

На правах рукописи



Самсонов Александр Николаевич

**НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ
ВОДОРОД-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ
В КАМЕРАХ ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

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

Научный руководитель: Быковский Федор Афанасьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты: Шарыпов Олег Владимирович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), заместитель директора.

Третьяков Павел Константинович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН), заведующий сектором.

Защита состоится 21 сентября 2022 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.06 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru.

Автореферат разослан 03 июня 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент



Глушков Дмитрий Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Детонация способна интенсивно и с большей полнотой сжигать топливо в камерах малых габаритов, определяемых размером фронта детонационной волны. Она является термодинамически более выгодной по сравнению с режимами дефлаграции при постоянном давлении и постоянном объёме, сохраняет устойчивость при изменении параметров процесса в широких пределах: давления в камере и системе подачи, соотношения компонентов топливной смеси. При детонации решается проблема борьбы с высокочастотной неустойчивостью, поскольку непрерывная спиновая детонация (НСД) и непрерывная многофронтная детонация (НМД) являются этой неустойчивостью, но уже управляемой.

Данная работа предусматривает реализацию и исследование режимов НСД и НМД химически активных смесей H_2-O_2 , что имеет прямое отношение к перспективе использования детонационного сжигания водорода в ракетном двигателе. В данной работе реализация детонационного сжигания указанных смесей производится в плоскорадиальных камерах (ПРК) с истечением к периферии и к центру. Отличительной особенностью этих камер является то, что расстояние между плоскими стенками намного меньше, чем диаметры этих камер. Выбор этих камер обусловлен тем, что они хорошо вписываются в комплекс ракетного и турбореактивного двигателей, а также камер сгорания ГТУ и ТЭЦ с развитием конструкции в радиальном направлении (в отличие от линейной компоновки двигателей с цилиндрической камерой сгорания). Развиваемое в ПРК тангенциальное течение продуктов за фронтом детонационной волны создаёт продуктам центробежные силы. В камерах с истечением к периферии это способствует сбросу пламени в натекающей свежей смеси и её сохранению для смежной ПДВ или этой же волны при одноволновом режиме. В ПРК с истечением к центру повышается давление в камере и детонационная способность смеси. Эти обстоятельства существенно расширяют пределы детонации по давлениям в камере, как со стороны низких, так и высоких давлений, а также перепада давления на форсунках. Поскольку впрыск горючего происходит в расширяющуюся часть камеры сгорания, то при тех же удельных расходах топлива почти вдвое снижаются давления его подачи по сравнению с классическими жидкостными ракетными двигателями, что гарантирует существенное снижение веса и повышение надёжности турбонасосного агрегата подачи топлива и камеры сгорания. При близких средних давлениях в системе подачи и в камере сгорания создаются условия для работы камеры в режиме эжекции. Организация звукового истечения продуктов из камеры за счёт заужения её проходного сечения на выходе имеет важное значение для уменьшения потерь при повороте потока в осевом направлении (для создания реактивной тяги или подачи продуктов на лопатки турбины¹).

¹ Higashi J., Nakagami S., Matsuoka K., Kasahara J., Matsuo A., Funaki I., Moriai H. experimental study of the disk-shaped rotating detonation turbine engine, 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, (AIAA 2017-1286).

Степень разработанности темы исследования. Изучение детонации было начато Маляром, Ле-Шателье, Бертелло, Вьей, Михельсоном, Гюгио, Чепменом и Жуге. Использование детонации в энергетических установках в режиме пульсирующей детонации (ПД) впервые предложено Я.Б. Зельдовичем, а возможность реализации НСД впервые показана Б.В. Войцеховским в 1959 году.

Исследования детонации в плоских кольцевых камерах были продолжены Михайловым, Топчианом и Васильевым. В настоящее время исследованием НСД в ПРК успешно занимаются Nakagami, Higashi, Matsuoka, Kasahara, установившие турбину в выходной части ПРК, в то время как большее количество экспериментаторов – Фролов, Иванов, Wolanski, Hishida, Fujivara, Wang – использует цилиндрическую камеру сгорания. Однако именно ПРК позволяет сжигать широкий спектр видов топлив, начиная от синтез-газа и заканчивая угольной пылью. Попытки установки двигателей на НСД на ракетную технику имеют успешные примеры реализации под руководством Kasahara (на смеси $\text{CH}_4\text{-O}_2$) и Wolanski (закаись азот–пропан), а также проведены успешные стендовые испытания макета ракетного двигателя в АО «НПО Энергомаш».

Цели и задачи исследования. Цель – обоснование возможности реализации НСД в ПРК по результатам экспериментальных исследований, выявление факторов, влияющих на стабильность детонации, на переход из НСД в НМД и ПД, проверка масштабного эффекта, определение пределов существования НСД, реализация режима эжекции окислителя.

Для достижения поставленной цели сформулированы основные задачи:

- экспериментальная реализация режимов НСД для смеси $\text{H}_2\text{-O}_2$ в ПРК с истечением как к центру, так и к периферии;
- сравнение режимов НСД в ПРК и определение влияния таких факторов, как расходы смеси $\text{H}_2\text{-O}_2$, противодавления, характера подачи H_2 и O_2 , их соотношения, длины и площади выходного сечения канала, диаметра камеры сгорания, направления истечения продуктов (проверка влияния центробежных сил), на скорость и количество детонационных волн, стабильность детонации, условия взаимоперехода из непрерывной детонации в многофронтную и пульсирующую, влияние коэффициента избытка горючего на параметры детонации;
- сравнение основных параметров детонации (в том числе удельного импульса) с результатами численного моделирования;
- выбор оптимальной формы форсунки и щели подачи кислорода, допускающей существование эжекции окислителя; оценка влияния конической вставки в ПРК, уменьшающей площадь канала на выходе из камеры на качество детонации; выяснение характера расширения области существования НСД (по расходам) в зависимости от ширины канала и его выходной площади; определение влияния ширины канала и его выходной площади на ширину области существования НСД (по расходам);
- определение влияния давления в камере на характер истечения H_2 и O_2 из форсунок.

Научная новизна.

1. Разработаны камеры сгорания, в которых возможно осуществление детонационного сжигания газообразной смеси H_2-O_2 . Определена оптимальная геометрия камер сгорания для реализации детонационных режимов сжигания этих смесей.

2. Впервые при отдельной подаче компонентов H_2 и O_2 осуществлено непрерывное детонационное сжигание в ПРК с истечением к центру и периферии в поперечных детонационных волнах (ПДВ) в режимах НСД и непрерывной многофронтной детонации (НМД). Определены характерные признаки и области существования детонационных режимов. Произведены оценки основных параметров течения в окрестности ПДВ, определены критерии существования детонационных режимов.

3. Эксперименты показали, что в ПРК с истечением к периферии масштабный эффект проявляется лишь по количеству вращающихся волн. Их скорость возрастает с увеличением размера камеры сгорания из-за снижения влияния центробежных сил, действующих на продукты и уменьшающих давление за фронтом детонации.

4. Впервые реализована НСД в ПРК с истечением к периферии в режиме эжекции окислителя при атмосферном давлении.

5. Создан программно-аппаратный комплекс, включающий в себя быстродействующий образец фотокамеры, позволяющий регистрировать детонационные режимы на уровне современных высокоскоростных видеокамер, а также программное обеспечение, позволяющее по полученным кадрам строить линейную развертку течения в системе волны и восстанавливать кольцевую развертку, соответствующую реальному течению в плоскости камеры.

