

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
Быковский Федор Афанасьевич

Новосибирск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ	19
1.1. Экспериментальные камеры сгорания.....	19
1.2. Экспериментальная установка.....	22
1.3. Работа установки.....	24
1.4. Алгоритм проведения эксперимента.....	26
1.5. Методы измерений. Оценка погрешностей эксперимента.....	27
1.5.1. Оптическая регистрация процессов в камерах сгорания фоторегистратором с падающим барабаном и высокоскоростными видеокамерами.....	27
1.5.2. Фоторегистратор с падающим барабаном.....	27
1.5.3. Сравнение способов видеорегистрации.....	28
1.5.4. Преобразование линейной развёртки в кольцевую.....	30
1.5.5. Вычисление скорости детонационной волны по частоте.....	32
1.5.6. Определение скорости детонационных волн по наклону развёртки.....	33
1.6. Измерение давлений.....	35
1.7. Определение расходов газов. Погрешность вычислений.....	37
1.8. Разработка специализированного программно-аппаратного комплекса для видеосъёмки детонационных волн.....	40
Выводы из главы 1.....	44
ГЛАВА 2. НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ В КАМЕРЕ ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ С ИСТЕЧЕНИЕМ К ЦЕНТРУ.....	45
2.1. Постановка экспериментов.....	45
2.2. Результаты экспериментов.....	47
2.2.1. Опыты с начальным противодавлением $p_{10} \approx 0.1 \cdot 10^5$ Па.....	47

2.2.2. Физическая модель процесса.....	52
2.2.3. Удельный импульс.....	55
2.2.4. Опыты с начальным противодавлением $p_{ю} = 1 \cdot 10^5$ Па.....	56
2.3. Анализ результатов.....	58
2.3.1. Влияние противодавления на существование детонационных волн.....	59
2.3.2. Параметры детонационных волн и область существования НСД.....	60
2.3.3. Сравнение экспериментальных и расчётных данных НСД.....	62
Выводы из главы 2.....	62
ГЛАВА 3. НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ ВОДОРОД–КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ В ПЛОСКОРАДИАЛЬНЫХ КАМЕРАХ С ИСТЕЧЕНИЕМ К ПЕРИФЕРИИ.....	64
3.1. Исследование НСД в ПРК с внутренним диаметром 20 мм.....	64
3.1.1 Камера сгорания.....	64
3.1.2 Результаты экспериментов.....	68
3.1.3. Физическая модель процесса.....	69
3.1.4. Анализ результатов.....	74
3.1.5. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования.....	78
Выводы из раздела 3.1.....	79
3.2. Непрерывная детонация газовой смеси водород–кислород в ПРК с внутренним диаметром 100 мм и с истечением к периферии. Проверка масштабного эффекта.....	80
3.2.1. Камера сгорания и методика проведения экспериментов.....	81
3.2.2. Результаты экспериментов.....	84
3.2.3. Анализ результатов.....	92

3.2.4. Свойства НСД и роль отдельных параметров.....	97
Выводы из раздела 3.2.....	98
3.3. Режим эжекции кислорода.....	99
3.3.1. Постановка экспериментов.....	100
3.3.2. Результаты экспериментов.....	103
3.3.3. Анализ результатов.....	109
3.3.4. Обобщение результатов.....	111
3.3.5. Сравнение с цилиндрической камерой.....	112
Выводы из раздела 3.3.....	114
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123

ВВЕДЕНИЕ

Среди способов сжигания топлива, таких, как медленное горение с дозвуковой скоростью распространения пламени (называемого также дефлаграцией) и быстрое распространение области химической реакции со сверхзвуковой скоростью (называемое детонацией) стоит выделить последний — как наименее изученный и наиболее перспективный.

Впервые явление детонации было открыто Маляром и Ле-Шателье, а также Бертелло и Вьей в 1881 году. В 1890 году русский учёный В.А. Михельсон, опираясь на работы Гюгонио по ударным волнам, вывел уравнения для распространения детонационной волны и получил выражение для скорости детонации [1]. Дальнейшее развитие теории было выполнено Чепменом в 1899 году [2] и Жуге в 1905 году [3].

Следует выделить два различных вида детонационного горения: в пульсирующих и вращающихся (спиновых) детонационных волнах. Они отличаются, прежде всего, направлением движения этих волн. Так, при пульсирующей детонации волны движутся вдоль направления движения исходной смеси, а при спиновой детонации — поперек направления движения исходной смеси и продуктов химической реакции. Детонация называется непрерывной, если она не прекращается при подаче топливных компонентов. В случае продольных детонационных волн — это пульсирующая детонация (ПД), а вращающихся волн — непрерывная спиновая детонация (НСД). Для реализации НСД необходимы замкнутые кольцевые каналы, сечение которых имеет форму кольца или круга. Поэтому применяются цилиндрические или плоскорадиальные камеры сгорания (ПРК). Термин «плоскорадиальная камера» выбран потому, что расстояние между плоскими стенками Δ намного меньше её внутреннего и наружного диаметров: $\Delta \ll d_{in}$, $\Delta \ll d_{out}$.

Использование детонации в энергетических установках в режиме ПД впервые предложил Я.Б. Зельдович в 1940 году [4]. Он показал, что эффективность цикла, основанного на детонационном горении, превышает

эффективность используемых в настоящее время циклов, реализуемых в условиях медленного горения (до 10–12 % по сравнению с режимом горения при постоянном давлении). В том же году Г. Хоффман предложил организовать управляемое детонационное горение в периодически генерируемых ДВ для создания реактивной тяги [5].

