Al_2O_3 (а) и TiO_2 (б).

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Изучен процесс стратификации заряда в ИГДА с проточной подачей компонентов взрывчатой смеси. Разработаны методика регистрации переходной зоны между стратами с помощью следовых отпечатков и методика регистрации зажигания взрывчатой смеси на границе с инертным газом. Реализовано вихревое смешение компонентов смеси в малообъемном смесителе. Установлено, что протяженность зоны смешения между стратами заряда определяется объемом смесителя. На основе экспериментальных данных конкретизирован объем области смешения для расчетной модели кода «ЛН». По затуханию ударной волны от заряда-бустера оценена энергия инициирования детонации в труднодетонируемых взрывчатых смесях. Объяснена немонотонность зависимости ускорения частиц от величины заряда в стволе ИГДА. Модельными расчетами показана возможность эффективного управления параметрами частиц порошка за счет стратификации заряда взрывчатой смеси.
2. Со стратификацией заряда взрывчатой смеси в ИГДА исследован процесс детонации этилен и пропилен-кислородных взрывчатых смесей в широком диапазоне концентраций топлива и окислителя. Определено положение исследуемых газов в ряду топлив, применяемых в технологии детонационного напыления. Исследован процесс детонации топливовоздушных и топливо-кислород-азотных взрывчатых смесей на основе ацетилена, этилена и пропилена. Полученные экспериментальные данные по детонации при атмосферном давлении топливовоздушных смесей являются важным экспериментальным материалом для оценки безопасности различных производственных процессов с использованием этих газов.
3. Создан лабораторный образец генератора наноразмерного детонационного углерода, способный работать в циклическом режиме разложения ацетилена при атмосферном давлении. Установлено, что свойства углеродного конденсата зависят от содержания кислорода в исходной взрывчатой смеси. Предложен прототип технологической цепочки одновременного получения НДУ и водорода, позволяющий до 12 раз снизить углеродный след.
4. Применение стратификации заряда позволило получить методом детонационного напыления низкопористые покрытия из чистого вольфрама.
5. На установке CCDS2000 впервые получены детонационные покрытия из суспензий наноразмерных порошковых материалов со свойствами, не уступающими покрытиям, получаемым традиционным способом. Для подачи суспензии в ствол разработано устройство, работающее на эффекте

эжекции, с возможностью дозированной подачи суспензии и варьирования размера капель суспензии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях ВАК:

1. Получение наноразмерного детонационного углерода на импульсном газодетонационном аппарате / А. А. Штерцер, В. Ю. Ульяницкий, И. С. Батраев, // Письма в Журнал технической физики. – 2018. – Т. 44. – № 9. – С. 65-72. – DOI 10.21883/PJTF.2018.09.46067.17165. – EDN YUVBHD.
2. Investigation of Gas Detonation in Over-Rich Mixtures of Hydrocarbons with Oxygen / I. S. Batraev, A. A. Vasil'ev, V. Y. Ul'yanitskii [et al.] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2018. – Vol. 54. – No 2. – P. 207-215. – DOI 10.1134/S0010508218020107. – EDN YBYGRN.
3. Shtertser, A. A. Suspension Detonation Spraying of Ceramic Coatings / A. A. Shtertser, V. Y. Ul'yanitskii, **D. K. Rybin** // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2019. – Vol. 55. – No 4. – P. 483-490. – DOI 10.1134/S0010508219040166. – EDN QNPTKJ.
4. **Rybin, D. K.** Detonation of Ethylene– and Propylene–Oxygen Explosive Mixtures and Their Use in Detonation Spraying Technology / D. K. Rybin, V. Y. Ul'yanitskii, I. S. Batraev // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2020. – Vol. 56. – No 3. – P. 353-360. – DOI 10.1134/S0010508220030120. – EDN ADRXIS.
5. Батраев, И. С. Параметры детонации смесей, создаваемых при инжекции газовых компонентов в ствол импульсного газодетонационного аппарата / И. С. Батраев, **Д. К. Рыбин**, В. Ю. Ульяницкий // Физика горения и взрыва. – 2021. – Т. 57. – № 1. – С. 27-33. – DOI 10.15372/FGV20210103. – EDN WXKKTG.

Публикации в рецензируемых изданиях WoS и SCOPUS:

1. Characterization of nanoscale detonation carbon produced in a pulse gas-detonation device / A. A. Shtertser, D. K. Rybin, V. Y. Ulianitsky [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2020. – Vol. 101. – P. 107553. – DOI 10.1016/j.diamond.2019.107553. – EDN HRUGOT.
2. Metal–Nanocarbon Composite Coatings Produced by Detonation Spraying with In Situ Carbon Generation / A. A. Shtertser, D. V. Dudina, V. Y. Ulianitsky [et al.] //

- Journal of Thermal Spray Technology. – 2021. – Vol. 30. – No 7. – P. 1837-1849. – DOI 10.1007/s11666-021-01264-1. – EDN GNDDMI.
3. Deposition of tungsten coatings by detonation spraying / **D. K. Rybin**, I. S. Batraev, D. V. Dudina [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 409. – P. 126943. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2021.126943. – EDN EUTKJS.
 4. Production of hydrogen and carbon black by detonation of fuel-rich acetylene-oxygen mixtures / A. A. Shtertser, V. Y. Ulianitsky, **D. K. Rybin** [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Vol. 47. – No 30. – P. 14039-14043. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2022.02.164. – EDN UYLIVS.

Патенты:

1. Патент № 2641829 С1 Российская Федерация, МПК С01В 32/15, В01J 3/08, В05В 7/20. Способ получения наноуглерода : № 2016132962 : заявл. 09.08.2016 : опубл. 22.01.2018 / И. С. Батраев, А. А. Васильев, А. В. Пинаев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем переработки углеводородов Сибирского отделения Российской академии наук (ИППУ СО РАН), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН). – EDN XVLICF.