Поскольку параллельно с экспериментальными исследованиями в коллективе были разработаны математические модели НСД в ПРК с истечением к центру и к периферии, было проведено сравнение при одинаковых удельных расходах топливной смеси и стехиометрическом соотношении компонентов. По некоторым параметрам детонации (число волн) совпадение было полным, другие параметры (высота фронта) отличались в два-три раза. Сделаны выводы о причинах этих отклонений.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Исследования детонационного сжигания в ПРК создают базу для использования детонационного горения в ракетных, турбореактивных и проточных двигателях аэрокосмических установок, а также стационарных энергетических установок благодаря более выгодному термодинамическому циклу сжигания топлива, особой формы камер, развитой в радиальном направлении (в отличие от линейной компоновки для цилиндрических камер сгорания). Уменьшение давления в системе подачи (в случае эжекции – до атмосферного) при тех же расходах топлива позволит понизить вес двигательной установки. Возможность работы ПРК с истечением к периферии в режиме эжекции окислителя позволяет создавать энергоустановки без необходимости использования компрессора для окислителя (воздуха). Волна разрежения за

вращающейся детонационной волной является насосом, всасывающим окислитель в камеру сгорания.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий автоматизировать процесс обработки видеoinформации и обеспечить большее разрешение видеосъемки в контролируемой области, в том числе, осуществить сшивку элементов кадра в одно изображение, позволяющее выявить как направление вращения волн, так и их количество.

3. Разработано программное обеспечение для сбора информации с датчиков давления, позволяющее сократить временные затраты на перенос данных с измерительного устройства на персональный компьютер. Разработанное программное обеспечение было поставлено и проверено в АО «НПО Энергомаш» им. Академика В.П. Глушко при испытаниях макета ракетного двигателя на спиновой детонации по программе «Ифрит». Проведена регистрация авторских прав в ФИПС и получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Связь с программами и грантами. Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям развития науки и техники в Российской Федерации: «Транспортные и космические системы», «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

Диссертация выполнена в рамках Программ НИР и грантов: грант Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2020-806 от 29.09.2020 (исполнитель); УМНИК на СТАРТ 2012, договор № 10032р/17057 от 01.02.2012 (руководитель); СТАРТ-14-2, договор № 96ГС2/17057 от 11.12.2014 (руководитель); грант РФФИ № 18-41-540001 (исполнитель).

Методы исследований.

1. Варьирование геометрии ПРК в целях достижения устойчивого детонационного горения и определения факторов, влияющих на стабильность детонации.

2. Определение текущих расходов газообразных компонентов топлива по уменьшению давления в ресиверах конечного объёма.

3. Определение силы тяги и удельного импульса по измеренным давлениям (полного и статического) на выходе из камеры.

4. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования параметров детонационных режимов НСД в камерах плоскорадиальной геометрии.

5. Оптическая регистрация детонационных волн и течения в их окрестности через смотровые окна, расположенные по диаметру камеры проводится тремя различными способами: видеосъемкой на высокоскоростную цифровую видеокамеру с частотой кадров 420000–775000 к/с, на пленочный фоторегистратор с падающим барабаном и на специально разработанный прибор. Таким образом, производилось создание нестандартной современной экспериментальной аппаратуры, регистрирующей процессы в камере сгорания, в частности разработка и изготовление специали-

зированной прибора для видеорегистрации детонационных волн, сопоставление результатов регистрации процесса вышеупомянутыми приборами.

6. Разработка программного обеспечения (ПО) для обработки экспериментальных данных, позволившая провести анализ результатов эксперимента:

а) сшивка строк изображений в целостную картину течений в КС в системе волны;

б) определение направления вращения ДВ;

в) восстановление картины течений в цилиндрической системе координат;

г) преобразование данных, регистрируемых датчиками давления.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные методики по измерению давлений, расходов, оптической регистрации детонационных волн и течения в их окрестности, позволяющие определять количество ДВ, высоту фронта и расстояние между ними, учитывающие теплоемкость газов при расчете основных параметров.

2. Сформулированная физическая модель и различные сценарии развития процесса детонации: НСД, НМД и ПД, в зависимости от геометрии камеры сгорания; экспериментально определенные границы режимов НСД и НМД смеси H_2-O_2 в плоскорадиальных камерах сгорания с истечением как к центру, так и к периферии, влияние коэффициента избытка горючего на параметры детонации.

3. Установленная экспериментально роль противодействия, в частности, возникающего при истечении продуктов в замкнутый объем, доминирующее влияние газодинамики процесса на переход из НСД в НМД.

4. Установленное экспериментально влияние диаметра выходного отверстия на количество детонационных волн в КС, вклад геометрии камеры и наличия конусной вставки в снижение минимального расхода топливной смеси, необходимого для существования НСД в режиме эжекции окислителя. Экспериментально показанное положительное влияние спиновых детонационных волн на эжекцию окислителя; зависимость параметров детонации от масштаба ПРК. Результаты сравнения характерного размера фронта детонационной волны с размерами камеры.

5. Разработанное программное средство, позволяющее по кадрам высокоскоростной видеокамеры восстанавливать картину течений в ПРК в системе волны, определять направление движения волн, контролировать отсутствие пульсирующих режимов и осуществлять преобразование картины течений из линейной развертки на плоскость в цилиндрическую систему координат, соответствующую форме ПРК.

6. Результаты по определению структуры детонационных волн, изученной при использовании разработанного ПО, а также их скорости, направления вращения и чётности, определяемой по времени прохождения ПДВ против окон камеры.

7. Результаты сопоставления экспериментальных данных с результатами численного моделирования режимов НСД в камерах плоскорадиальной геометрии.

Степень достоверности результатов обоснована:

- большим объемом информации, зарегистрированной на многочисленных фоторегистрограммах, осциллограммах давлений, вычисленных расходов;
- теоретическим и экспериментальным согласованием характера детонации, а также сопоставлением результатов с теоретически допустимой скоростью Чепмена-Жуге для смеси H_2-O_2 ;
- сопоставлением и согласованием результатов, полученных при помощи пленочного фоторегистратора, серийной высокоскоростной видеокамерой и специально разработанной видеокамерой;
- сопоставлением с теоретическими расчетами, проведенными для предложенной геометрии КС;
- сравнением с экспериментальными результатами для ПРК, описанными в отечественных и зарубежных работах;
- воспроизводимостью результатов при повторении экспериментов с идентичными начальными условиями.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на следующих семинарах и научных конференциях: 13-й Международный коллоквиум по импульсной и непрерывной детонации ICPCD-2022, г. Санкт-Петербург, 18–21 апреля 2022 г.; X международная конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике», г. Новосибирск, 7–11 сентября 2020 г.; XVI Всероссийский семинар с международным участием «Динамика Многофазных Сред», г. Новосибирск, 30 сентября–5 октября 2019 г.; XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Уфа, 19–24 августа 2019 г.; 27-ая международная конференция ICDERS, г. Пекин, Китай, 28 июля–2 августа 2019 г.; Всероссийская конференция «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения», г. Новосибирск, 18–21 сентября 2018 г.; III Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика», г. Ялта, 10–16 сентября 2018 г.; VI Международный молодежный Форум «Инженерия для освоения космоса», г. Томск, 26–28 апреля 2018 г.; Международная конференция «Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва», г. Новосибирск, 4–8 сентября 2017 г.; VII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики», г. Томск, 18–22 сентября 2017 г.; XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Казань, 20–24 августа 2015 г.; VIII Международная конференция «Лаврентьевские чтения по Математике, Механике и Физике», г. Новосибирск, 7–11 сентября 2015 г.; 11-ая Международная конференция «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии», г. Самара, 23–28 сентября 2013 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные

научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, из них 7 в журналах, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора. Соискателем проведены:

- постановки задач;
- постановки экспериментов;
- обработка и анализ экспериментальных результатов;
- проверка соответствия экспериментального оборудования поставленной задаче;
- сопоставление результатов эксперимента с данными, определенными по расчетной модели.