Д. Никколс, Е.К. Дабора и Р.А. Геллер осуществили сжигание горючего в стационарных скачках уплотнения, возникающих при выходе сверхзвуковой струи в атмосферу [6]. В этих опытах для предотвращения преждевременного возгорания горючее впрыскивалось в центре сверхзвуковой струи кислорода. Р.А. Гроссом, В. Чинитцем и другими были проведены подобные опыты с детонационным сгоранием смеси в скачках маховской конфигурации, возникающих на клине в сверхзвуковой части аэродинамической трубы [7–9]. Как и у предыдущих авторов, смесь была сильно обеднена, а впрыск горючего происходил в области докритического сечения трубы. Поскольку температуры за стационарными ударными скачками были ниже температуры воспламенения, то реакция за ними объяснялась явлениями переноса. Р.И. Солоухин осуществил сжигание сверхзвуковой струи в пульсирующем скачке, возникающим перед тупым телом [10–12]. Для устранения преждевременного выгорания на стенках канала также подбирались смеси с большой задержкой воспламенения. Развитие сверхзвуковой авиации стимулировало исследования сверхзвукового горения, а также расчёты сверхзвукового сгорания в камерах ПВРД, результаты которых частично опубликованы в работах [13–26].

Возможность сжигания горючей смеси в режиме НСД впервые продемонстрировал Б.В. Войцеховский в 1959 году [27], которая была подробно описана им и его соавторами позднее [28]. Заранее перемешанная ацетилен–кислородная смесь, разбавленная аргоном, сжигалась в кольцевом плоском канале с заужением на выходе. Это была кольцевая плоскорадиальная камера, в которой свежая газовая смесь поступала в радиальном направлении, а продукты удалялись через кольцевой канал, расположенный на периферии [27–31]. Распространение фронта детонационной волны происходило в одном

направлении – вдоль окружности кольцевого канала. Диаметр канала подбирался таким, что за время одного оборота детонационной волны или группы волн смесь успевала обновляться. В случае стационарной детонации в плоском кольцевом канале фиксировалась треугольная область свечения без видимых ударно-детонационных скачков. Поскольку оптическим методом структуру течения в области детонационных волн зарегистрировать не удалось, была построена её предполагаемая структура. По предлагаемой схеме течения в область за фронтом детонационной волны поступает вновь натекающая смесь, отесняя продукты сгорания [28]. После этого следующая детонационная волна, распространяясь поперек направления движения этой смеси, реализует самоподдерживающийся режим детонации (НСД). Скорость поперечных детонационных волн вдоль канала в этих опытах была близка к скорости звука в продуктах реакции.

Исследование режима стационарной детонации в плоских кольцевых камерах были продолжены В.В. Михайловым и М.Е. Топчяном [32], А.А. Васильевым [33], которые также получали околосвуковые режимы. С помощью высокочастотных датчиков давления на основе титаната бария ими были зарегистрированы профили давления в поперечной волне. Оптическая регистрация, проводимая методом компенсации скорости, давала только светящуюся треугольную область без видимых скачков уплотнения. Эти работы не прояснили до конца структуру волны. А.А. Васильев измерил среднюю температуру газа в камере с помощью малоинерционных термопар.

Дальнейшее развитие направления по сжиганию топливных смесей в режиме НСД, как теоретически, так и экспериментально, в основном осуществлялось в камерах кольцевой цилиндрической геометрии. В Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева в 1975 году в камере кольцевой цилиндрической геометрии при отдельной подаче компонентов впервые реализована НСД смесей ацетилена с кислородом и пропана с кислородом [34]. В настоящее время большое количество работ посвящено оценке энергоэффективности камер сгорания, основанных на принципах НСД [35–41],

в том числе для смесей водород–кислород [42, 43]. В работах сообщается об увеличении удельного импульса на 7–8 % при переходе от дефлаграционного горения к детонационному. Часть исследователей работает над созданием новых конструкций прямоточных реактивных двигателей с камерой сгорания, подходящей как для пульсирующего вида запуска [44], так и для постоянной работы в режиме НСД [45].

Исследование детонации в плоскорadiaльных камерах сгорания

Режиму НСД в плоскорadiaльных камерах (ПРК) были посвящены лишь отдельные работы, которые проводились только в России (ИГиЛ СО РАН) [46, 47]. В отличие от работ Б.В. Войцеховского они проводились при отдельной подаче окислителя и горючего без заужения камеры сгорания на выходе. В качестве горючего использовались газы (ацетилен, водород, метан), жидкости (керосин, дизельное топливо), уголь, а в качестве окислителя – кислород или воздух. В работе [46] была отмечена повышенная устойчивость поперечных детонационных волн (ПДВ) в плоскорadiaльной камере сгорания с истечением продуктов к центру. Устойчивый режим непрерывной спиновой детонации в камере плоской геометрии был реализован в ИГиЛ СО РАН и результаты опубликованы в открытой печати в 1997 году [48]. Роль окислителя в экспериментах играл воздух, а топлива – керосин и дизельное топливо. Также было показано, что предварительно закрученный поток топливной смеси позволяет реализовать НСД при меньшем давлении подачи топливной смеси. Недавно появились зарубежные работы [49, 50], в которых экспериментально для смеси водород–воздух и JP10–кислород в ПРК, состыкованной с компрессором и турбиной, реализованы детонационные режимы.