Тезисы докладов и статьи в сборниках трудов конференций:

1. Детонационное разложение газообразных углеводородных топлив с получением водорода / А. А. Штерцер, И. С. Батраев, Д. К. Рыбин, В. Ю. Ульяницкий // Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения : Тезисы докладов, Новосибирск, 18–21 сентября 2023 года / Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук»; Сибирское отделение РАН институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева. – Новосибирск: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук», 2023. – С. 147-148. – DOI 10.53954/9785604990025_147. – EDN HRJNVU.
2. Ульяницкий, В. Ю. Остаточные напряжения в детонационных покрытиях, обусловленные наклепом / В. Ю. Ульяницкий, Д. К. Рыбин, А. Ю. Ларичкин // Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения : Тезисы докладов, Новосибирск, 18–21 сентября 2023 года / Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук»; Сибирское отделение РАН институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева. – Новосибирск: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук», 2023. – С. 179-180. – DOI 10.53954/9785604990025_179. – EDN KBFRJL.
3. Получение водорода в импульсном газодетонационном аппарате / А. А. Штерцер, В. Ю. Ульяницкий, Д. К. Рыбин, И. С. Батраев // Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву : Тезисы докладов, Суздаль, 04–09 сентября 2022 года. – Черноголовка: Институт проблем химической физики РАН, 2022. – С. 265-266. – EDN DPVONR.
4. Батраев, И. С. Исследование детонации топливовоздушных смесей в канале ствола импульсного газодетонационного аппарата / И. С. Батраев, Д. К.

- Рыбин // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов XVI Всероссийской научной конференции молодых ученых. В 11-и частях, Новосибирск, 05–08 декабря 2022 года / Под редакцией А.С. Казьминой. Том Часть 11. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2022. – С. 134-136. – EDN QUUYTT.
5. Металлические покрытия, армированные наноразмерным детонационным углеродом / А. А. Штерцер, В. Ю. Ульяницкий, И. С. Батраев [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : Сборник докладов 12-го Международного симпозиума. В 2-х частях, Минск, 07–09 апреля 2021 года / Редколлегия: А.Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. Том Часть 2. – Минск: Республиканское унитарное предприятие "Издательский дом "Белорусская наука", 2021. – С. 307-312. – EDN XBENUS.
 6. Rybin, D. K. Structural investigation of nanoscale detonation carbon obtained using a pulse gas-detonation device / D. K. Rybin, H. Kato, A. A. Shtertser // Non-equilibrium processing of materials: experiments and modeling : Abstracts of the Russia-Japan Joint Seminar, Новосибирск, 01–03 октября 2018 года / Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk State University, Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Tohoku University. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2018. – Р. 76. – EDN VKDLKO.
 7. Explosive synthesis of nanoscale detonation carbon / A. A. Shtertser, V. Yu. Ul'yanitskii, I. S. Batraev, D. K. Rybin // Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations : 14th International Symposium, Saint Petersburg, Russia, 14–18 мая 2018 года / Edited by M.I. Alymov, O.A. Golosova. – Saint Petersburg, Russia: Общество с ограниченной ответственностью "ТОРУС ПРЕСС", 2018. – Р. 254-257. – DOI 10.30826/EPNM18-089. – EDN XMKKXZ.
 8. A.Shtertser, V.Ulianitsky D.Rybin, I.Batraev. Nanoscale Detonation Carbon made on the Pulse Gas-Detonation Device // In: Abstracts of 2018 Japan-Russia Joint Seminar “Advanced Materials Synthesis Process and Nanostructure”, 22-23 March, 2018, Sendai, Japan. – Tohoku University, 2018, p.14.
 9. А. А. Штерцер, В.Ю. Ульяницкий, И.С. Батраев, Д.К. Рыбин. Импульсный газо-детонационный аппарат как генератор наноглобулярного углерода (графена) // Всероссийская конференция с международным участием "Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва" посвященная 60-летию Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 4 - 8 сентября 2017, Новосибирск.

10. D. K. Rybin, I. S. Batraev, V. Yu. Ulianitsky, Investigation of gas detonation of propylene-oxygen and ethylene-oxygen explosive mixtures and the formation of detonation coatings by a detonation gun // 2017 Annual Meeting of Excellent Graduate Schools for Materials Integration Center and Materials Science Center in conjunction with 2017 Russia-Japan Conference "Advanced Materials: Synthesis, Processing and Properties of Nanostructures", г. Сендай, Япония, 21-22 марта 2017 г.
11. I. S. Batraev, D. V. Dudina, D. K. Rybin. CCDS facilities as dynamic chemical reactors // Abstracts of the Russia-Japan Conference "Advanced Materials: Synthesis, Processing and Properties of Nanostructures", NSU, Novosibirsk, Oct 30-Nov 3, 2016, p.21.

Благодарности

Автор выражает особую признательность своему научному руководителю д.т.н. Ульяницкому Владимиру Юрьевичу за руководство и мотивацию, а также д.ф.-м.н. Штерцеру Александру Александровичу за чрезвычайно полезные советы и помощь на протяжении всей работы. Автор выражает особую благодарность д.т.н. Дудиной Дине Владимировне за верные наставления и предоставленную возможность обрести ценный международный опыт научной деятельности. Автор выражает благодарность сотрудникам ИГиЛ СО РАН: н.с. Батраеву И.С., д.ф.-м.н. Васильеву А.А., д.ф.-м.н. Прууэлу Э.Р., д.ф.-м.н. Паю В.В.