Соискателем разработаны:

- экспериментальная установка, проведена её сборка;
- методика восстановления картины течений в ПРК, волн НСД и НМД;
- программно-аппаратный комплекс для видеосъемки детонационных волн, включающий специальный прибор (видеокамеру) и программы для: обработки и разбивки по каналам данных, зарегистрированных датчиками; преобразования кадров, полученных в результате видеосъемки в системе волны; определения направления вращения ПДВ и их количества; преобразования линейной развёртки ПДВ в кольцевую в плоскости ПРК.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 95 наименований, общий объем диссертационной работы составляет 104 страницы, включая 52 рисунка и 13 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются экспериментальная установка, варианты плоскорадиальных камер сгорания (рис. 1) с истечением, как в стороны, так и к периферии, базовые принципы и методы обработки экспериментальных результатов, в том числе определение количества и скорости ДВ, вычисление расходов и соотношения компонентов смеси H_2-O_2 . На рис. 1(a) изображена КС с истечением к центру с подачей топлива и окислителя от периферии. На рис. 1(б)–рис. 1(г) изображены КС с истечением к периферии. В табл. 1 приведены диаметры камер и выходного отверстия, площади каналов на входе и на выходе из камеры сгорания.

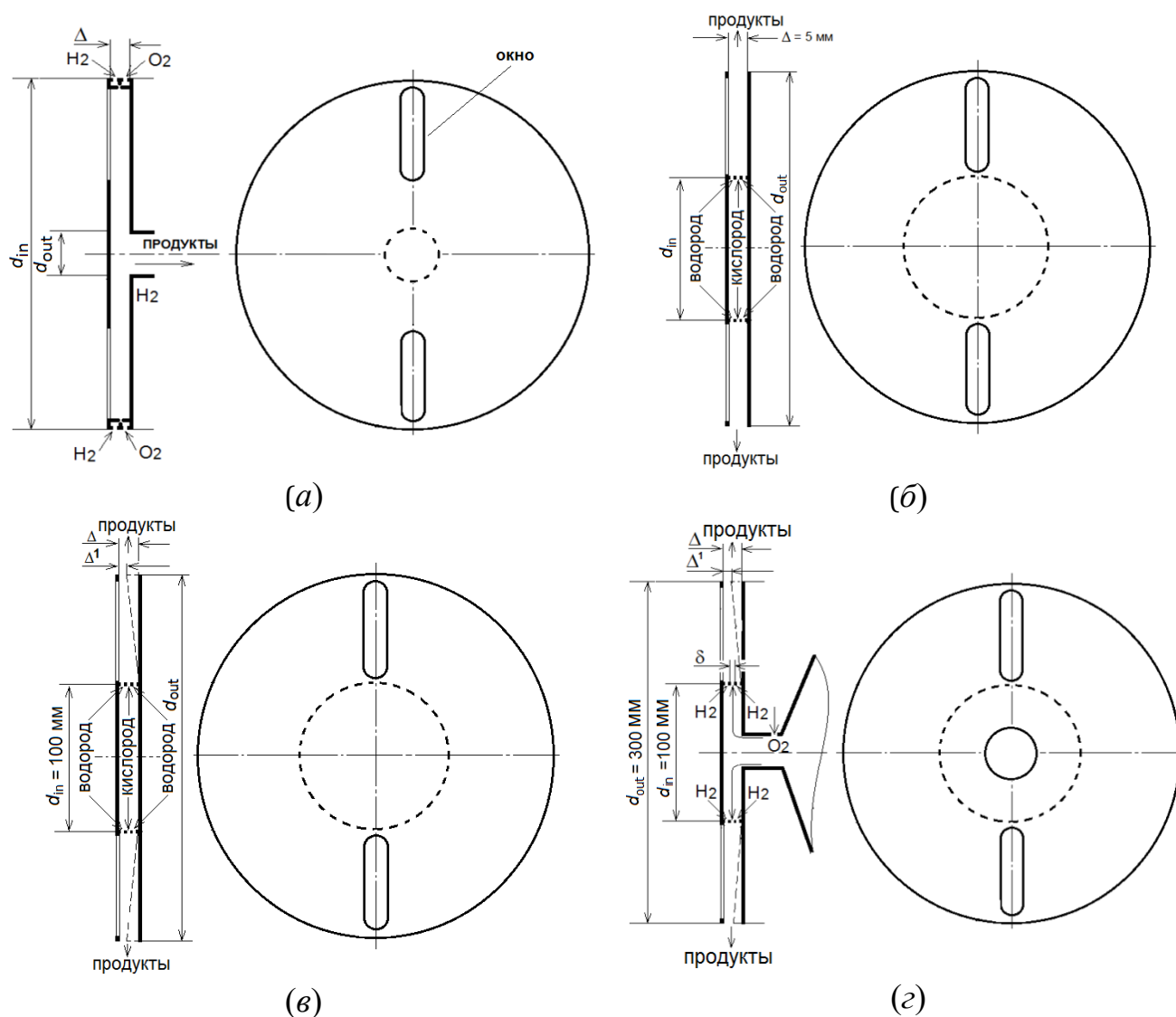


Рисунок 1 – Камеры сгорания, используемые при проведении экспериментов

Таблица 1 – Основные геометрические параметры камер сгорания

	d_{in} , мм	d_{out} , мм	Δ , мм	Δ^1 , мм	S_f , мм ²	S_{ox} , мм ²	$S_{Out\Delta}$, см ²	$S_{In\Delta}$, см ²
а)	80	40, 30, 20	5	–	10	32	–	12,57
б)	20	40, 60, 80	5	–	5	12	–	3,14
		80	2,5	–	5	12	–	1,57
		80	12	–	5	12	–	7,54
в)	100	120, 150, 200, 300	5	–	34,2	60,8	–	15,7
		300	10	3,3	34,2	60,8	31,1	31,4
г)	100	300	7	–	–	628	65,94	22
			12	–	–	628	113,04	37,7
			12	5,3	–	628	50	37,7

Камеры на рис. 1(в) и рис. 1(г) допускают установку конусной вставки, уменьшающей площадь выходного отверстия. Помимо этого, последняя КС отличается способом подачи окислителя – в центре камеры имеется отверстие, сообщающееся с усеченным баллоном, в котором поддерживается высокая концентрация кислорода при атмосферном давлении за счет его подачи вблизи входа в камеру.

Приведено описание разработанного программного обеспечения для восстановления картины детонационных течений в камере сгорания, основных формул и приближений, используемых для определения скорости волн, расходов компонентов смеси H_2-O_2 .