Реализация и исследование режимов детонационного сжигания химически активных смесей водород–кислород в плоскорadiaльных камерах (ПРК) с истечением к периферии и к центру имеет прямое отношение к перспективе использования детонационного сжигания водорода в ракетном двигателе (применение НСД в прототипе ракетного двигателя с цилиндрической камерой сгорания приведено в работе [43]). Выбор ПРК

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 «сигары» существующих двигателей с цилиндрической камерой сгорания). Развиваемое в этих камерах тангенциальное течение продуктов за фронтом детонационной волны создаёт продуктам центробежные силы. В ПРК 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 (ЖРД), что существенно гарантирует понижение 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 турбины).

Целью работы является 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 H_2-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 $\text{H}_2\text{--O}_2$, противодействия, 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 работы:

1. Разработаны камеры сгорания, в которых возможно осуществление детонационного сжигания газообразной смеси $\text{H}_2\text{--O}_2$. 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 «сигары» для цилиндрических камер сгорания).

Уменьшаются давления в системе подачи (в случае эжекции – до атмосферного) при тех же расходах топлива, что 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 интересующей 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 № 10032p/17057 от 01.02.2012 (руководитель); СТАРТ-14-2, договор № 96ГС2/17057 от 11.12.2014 (руководитель); грант РФФИ № 18-41-540001 (исполнитель).

Методы исследования:

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 прозрачные окна, расположенные по диаметру камеры проводится тремя различными способами: видеосъемкой на высокоскоростную цифровую видеокамеру с частотой кадров 420000–775000 кадр/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 специализированного 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 в результате использования 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 исследования обоснована:

- большим объёмом информации, зарегистрированной на многочисленных фоторегистраграммах, осциллограммах давлений, вычисленных расходов;

- теоретическим и экспериментальным согласованием характера детонации, а также сопоставлением результатов с теоретически допустимой скоростью Чепмена–Жуге для смеси $\text{H}_2\text{--O}_2$;

- 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 исследования. Основные результаты работы докладывались на следующих семинарах и научных конференциях: 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 течение в системе волны; программа для определения направления вращения ПДВ и их количества, преобразования линейной развёртки ПДВ в кольцевую в плоскости ПРК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 97 наименований, общий объем диссертационной работы составляет 135 страниц, включая 52 рисунка и 13 таблиц.

Содержание работы. В **первой главе** рассмотрены плоскорадиальные камеры, разработанные для детонационного сжигания топлив, экспериментальная установка и методики измерения параметров детонационного процесса: фото- и видеофиксация, измерение давлений, вычисление расходов и соотношений компонентов топливной смеси. Описан принцип действия разработанного программного обеспечения. Предложено использование многоканального АЦП для низкочастотных датчиков давления, позволяющих осуществлять сбор данных. Описан программно-аппаратный комплекс для высокоскоростной видеосъемки, разработанный соискателем, состоящий из прибора и специального программного обеспечения. Приведено сравнение результата видеосъемки инициирования детонации разработанным прибором и видеокамерой Photron SA5 при схожих настройках и сделан вывод, что после доработки он вполне может конкурировать с существующими видеокамерами.

Во **второй главе** изложены результаты, касающиеся реализации НСД в ПРК с истечением к центру H_2-O_2 смеси и исследования структуры ПДВ и течение в их окрестности. Определены пределы существования НСД в камере сгорания диаметром 80 мм плоскорадиальной геометрии. Экспериментально установлено влияние противодавления на характер и условия существования детонационных волн. Произведено сравнение изображений, зафиксированных при помощи видеокамеры и пленочного фоторегистратора. Предложен метод определения направления вращения ДВ при НСД и его программная реализация. Предложен метод восстановления картины ДВ в цилиндрической системе координат по серии изображений. Вычислен удельный импульс продуктов и тяга установки в зависимости от диаметра выходного отверстия.

В **третьей главе** установлены и отмечены факторы, влияющие на существование НСД в ПРК с истечением к периферии H_2-O_2 смеси, приведены исследования структуры ПДВ и ПД с течениями в их окрестности. Анализируется особенность плоскорадиальной геометрии камеры, усложняющая процесс инициирования детонации. Проведена серия экспериментов на камерах большего диаметра и истечением к периферии. Экспериментально показано незначительное изменение характера протекания детонации с увеличением характерного размера камеры. При сравнении камер различного диаметра исследовано наличие масштабного эффекта и его влияние на качество детонации. Приведены эксперименты с поступлением кислорода в режиме эжекции. Этот режим также возможен, однако для работы в широких диапазонах расходов смеси требует наличия специфической геометрии камеры сгорания. Разработано ПО для обработки и анализа данных с АЦП, в том числе определения спектра сигнала. Приведены результаты работы по автоматизации обчета экспериментальных результатов для вычисления расходов компонентов топливной смеси. Разработано ПО для выявления сталкивающихся волн без повторения эксперимента, сформулированы отличительные признаки сталкивающихся и вращающихся ДВ, регистрируемые при помощи фото и видеосъемки.

ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1 Экспериментальные камеры сгорания

Общий вид плоскорадиальных камер приведен на рис. 1. Они представляют собой пространство между двумя плоскостями, с расположением форсунок в центре рис. 1(а) или на внешнем периметре камеры рис. 1(б). Соответственно, в первом случае имеет место истечение к периферии, а во втором — к центру.