Предложены способы оптимизации архитектуры прибора для высокоскоростной видеосъемки путём сокращения количества задействованных строк до одной. Сравняется результат видеосъемки инициирования ПДВ разработанным прибором и видеокамерой Photron SA5. Сделан вывод, что разработанное устройство пригодно для видеосъемки детонационных волн, при этом его преимуществами являются:

возможность записывать в течение длительного промежутка времени (до 10 с), большая длина строки при сравнимой кадровой частоте (1092 против 512 ячеек) и способность работать в помещении с повышенной температурой окружающего воздуха, малая стоимость. Устройство основано на сенсорах, разработанных российскими учеными и обладающими параметрами на уровне лучших мировых разработок. Однако на настоящий момент требуется его доработка, в частности, фильтрация постоянной составляющей шумов.

Во второй главе приведены результаты экспериментов по реализации в смеси H_2-O_2 режимов НСД для ПРК диаметром $d_{in} = 80$ мм с истечением к центру при варьировании диаметра выхода d_{out} и противодавления p_t .

Произведено сравнение методов оптической регистрации ДВ при помощи пленочного фоторегистратора и высокоскоростной видеокамеры. Реконструированы изображения детонационных волн и течений в их окрестности как в момент формирования (рис. 2), так и их изменение за время развития процесса. Исходными данными послужили кадры, зарегистрированные высокоскоростной видеокамерой.

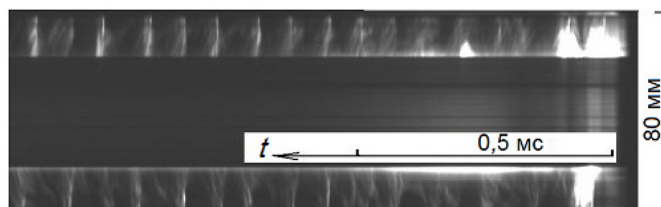


Рисунок 2 – Фоторегистрограмма инициирования НСД в камере с $d_{out} = 40$ мм

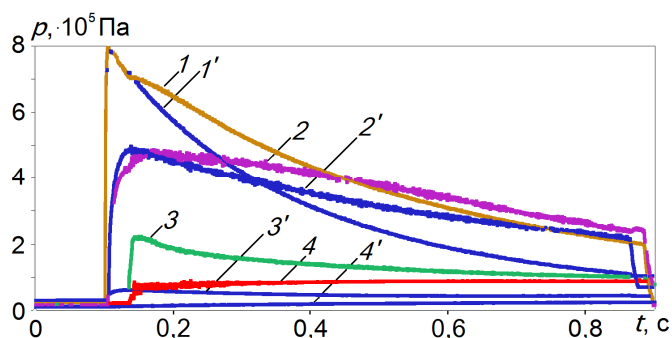


Рисунок 3 – Давления в системе подачи компонентов смеси в коллекторе (p_{mf} и p_{max}), в камере (p_{c1}) и в ёмкости (p_t) при холостом выстреле ($1' - 4'$) и НСД ($1 - 4$)

Восстановленное изображение сопоставлено с проявленным снимком с фоторегистратора с падающим барабаном². Показано, что метод склейки одноимённых пикселей последующих кадров позволяет реконструировать поперечные детонационные волны (ПДВ) и течение в их окрестности в системе волны.

Экспериментально показана пригодность метода и разработанного программного обеспечения для определения направления вращения детонационных волн по двум строкам одного кадра.

Установлено, в процессе проведения экспериментов, достаточно сильное влияние процессов в камере на систему подачи смесевых компонентов, особенно водорода. На рис. 3 позицией 1 обозначен график давления в коллекторе p_{mf} в эксперименте, а 1' – при холостом выстреле (аналогично 2 и 2' – p_{max} ; 3 и 3' – p_{cl} ; 4 и 4' – p_t). Средний расход водорода в эксперименте с холостым выстрелом оказался на 13 % выше, чем при НСД.

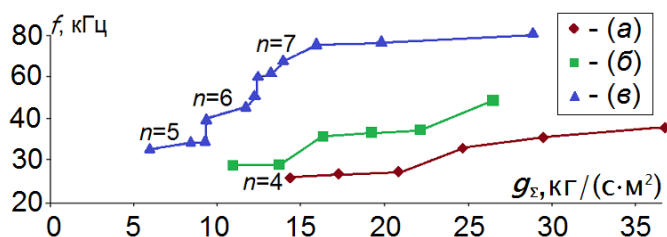


Рисунок 4 – Частота вращающихся ПДВ f (кГц) в зависимости от удельного расхода смеси H_2-O_2 g_{Σ} (кг/(с·м²)) для камер $d_{out} = 40$ мм (а), 30 мм (б), 20 мм (в)

Построена зависимость частоты f вращающихся ПДВ от удельного расхода смеси g_{Σ} для трех значений внутреннего диаметра камеры $d_{out} = 40$ мм (а), 30 мм (б) и 20 мм (в) (рис. 4). Измерена высота фронта ПДВ, составляющая для камеры (а) ~6 мм, (б) ~4 мм и (в) ~3 мм.

На основании экспериментальных результатов построена зависимость количества волн от диаметра выходного отверстия в камере 40, 30 или 20 мм и противодавления. При уменьшении выходного

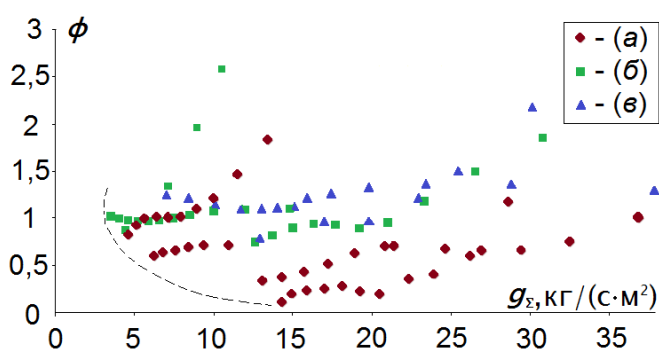


Рисунок 5 – Область режимов НСД смеси H_2-O_2 в ПРК ($d_{in} = 80$ мм, $\Delta = 5$ мм) с истечением к центру $d_{out} = 40$ мм (а), 30 мм (б), 20 мм (в)

сечения камеры или возрастании противодавления до 1 атм среднее число детонационных волн растет с 4–5 до 6–7 волн, а их интенсивность убывает.

Реализованы режимы непрерывной спиновой детонации смеси H_2-O_2 в камере данной геометрии при достаточно низких значениях удельного расхода и коэффициента избытка горючего: $g_{\Sigma} \geq 3,6$ кг/(с·м²) и $\phi \geq 0,1$. Построена область реализованных режимов детонации в зависимости от этих параметров. Нижние значения g_{Σ} и

ϕ ориентировочно ограничены пунктирной линией на рис. 5.

² Быковский Ф.А. Высокоскоростной ждущий фоторегистратор // Журн. науч. и прикл. фотографии и кинематографии. – 1981. – № 2. – С. 85–89.

Сделан вывод о ключевом влиянии потерь импульса из-за искривления детонационного фронта на искажение структуры детонационных волн на фоторегистрограммах. Определено время, необходимое для формирования стабильной детонационной волны, составляющее 550 мкс.

Установлено совпадение числа волн по окружности камеры в эксперименте с расчетным, однако высота фронта отличается и составляет $h = 2$ мм, против экспериментальной для такой же геометрии 6 мм. Расчетная скорость движения ПДВ превышает экспериментальную на 5 % ($D = 2,54$ против 2,415 км/с).