Особенностью ПРК является то, что расстояние между плоскими стенками намного меньше её диаметров: $\Delta \ll d_{in}$, $\Delta \ll d_{out}$.

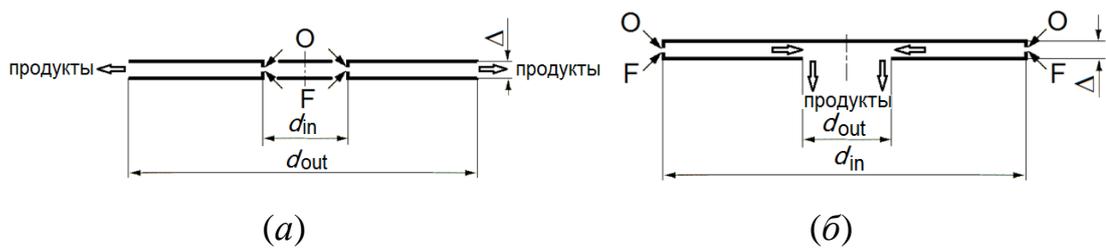


Рисунок 1. Плоскорадиальные камеры: (а) с истечением к периферии,
(б) с истечением к центру

Геометрия камер сгорания использованных в экспериментах

На рис. 2 представлены четыре различных варианта ПРК, используемых в экспериментах. Их геометрические характеристики приведены в табл. 1. На рис. 2(а) представлена ПРК с истечением к центру и наружным диаметром $d_{in} = 80$ мм, расстоянием между параллельными стенками $\Delta = 5$ мм и варьируемым отверстием с внутренним диаметром d_{out} в одной из стенок, через которое происходит истечение продуктов, $d_{out} = 40, 30$ и 20 мм.

Таблица 1. Основные геометрические параметры камер сгорания

	d_{in} , мм	d_{out} , мм	Δ , мм	Δ' , 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
		100	120, 150, 200, 300	5	-	34,2	60,8	-
		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