На основании восстановленных фоторегистрограмм построена физическая модель процесса: структура ПДВ и течение в её окрестности для ПРК с истечением к центру (рис. 6). В плоскорадиальных камерах исходные компоненты окислителя и горючего 1 рис. 6 разделяются в кольцевую камеру 2 через ряд равномерно расположенных вдоль цилиндрической поверхности камеры отверстий. На некотором расстоянии от цилиндрической поверхности происходит перемешивание компонентов и по образующей смеси 3 перпендикулярно потоку распространяется одна или несколько ПДВ 4. Высота фронта 4 устанавливается близкой к околоскритической для существования детонации. Количество ПДВ определяется химической активностью и степенью перемешивания компонентов, а также диаметром камеры. Оно возрастает с увеличением этих параметров (на рис. 6 изображены две ПДВ). За фронтом ПДВ в волне разрежения, примыкающей к поверхности Чепмена-Жуге, непрерывно происходит заполнение камеры свежими компонентами, по смеси которых распространяется смежная ПДВ или эта же волна при одноволновом режиме. К детонационному фронту примыкает шлейф 7 – косая ударная волна, образующаяся при обтекании продуктами 5 зоны повышенного давления за фронтом 4. Продукты детонации выбрасываются из центрального отверстия 9 в камере. Возможен также заброс продуктов 8 в систему подачи из зоны повышенного давления за фронтом. Продукты детонации отделены от зоны смесеобразования 3 контактным разрывом 6, который в общем случае трансформируется во фронт горения.

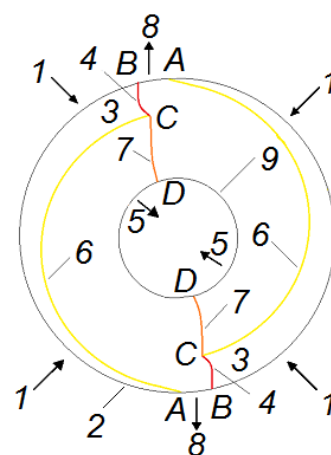


Рисунок 6 – Структура ПДВ и течение в их окрестности для ПРК с истечением к центру

Вычислен удельный импульс для продуктов на выходе из камеры по измеренным статическому и полному давлениям. Определен чистый удельный импульс по отношению разности между силой тяги горячих продуктов и холодной смеси при холостом выстреле к расходу смеси, составляющий 262,4 с для камеры с $d_{\text{out}} = 40$ мм и понижающийся до 132,8 с для камеры с $d_{\text{out}} = 20$ мм.

В третьей главе представлены результаты экспериментов в ПРК с истечением к периферии.

В разделе 3.1 приведена серия экспериментов в камере сгорания с внутренним диаметром $d_{in} = 20$ мм, в которой были осуществлены режимы НСД, пульсирующей детонации (ПД) вдоль радиуса камеры, а также горения смеси H_2-O_2 .

В камере варьировалось расстояние между стенками КС, наружный диаметр и величина противодавления. Начальные расходы изменялись в пределах: водорода 4,7–29,6 г/с, кислорода 22–80 г/с, и за время эксперимента (около 0,9 с) уменьшались в 4 и 2 раза, соответственно.

Определен коэффициент избытка горючего во время опыта в разных экспериментах для значений $\Delta = 2,5-12$ мм, лежавший в пределах $\phi = 0,7-4,0$.

Экспериментально показано, что для каждой геометрии камеры сгорания НСД и

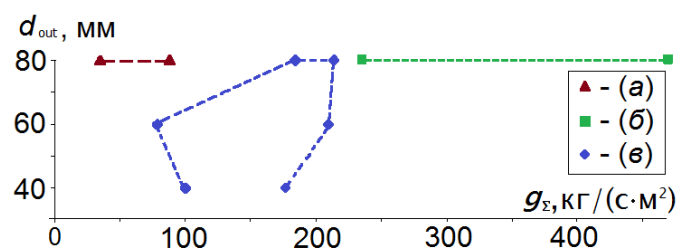


Рисунок 7 – Область реализованной НСД

в исследованных камерах:

$\Delta = 5$ мм (а), $\Delta = 2,5$ мм (б), $\Delta = 12$ мм (в)

ПД имеют пределы существования по удельному расходу смеси. Так для существования НСД необходима величина порядка 361–140 кг/(с·м²), в то время как ПД превалирует в камере при больших и при меньших расходах.

Представлена область существования НСД в координатах (g_{Σ} , d_{out}) согласно проведенным

экспериментам в камерах сгорания с расстоянием между стенками $\Delta = 12$ мм, 5 мм и 2,5 мм (рис. 7). Наиболее полная информация имеется для зазора $\Delta = 5$ мм, который устанавливался во всех камерах.

Экспериментально показано, что наиболее широкие пределы существования НСД удалось реализовать для зазора $\Delta = 2,5$ мм. В наиболее узких пределах по g_{Σ} существовала детонация при $\Delta = 12$ мм.

Установлено, что при $\Delta = 5$ мм НСД в наиболее широком диапазоне по g_{Σ} существовала в камере с $d_{out} = 60$ мм. При $d_{out} = 40$ мм и при $d_{out} = 80$ мм имеют место неустойчивые режимы при повышенных расходах смеси в более узком диапазоне.

Констатирована достаточно низкая скорость волн при НСД относительно внутреннего диаметра камеры, составившая $D = 1295-640$ м/с.

По результатам экспериментального исследования структуры детонационных волн определена высота детонационного фронта, составляющая 10 мм в части экспериментов, изучены детали течений в окрестности фронта ПДВ, их влияние на систему подачи компонентов. Высота фронта в части экспериментов с $\Delta = 5$ мм при $d_{out} = 40$ мм превышала внутреннюю часть радиуса камеры, вследствие чего часть ПДВ выходила за пределы камеры, что незначительно влияло на качество детонации.

Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования показало, что совпадает лишь количество ПДВ по окружности камеры – $n = 1$. В эксперименте скорость детонации и давление в камере на расстоянии 2 мм от цилиндрической поверхности примерно вдвое меньше, чем представлено в расчёте $D = 1,11$ км/с и $p_{c1} \approx 1 \cdot 10^5$ Па. Высота фронта $h \approx 8$ мм в расчёте не превышает внутреннюю часть радиуса камеры, в отличие от высоты в эксперименте. Эти расхождения можно объяснить влиянием процессов перемешивания, которые неизбежны при отдельной подаче компонентов смеси в камеру сгорания и которые не были учтены в расчетной модели.

На основании фоторегистрограмм детонационных режимов построены физические модели процессов, отмечены их параметры, влияющие на качество детонации.

На рис. 8 схематически изображена структура волн и течения в их окрестности в режимах НСД в КС с истечением к периферии. Позиции на схеме соответствуют приведённым на рис. 6. Важным отличием от ПРК с истечением к центру является отклонение шлейфа детонационной волны назад.

На рис. 9 схематично построена структура волн ПД, где обозначены вектор скорости 1 волны ПД, изменяющийся на противоположный при отражении от стенки, направление подачи компонентов топливной смеси 2 и направление истечения продуктов 3 .

В разделе 3.2 приведен анализ серии экспериментов с ПРК с внутренним диаметром $d_{in} = 100$ мм и варьируемым наружным диаметром $d_{out} = 120–300$ мм. Целью ставилась проверка поведения волн НСД в зависимости от увеличения диаметра КС (масштабный эффект). Также проверялось влияние сужающейся геометрии канала на качество детонации.

Предложен метод определения наличия сталкивающихся волн и разработанное программное обеспечение, позволяющее зафиксировать трек движущейся частицы или детонационной волны, не повторяя эксперимент и не поворачивая при этом видеокамеру на 90 градусов (как делалось ранее).