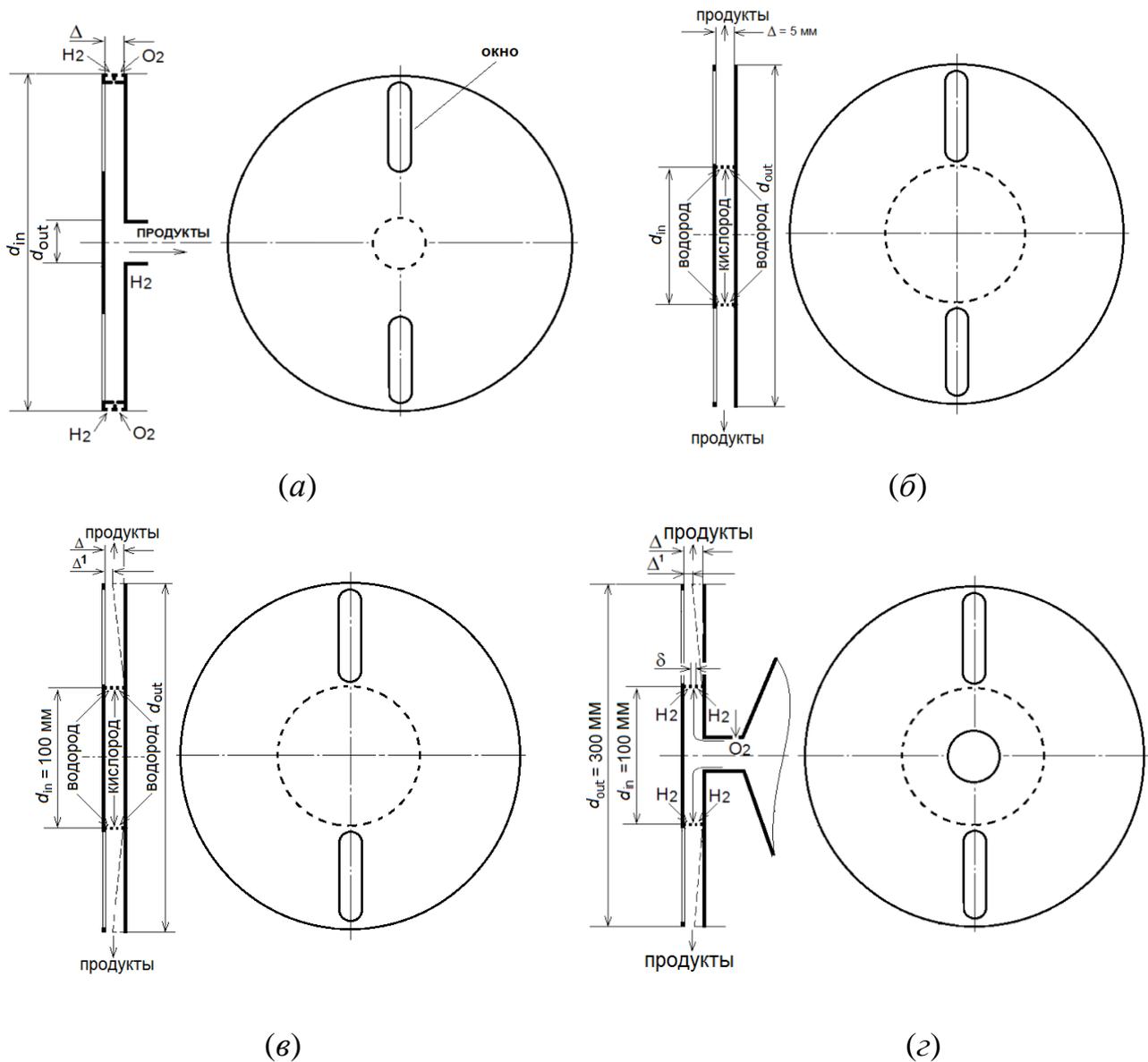


Рисунок 2. Камеры сгорания, используемые для проведения экспериментов

Раздельная подача компонентов смеси в камеру сгорания осуществлялась через отверстия форсунок, равномерно расположенных по цилиндрической стенке. Отверстия для горючего и окислителя выдавлены кривой накаткой во встречном направлении. Для наблюдения процесса в одной из плоских стенок ПРК вдоль радиуса установлено окно из оргстекла шириной 10 мм, охватывающие всё поле течения вдоль окна.

На рис. 2(б) изображена ПРК с истечением к периферии, образованная цилиндрической поверхностью диаметром $d_{in} = 20$ мм и двумя плоскими стенками с расстоянием между ними $\Delta = 5$ мм. Наружный диаметр варьировался $d_{out} = 40, 60$ и 80 мм. При $d_{out} = 80$ мм также изменялась величина $\Delta = 2,5$ или 12 мм.

На рис. 2(в) представлена ПРК с истечением к периферии с внутренним диаметром $d_{in} = 100$ мм. Расстояние между плоскими стенками составляло $\Delta = 5$ или 10 мм. Наружный диаметр кольцевого отверстия d_{out} , через которое происходит истечение продуктов, варьировался: $d_{out} = 120, 150, 200$ и 300 мм. На камере диаметром $d_{out} = 300$ мм ($\Delta = 10$ мм) допускалось равномерное сужение канала к выходу из КС до $\Delta^I = 3,3$ мм, обеспечивающее постоянство площади кругового сечения канала $S_{Out\Delta} = 31,4 \text{ см}^2 = const$. Общая площадь сечения отверстий для водорода составляла $S_f = 34,2 \text{ мм}^2$, а кислорода – $S_{ox} = 60,8 \text{ мм}^2$.

На рис. 2(г) представлена ПРК 1 с истечением к периферии диаметром цилиндрической поверхности $d_{in} = 100$ мм, работающая в режиме эжекции кислорода. Наружный диаметр плоских стенок $d_{out} = 300$ мм, расстояние между которыми было $\Delta = 12$ или 7 мм. При этом площадь сужающегося канала на выходе из ПРК составляла $S_{Out\Delta} = \pi \cdot d_{out} \cdot \Delta = 37,7$ или 22 см^2 , соответственно. В ряде опытов расстояние между стенками равномерно уменьшалось к выходу из камеры от $\Delta = 12$ мм до $\Delta^I = 5,3$ мм (обозначена пунктирной линией). Площадь сужающегося канала на выходе из ПРК в этом случае составляет $S_{Out\Delta}^I = 50 \text{ см}^2$. Кислород поступал в ПРК через кольцевую щель шириной $\delta = 2$ мм (проходным сечением - $S_\delta = \pi \cdot d_{in} \cdot \delta = 6,28 \text{ см}^2$).

1.2. Экспериментальная установка

Для выполнения поставленной задачи была изготовлена установка. Вариант собранной установки, содержащий ПРК с истечением в центр, изображен на рис. 3.