Экспериментально реализованы режимы НСД и НМД в плоскорадиальной камере внутренним диаметром 100 мм с истечением к периферии для смеси H_2-O_2 (причём, в последнем случае – впервые).

Определены нижние пределы существования режимов непрерывной детонации по удельному расходу смеси для каждой из описанных геометрий камер сгорания.

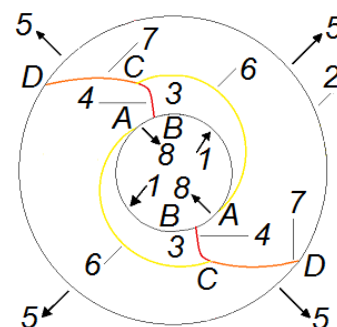


Рисунок 8 – Структура ПДВ и течение в их окрестности для ПРК с истечением к периферии

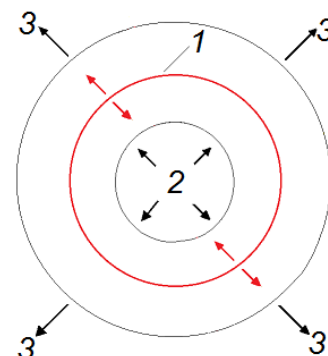


Рисунок 9 – Схематическое обозначение движения волн ПД

В случае $\Delta = 10$ мм:

Впервые реализован режим НМД в ПРК с шириной зазора $\Delta = 10$ мм при детонационном сжигании смеси $\text{H}_2\text{-O}_2$. Наблюдалась НМД независимо от диаметра в камерах сгорания без конусной вставки. Переход от НМД к НСД происходил при удельных расходах менее 110 ± 5 кг/(с·м²) и менее 163 кг/(с·м²) для случая с конусной вставкой. НСД прекращается при удельном расходе смеси ниже 43 кг/(с·м²).

В ПРК с внешним диаметром 300 мм линии тока продуктов многократно (4–5 раз) проходят через шлейфы детонационных волн, что повышает энтропию продуктов. По этой причине сделан вывод о целесообразности уменьшения длины ПРК без особого изменения детонационного процесса.

В случае с $\Delta = 5$ мм:

Установлено, что камера с расстоянием между стенками 5 мм лучше проявила себя для реализации НСД, поскольку при всех изменениях удельного расхода смеси $\text{H}_2\text{-O}_2$ были реализованы режимы НСД. Для всех вариантов Δ и диаметров ПРК не наблюдали ПД вдоль радиуса.

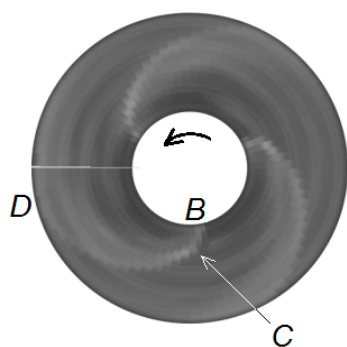


Рисунок 10 –
Реконструкция ПДВ и
течений в ее
окрестности в
плоскости ПРК в
системе волны

Определена высота фронта ПДВ, которая составляет $h \approx 10$ мм, а $h/l \approx 1/3$, где l – расстояние между смежными ПДВ. Для НСД проведена реконструкция поперечных детонационных волн и течения в их окрестности в плоскости камеры (рис. 10). Детонационная волна сильно искривлена вследствие возрастания тангенциальной составляющей скорости вдоль радиуса камеры.

Установлено увеличение высоты фронта ПДВ до $h \approx 15$ мм, а также уменьшение числа волн до трёх – четырёх, при скорости $D = 2,0 \pm 0,2$ км/с с уменьшением общего удельного расхода во время эксперимента. При этом отношение h/l уменьшилось до $1/7$. В ПРК с $d_{\text{out}} = 120$ мм фронт ПДВ занимал всю длину кольцевого канала вдоль радиуса. В ПРК с $d_{\text{out}} = 150$ и 200 мм при уменьшении числа волн фронт ПДВ не выходил за пределы камеры. Поскольку измеренная величина h лишь проекция кривого фронта ВС на радиус камеры, с уменьшением числа волн она всё больше будет отличаться от истинного размера фронта ВС. Этим обстоятельством можно объяснить непостоянство отношения h/l и его уменьшение с сокращением числа ПДВ.

По результатам экспериментального исследования установлено, что масштабный эффект в ПРК различных размеров по количеству ПДВ и их скорости наблюдается частично, в отличие от кольцевых цилиндрических камер с расширением канала³. Так, например, в ПРК $d_{in} = 20$ мм, длиной канала 10 мм и удельном расходе $g_{\Sigma} = 132$ кг/(с·м²) была реализована одна волна, вращающаяся относительно внутреннего диаметра d_{in} со скоростью $D = 1,11$ км/с. В данной работе в ПРК с $d_{in} = 100$ мм, длиной канала 10 мм и $g_{\Sigma} = 132$ кг/(с·м²) было реализовано пять волн, вращающихся относительно внутреннего диаметра d_{in} со скоростью $D = 1,75$ км/с. По количеству волн масштабный эффект существует, однако скорости ПДВ существенно различаются – в ПРК большего диаметра скорость детонации выше на 37 %. Это можно объяснить тем, что в ПРК с $d_{in} = 20$ мм происходит более сильная разгрузка давления продуктов за фронтом ПДВ, вызванная воздействием центробежных сил на продукты детонации, что приводит к уменьшению скорости волн.

На рис. 11 представлены зависимости частоты ПДВ при $\Delta = 5$ и НМД при $\Delta = 10$ мм в ПРК $d_{out} = 200$ мм от удельного расхода смеси g_{Σ} . Коэффициент избытка горючего изменялся незначительно $\phi = 0,85-1,08$.

Изложены доказательства ключевой роли газодинамики течения в процессе, поскольку скорости ПДВ во всех режимах находятся в узких пределах $D = 2,0 \pm 0,2$ км/с, а коэффициент избытка горючего $\phi = 1,6-0,5$ – в широком диапазоне изменения. Поэтому влияние скорости химической реакции во фронте детонационной волны не столь значительно.

Установлено соотношение между скоростью волны НСД и скоростью Чепмена-Жуге. Показано, что вследствие центробежных сил, действующих на продукты детонации за фронтом ПДВ, волна НСД замедлена относительно скорости идеальной детонации Чепмена-Жуге на 20–40 %, при этом меньшая величина соответствует бедной по горючему смеси.

В разделе 3.3 рассмотрены результаты экспериментов в ПРК в режиме эжекции кислорода. Конструкция камеры отличается от описанных выше только наличием отверстия в коллекторе кислорода, сообщающимся с окружающей средой. Сделан вывод о ключевой роли центробежных сил, действующих на продукты, а также

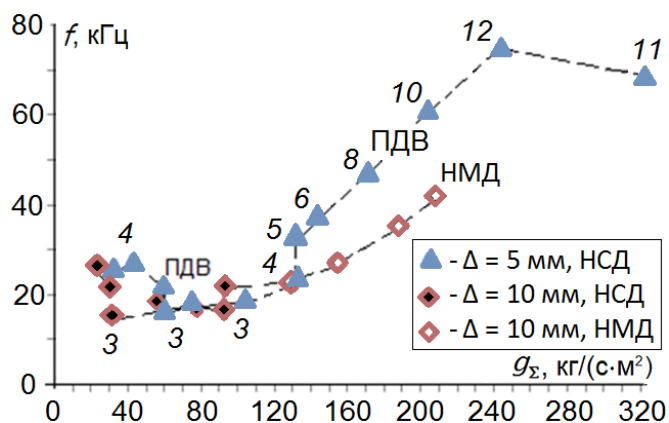


Рисунок 11 – Зависимости частоты ПДВ в ПРК для режимов НСД и НМД: обозначения 3–12 – количество ПДВ

³ Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. – Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН. – 2013. – 423 с.