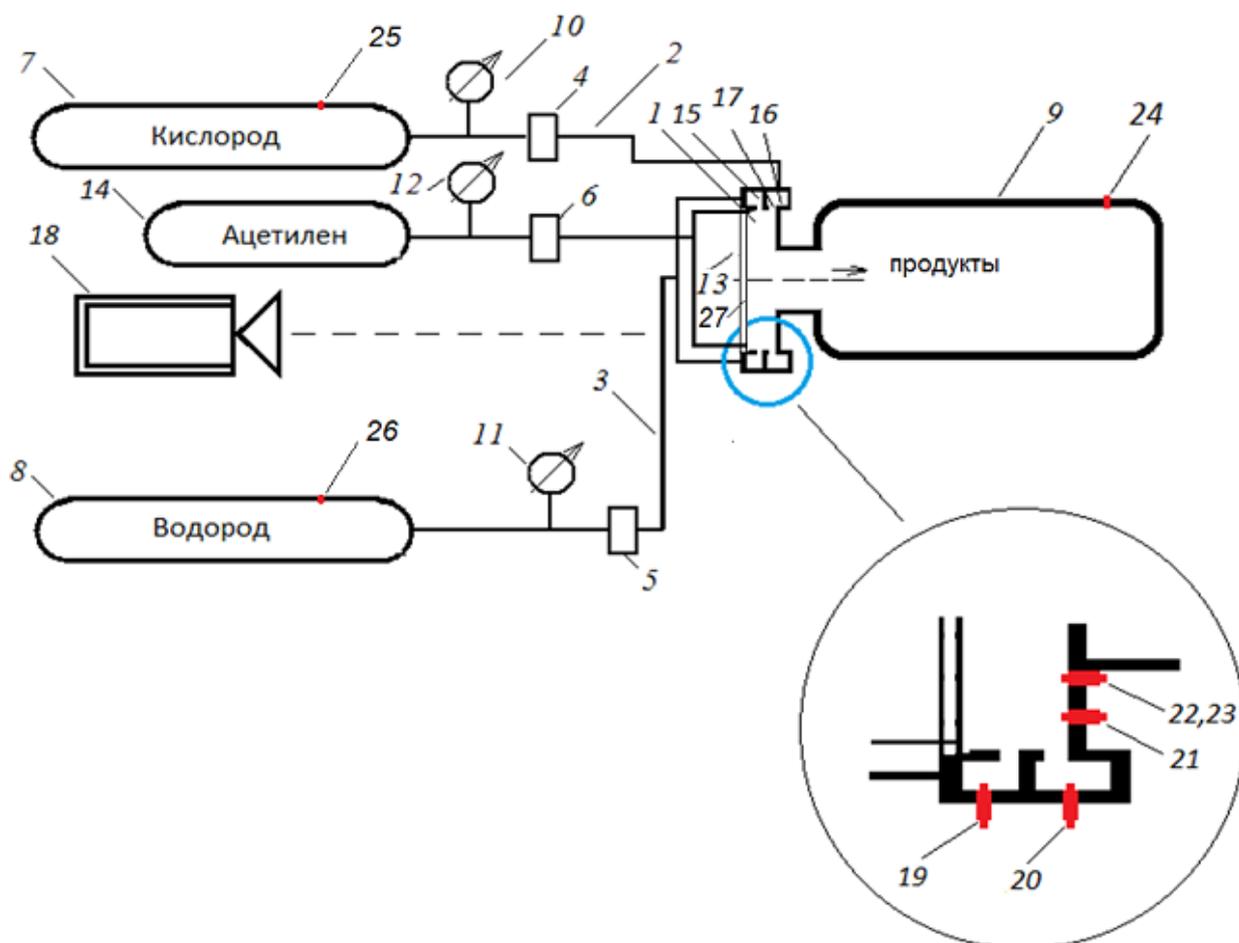


Рисунок 3. Схематичное изображение экспериментальной установки

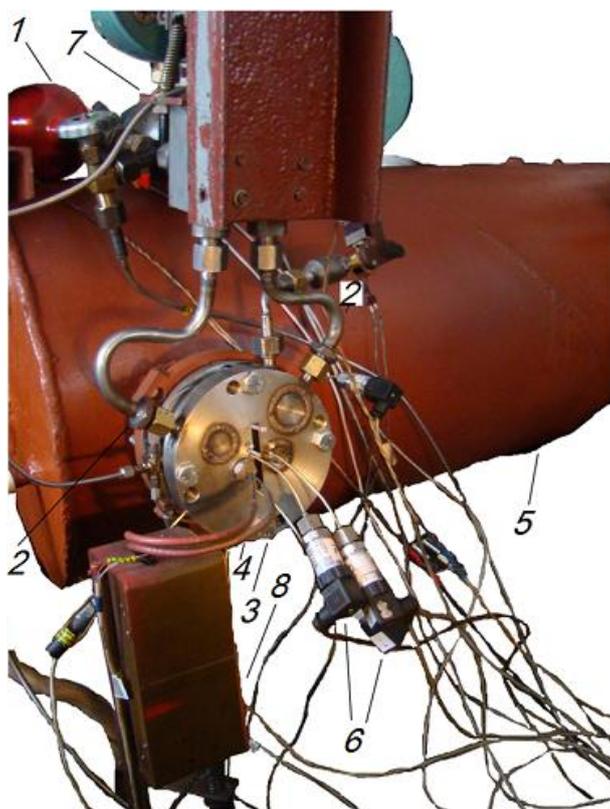
Основные элементы установки: *1* – камера сгорания (КС), *2* и *3* – трубопроводы кислорода и водорода, соответственно, *4*, *5*, *6* – клапаны, *7* и *8* – ресиверы кислорода и водорода. Выходы камер сгорания соединялись с вакуумированным объёмом *9* с регулируемым противодействием. Для измерения начальных давлений в ресиверах использовались манометры *10*, *11*, *12*, а текущих – тензометрические датчики. Для возбуждения детонационного режима использовалось пережигание проволоочки *13* при подаче в заданный

момент напряжения от инициирующего устройства. Клапаны 4 и 5 имели один электромагнитный якорь, что позволяло ему, как открывать, так и закрывать подачу топлива и окислителя практически одновременно. Использовались также и отдельные клапаны-тиратроны на каждый из топливных компонентов, а также для подачи ацетилена 6 из ресивера 14. На рис. 3 позицией 15 обозначен кольцевой топливный коллектор, а 16 – кольцевой коллектор для окислителя, 17 – схематично обозначено местоположение форсунок, 18 – высокоскоростной видеокамеры, 19–24 изображены датчики давления: 19 – датчик давления топлива в коллекторе, 20 – датчик давления окислителя в коллекторе, 21 – датчик статического давления в начале камеры, 22 и 23 – датчики статического и полного давления в камере сгорания (расположены на одном радиусе), 24 – датчик давления в бочке для продуктов, 25 – датчик давления в ресивере кислорода, 26 – датчик давления в ресивере водорода.

Для фотографирования процессов в камере сгорания служили окна 27 из оргстекла.

Фото одного из вариантов установки приведено на рис. 4.

Рисунок 4. Внешний вид экспериментальной установки для камеры 80 мм с истечением к центру. 1 – ресивер водорода, 2 – трубопроводы водорода и кислорода, 3 – камера сгорания, 4 – провода инициатора, 5 – бочка для продуктов, 6 – датчики давления, 7 – клапаны, 8 – блок инициирования



1.3. Работа установки

Установка работала следующим образом:

Газообразное горючее – водород и кислород из ресиверов 7 и 8 (рис.3) под давлением через клапаны 4, 5 подавались по коллекторам 2, 3 в соответствующие форсунки 17 расположенные вдоль окружности, на выходе из которых смешивались в скрещивающихся струях в камере сгорания 1. Получившаяся топливная смесь, воспламенялась электрическим разрядом на инициаторе 13. Продукты сгорания удалялись из КС в атмосферу или в бочку 9 с предварительно-установленным давлением. Многие параметры установки и эксперимента – как геометрические, так и химические могли варьироваться для выявления их влияния на качество детонации.

Горячие продукты реакции воспламеняли тонкую струйку ацетилена, подаваемую из ресивера 14 в камеру сгорания 1 на краю наблюдательного окна в концентрации, не превышающей 1 % по массе от суммарного расхода основных компонентов. Это обеспечивало подсветку течений в КС.

В процессе проведения эксперимента контролировалось давление подачи как в ресиверах горючего и кислорода, так и в соответствующих впускных коллекторах, а также в камере сгорания. Поскольку датчики, используемые в этой установке – аналоговые со встроенным усилителем (WIKА, Австрия и Trafag, Швейцария), в системе измерений используется АЦП (аналого-цифровой преобразователь) и программное обеспечение, позволяющее осуществлять сбор и сохранение данных на персональном компьютере (ПК).

На рис. 5 указано местоположение датчиков давления в КС и впускном коллекторе для камеры с истечением к периферии (при истечении в центр датчики на входе и на выходе поменяются местами).

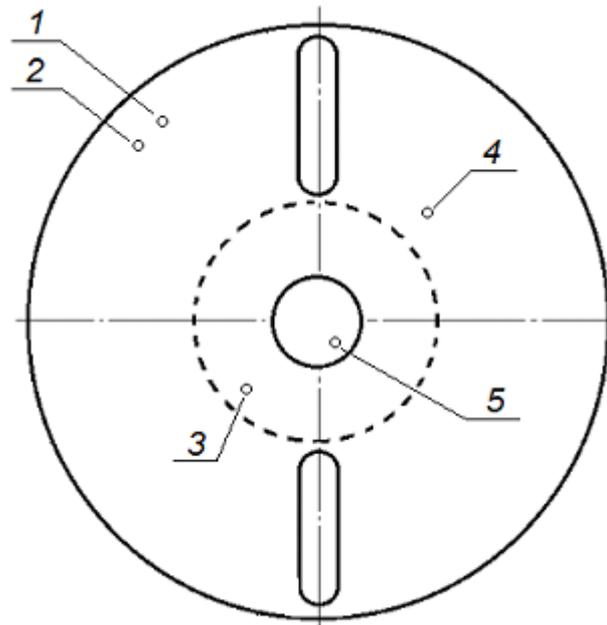


Рисунок 5. Местоположение датчиков давления в камере сгорания

Позицией *1* обозначено местоположение датчика полного давления, *2* – статического давления, при этом эти два датчика расположены на одном радиусе, *3* и *5* – указывают на местоположение датчиков давления во впускных коллекторах топлива и окислителя соответственно. Датчик давления на входе в камеру обозначен позицией *4*.

В процессе работы исследовались условия появления и существования вращающихся детонационных волн. Для проведения эксперимента были выбраны чистые химически активные газы, такие как водород и кислород, поскольку большая разница скоростей водорода и кислорода повышает турбулентность потока и упрощает процесс равномерного перемешивания компонентов, минимизируя влияние механизма смесеобразования и качества форсунок. Характерной особенностью выбранной смеси было сгорание бесцветным пламенем, что затрудняло видеосъемку процесса. По этой причине требовалось применение третьего газа – углеводорода, поскольку наличие атома углерода способствует хорошей светимости пламени. Поскольку этот газ не должен был мешать появлению детонационных волн в основных топливных компонентах, он должен был иметь малый расход и быть

достаточно химически активным. В результате был выбран ацетилен для подсветки пламени.

1.4. Алгоритм проведения эксперимента

Подготовка эксперимента по осуществлению НСД проводилась в следующей последовательности:

1. Откачка давления из бочки для продуктов.
2. Заполнение ресиверов горючего, окислителя и ацетилена.
3. Включение системы сбора данных о процессе (видеокамера, АЦП).
4. Включение пульта управления установкой и питания иницирующего устройства.
5. Запуск пульта управления (программного механизма).

Запуск системы регистрации процесса (АЦП и видеокамеры) совмещалось с запуском пульта управления. Последовательность последующих операций приведена на рис. 6.