особенностей истечения продуктов в расширяющемся канале в плоскорадиальной камере на детонационные режимы.

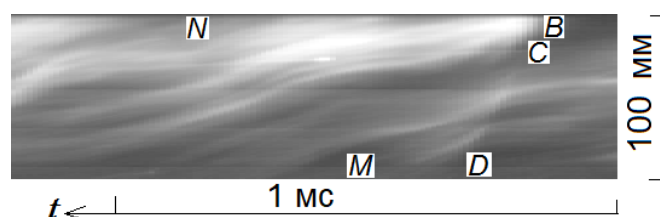


Рисунок 12 – Детонационная волна и структура течения в ее окрестности

В разделе 3.3.1 изучена связь размеров проекции фронта детонационной волны на радиус камеры и длины окружности ПРК. Так для эксперимента с сужающимся каналом фронт является косым, и его проекция составляет величину $h \approx 45$ мм, что составляет примерно 1/7 часть от длины окружности. На рис. 12 приведено изображение детонационной волны, где наиболее отчетливо видна структура фронта и течений в его окрестности.

Установлено, что НСД существует в диапазоне расхода водорода $g_f = 4,17 \rightarrow 2,60$ кг/(с·м²) при скорости $D = 1,30 - 1,43$ км/с.

Определены минимальные расходы H_2 , лежащие в диапазоне $G_f = 9,75 \rightarrow 5,00$ г/с, при которых ПДВ вырождались в акустические. Этому сопутствовало периодическое воспламенение смеси после отражения продольной волны сжатия от торца ПРК. При дальнейшем снижении расходов наблюдались ослабевающие акустические волны на фоне горения.

В разделе 3.3.2 установлена возможность инициирования НСД в ПРК с постоянным зазором $\Delta = 12$ мм. При этом реализуется режим НСД с одной ПДВ ($D = 1,54$ км/с).

Экспериментально показано, что при уменьшении расхода H_2 до 19,5 г/с НСД прекращается и устанавливается режим с двумя слабыми околосвуковыми волнами с отчетливо выраженными светящимися фронтами.

Установлены основные механизмы перехода НСД в горение. При снижении расхода H_2 ниже 11,9 г/с светящиеся фронты, движущиеся в тангенциальном направлении, исчезают, и усиливаются волны сжатия MN, движущиеся в радиальном направлении, воспламеняющие смесь после отражения от торца камеры. С дальнейшим снижением расхода H_2 ниже 2,74 г/с в ПРК установилось обычное горение.

В разделе 3.3.3 установлена возможность существования двухволнового режима НСД в ПРК с постоянным зазором, уменьшенным до $\Delta = 7$ мм, в узком диапазоне расходов водорода, и определены пределы существования НСД.

Экспериментально показано, что снижение расхода H_2 ниже, чем 15,9 г/с, достаточно, чтобы ПДВ выродились в акустические волны.

Приведена оценка, согласно которой при понижении расхода H_2 на порядок в канале устанавливается достаточно однородный режим обычного горения.

Сделан вывод, что существует механизм всасывания наружного газа в ПРК. Объясняется возникновение перепада давления за фронтом НСД на примере ПРК. Экспериментально установлено, что в режиме нестационарной автоколебательной эжекции кислорода детонационная волна выполняет роль насоса, а примыкающая к детонационному фронту волна разрежения – всасывающего поршня.

Проведено сравнение с экспериментальными результатами для кольцевой цилиндрической камеры с расширением канала от $\Delta = 5$ мм под углом $8,5^\circ$, приведенной в работах^{4,5}. Установлено, что скорость детонационных волн в ПРК на 5 % меньше, чем в цилиндрической камере. Сделан вывод о влиянии центробежных сил, действующих на продукты детонации, понижающих давление за фронтом детонационной волны.

Нижний предел существования НСД по удельному расходу водорода для кольцевой цилиндрической камеры (степень расширения канала 3,37) составляет $2 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$. Результаты для ПРК приведены в табл. 2. В случае с заужением канала на выходе область существования НСД приблизилась к показателям для цилиндрической камеры.

В заключении представлены основные результаты и выводы:

1. Впервые реализованы и изучены режимы детонационного сжигания топливной смеси водород-кислород в ПРК с истечением к центру и периферии:

а) режимы НСД и ПД при подаче топливной смеси к центру в ПРК внешним диаметром 80 мм и диаметром выходного отверстия 20, 30, 40 мм.

б) режимы НСД, ПД вдоль радиуса камеры, а также НМД в ПРК с истечением к периферии с внутренними диаметрами 20 и 100 мм, а наружными – 40, 60, 80, 120, 150, 200 и 300 мм и варьируемыми расстояниями между стенками.

2. Установлено, что в ПРК с истечением к центру даже при критическом перепаде давления на форсунках и истечении продуктов в среду с противодействием около 0,1 атм волны сжатия от ПДВ проникают в систему подачи и оказывают влияние на расход газов из ресиверов – снижают расходы компонентов до 13 % по сравнению с холостыми пусками. В экспериментах с противодействием более 1 атм влияние ПДВ на систему подачи выражено в большей степени. Экспериментально установлена зависимость количества волн от диаметра выходного отверстия в

Таблица 2 – Нижние пределы существования НСД в ПРК в режиме эжекции

Δ , мм	12	7	12
угол, °	–	–	3,83
до Δ^1 , мм	–	–	5,3
степень расширения	3	3	1,33
$g_{f,\min}$, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$	5,1	7,23	2,6–4,17

⁴ Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная детонация в режиме нестационарной эжекции окислителя // Докл. Акад. Наук РФ. – 2009. – Т. 424, № 1. – С. 40–42.

⁵ Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная детонация в режиме автоколебательной подачи окислителя. 1. Окислитель – кислород // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 116–124.

камере и противодавления. С уменьшением выходного отверстия и заужением камеры сгорания на выходе число детонационных волн растет, а их интенсивность убывает. Определены частоты вращающихся волн, обнаружена их зависимость от удельного расхода смеси и выходного сечения камеры. Разработана физическая модель процесса, дано объяснение его протекания.

3. Экспериментально показано, что в ПРК с истечением к периферии с длиной канала 50–100 мм без заужения канала при расходах смеси более $105 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ имеет место НМД. При меньших расходах процесс стабилизируется и наблюдается НСД. Выяснено, что на переход из НСД в НМД влияет в большей степени газодинамика процесса, нежели химическая физика во фронте ДВ.

4. Определены пределы и построена область реализованных режимов детонации в координатах «коэффициент избытка горючего – удельный расход смеси». Вычислен удельный импульс ПРК на НСД, сопоставлен с результатами для цилиндрической КС с конусной вставкой. Предложены геометрии камер сгорания, допускающие НСД в наиболее широких диапазонах по расходу смеси $\text{H}_2\text{--O}_2$ (водорода в случае с эжекцией окислителя).

5. По фотоснимкам, зарегистрированным высокоскоростной видеокамерой, реконструированы детонационные волны и течения в их окрестности в системе волны. Проведено сравнение с изображениями проявленных фотопленок с фоторегистратора с падающим барабаном. Показана правомерность преобразования кадров, зарегистрированных высокоскоростной видеокамерой, в течение в системе волны. Определена высота детонационного фронта и расстояние между волнами для камер различных геометрий как с принудительной подачей окислителя, так и в режиме эжекции. По результатам экспериментального исследования структуры детонационных волн установлено, что в ПРК с истечением к периферии ПДВ сильно искривлена вследствие возрастания тангенциальной составляющей скорости вдоль радиуса камеры. Разработана физическая модель процесса, объясняющая его протекание.

6. Для ПРК с истечением к периферии с внутренними диаметрами 20 и 100 мм показано частичное существование масштабного эффекта. Эксперименты показали, что масштабный эффект проявляется лишь по количеству вращающихся волн. Однако их скорость возрастает на 37 % с увеличением размера камеры сгорания в пять раз из-за снижения влияния центробежных сил, действующих на продукты и уменьшающих давление за фронтом детонации.

7. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов показывает, что в камерах с истечением к центру обнаружилось совпадение по числу волн и давлению в камере, однако скорости этих волн в расчётах завышены на 5 %. Это объясняется тем, что в эксперименте существует область перемешивания компонентов, включающая в себя и участок конечного размера возле цилиндрической стенки

недостаточно перемешанной смеси, не способной к детонации. В камерах с истечением к периферии совпадение расчётных и экспериментальных данных существует только по количеству ПДВ. В эксперименте скорость ПДВ относительно внутреннего диаметра камеры на 20–40 % ниже скорости идеальной детонации Чепмена-Жуге, в то время как в расчётах отличие скорости детонации составляет 13 %. Неидеальность детонации связана с процессами перемешивания, вызывающими кривизну фронта и значительной разгрузкой в зоне химика в сторону периферии.

8. В камере плоскорадиальной геометрии проточного типа с истечением к периферии впервые осуществлены режимы сжигания водорода в поперечных (спиновых) детонационных волнах и периодических пульсирующих волнах горения в режиме автоколебательной эжекции окислителя. В этой камере, по сравнению с кольцевой цилиндрической, удалось реализовать непрерывную спиновую детонацию при более высоких значениях удельных расходов водорода. Заужение выходного сечения камеры позволило снизить нижние пределы по этому параметру. Выгодной геометрией является ПРК с истечением в стороны и заужением канала, обеспечивающая степень расширения 1,33. При принудительной подаче окислителя также наблюдается положительное влияние сужающейся геометрии каналов на качество процесса.

9. Создан программно-аппаратный комплекс, испытания которого показали его пригодность для использования в исследованиях НСД. Отмечен ряд положительных отличий от серийных образцов, таких как малая рассеиваемая мощность, на 33 % более продолжительное время видеофиксации (по сравнению с Photron SA1.1 675К-М3) при одинаковой длине строки и лучшее разрешение при использовании одной строки сенсора (1092 против 512 ячеек) при схожей кадровой частоте. Важно, что прибор основывается на сенсоре, разработанном российскими учеными. Входящее в состав комплекса программное обеспечение ускоряет обработку экспериментальных данных, определение скорости, направления вращения детонационных волн и характера детонации, восстановление картины течений в ПРК и преобразование ее между системами координат.

Таким образом, на примере моделей плоскорадиальных камер сгорания показана принципиальная возможность реализации детонационного горения топливных смесей в практических приложениях, в том числе в аэрокосмической технике и стационарных энергетических установках.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science

1. Samsonov, A. N. A device for high-speed video filming of supersonic flows and moving particles / A. N. Samsonov // **Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications**. – 2015. – Vol. 25, No. 2. – P. 255–262.

2. Выковский, Ф. А. Effect of combustor geometry on continuous spin detonation in syngas–air mixtures / F. A. Выковский, S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. N. Samsonov // **Combustion, Explosion, and Shock Waves**. – 2015. – Vol. 51, No. 6. – P. 688–699. (Быковский, Ф. А. Влияние геометрии камеры на реализацию непрерывной спиновой детонации смесей синтез-газ – воздух / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников, А. Н. Самсонов // **Физика горения и взрыва**. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 72–84).

3. Выковский, Ф. А. Detonation combustion of a hydrogen–oxygen mixture in a plane–radial combustor with exhaustion toward the center / F. A. Выковский, S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. N. Samsonov, A. S. Zintsova // **Combustion, Explosion, and Shock Waves**. – 2016. – Vol. 52, No. 4. – P. 446–456. (Быковский, Ф. А. Детонационное сжигание смеси водород-кислород в плоскорадиальной камере с истечением к центру / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников, А. Н. Самсонов, А. С. Зинцова // **Физика горения и взрыва**. – 2016. – Т. 52, №4. – С. 82–93).

4. Выковский, Ф. А. Pressure measurement by fast-response piezo-electric sensors during continuous spin detonation in the combustor / F. A. Выковский, S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. N. Samsonov, A. I. Sychev, A. E. Tarnaikin // **Combustion, Explosion, and Shock Waves**. – 2017. – Vol. 53, No. 1. – P. 65–73 (Быковский, Ф. А. Измерение давления в камере сгорания малоинерционными пьезодатчиками при непрерывной спиновой детонации / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников, А. Н. Самсонов, А. И. Сычев, А. Е. Тарнайкин // **Физика горения и взрыва**. – 2017. – Т. 53, №1. – С. 75–83).

5. Popov, E. L. MHD effects in continuous spin detonation / E. L. Popov, A. N. Samsonov, F. A. Выковский, E. F. Vedernikov // **Doklady Physics**. – 2019. – Vol. 64, No. 2. – P. 77–79. (Попов, Е. Л. МГД-эффекты при непрерывной спиновой детонации / Е. Л. Попов, А. Н. Самсонов, Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников // **Доклады Академии Наук**. – 2019. – Т. 484, № 5. – С. 550–553).

6. Выковский, Ф. А. Continuous detonation of a mixture of gaseous hydrogen and liquid oxygen in a plane–radial combustor with exhaustion toward the periphery / F. A. Выковский, S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. N. Samsonov, E. L. Popov // **Combustion, Explosion, and Shock Waves**. – 2020. – Vol. 56, No. 6. – P. 682–690. (Быковский, Ф. А. Непрерывная детонация смеси газообразный водород - жидкий

кислород в плоскорадиальной камере с истечением к периферии / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников, **А. Н. Самсонов**, Е. Л. Попов // **Физика горения и взрыва**. – 2020. – Т. 56, № 6. – С. 69–77).

7. Bykovskii, F. A. Continuous detonation of a hydrogen–oxygen gas mixture in a 100-mm planeradial combustor with exhaustion toward the periphery / F. A. Bykovskii, S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. E. Tarnaikin, **A. N. Samsonov** // **Shock Waves**. – 2020. – Vol. 30, No. 3. – P. 235–243.

Статья в рецензируемом научном издании, рекомендованном ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

8. Самсонов, А. Н. Разработка и тестирование специального прибора для видеорегистрации детонационных волн / **А. Н. Самсонов**, А. В. Царькова, Ф. А. Быковский // **Горение и взрыв**. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 57–66.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

9. Самсонов, А. Н. Программа для видеофиксации и анализа объектов в экспериментально созданной среде / **А. Н. Самсонов**, Х. В. Самойлова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660941 от 26 сентября 2016 г.