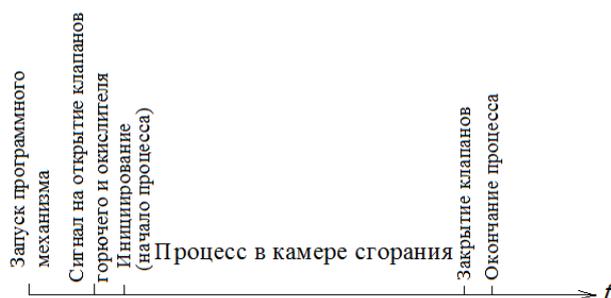


Рисунок 6. Последовательность событий в течение эксперимента

Открытие клапанов подачи горючего и окислителя осуществлялось через несколько десятков миллисекунд после запуска программного механизма. Иницирование процесса производилось в момент начала поступления кислорода в КС, который подавался позже водорода. После закрытия клапанов процесс ещё продолжался некоторое время за счёт опорожнения подводящих трубопроводов. Длительность процесса не превышала 1 с. Более раннее закрытие клапанов позволяло защитить элементы камеры от выгорания.

1.5. Методы измерений. Оценка погрешностей эксперимента

1.5.1. Оптическая регистрация процессов в камерах сгорания фоторегистратором с падающим барабаном и высокоскоростными видеокамерами

Оптическая регистрация процессов в камерах сгорания производилась фоторегистратором с падающим барабаном собственного изготовления, описанным в статье [51] и монографии [52], и высокоскоростными видеокамерами Photron FASTCAM SA1.1 675K-M3 и Photron FASTCAM SA5. В ряде опытов после обработки фоторегистрограмм производилось сравнение результатов, зарегистрированных этими методами. В ПРК с истечением к периферии фоторегистрация производилась через два окна вдоль диаметра камеры, а в ПРК с истечением к центру – через одно окно по всему диаметру камеры. В том и другом случае охватывалось течение по диаметру всей камеры (см. рис. 3).

1.5.2. Фоторегистратор с падающим барабаном

Схема фоторегистратора приведена на рис. 7.

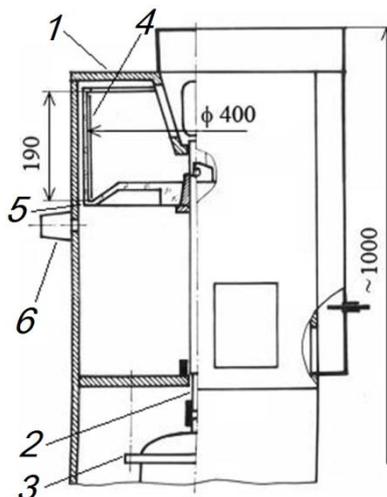


Рисунок 7. Схема фоторегистратора с падающим барабаном

Устройство состоит из цилиндрического корпуса 1 высотой около метра с установленным в центре валом 2, вращаемым двигателем 3. К валу крепится цилиндрический прозрачный барабан из оргстекла с уложенным по внутренней стороне одним витком широкой плёнки 1256 x 190 мм 4. В определенный момент вал вращающегося барабана останавливается, и барабан выходит из зацепления с валом и начинает плавное падение. Вертикальная скорость падения ограничена площадью проходного сечения канала 5, по которому выходит воздух из-под барабана. В процессе падения барабан вращается, осуществляя развертку входящего через объектив 6 оптического пучка на поверхность фотопленки.

Барабан, вращаясь вокруг оси, одновременно смещался в осевом направлении с практически постоянной скоростью против объектива, и изображения волн регистрировались по спиральной дорожке на плёнку. Так достигалась возможность осуществления длительной съёмки с разрешением в микросекундном диапазоне. В результате на плёнку фиксировалось изображение течения в окрестности ПДВ в системе волны.

1.5.3. Сравнение способов видеорегистрации

Отличия для описанных способов регистрации содержались как в методах преобразования данных, так и в методах анализа. Видеосъёмка цифровым прибором отличается от съёмки на фотопленку наличием последовательных кадров. При съёмке фоторегистратором, благодаря применяемому методу компенсации скорости [53], одна часть изображения, зарегистрированного на фотопленку с одного окна, отличается высокой четкостью, в то время как вторая с другого окна – значительно размыта. Для первого окна направление вращения волны и плёнки фоторегистратора совпадают, и происходит компенсация скоростей движения плёнки и изображения, а для второго – раскомпенсация, так как плёнка и изображение движутся в противоположных направлениях. Цифровые видеокамеры позволяют реализовать подобного рода компенсацию. Однако видеокамеры

обладают существенно большими возможностями и не зависят от нехватки расходных материалов, что делает их более перспективным вариантом.

Разрешение кадров видеосъемки видеокамерами подбиралось так, чтобы они вмещали в себя все наблюдательное окно камеры сгорания с небольшим запасом (256x16) на случай сдвига штатива в процессе подготовки эксперимента. Получавшийся кадр передавал изображение движущегося поперек вытянутого окна светящегося объекта. На следующем кадре был изображен тот же самый объект в следующий момент времени со смещением. Поскольку точка объекта, расположенная в центре первого кадра, присутствует также и на втором кадре, но со сдвигом, получается определенная избыточность информации, не позволяющая наложением кадров получить полную картину движения детонационной волны. По этой причине производилась выборка одной строки (допустим, из 16-ти) из каждого кадра и сшивка выбранных строк в новое изображение, отражающее характер развития процесса во время эксперимента. При выборе 2–3 строк картина течения получалась более дискретной и размытой. С этой целью соискателем было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее производить «сшивку» строк из различных кадров в одно изображение. Таким образом получалась картина течения в системе волны. Для определения параметров детонации (число и скорость волн) в ПО была предусмотрена функция установки маркеров (как на экране осциллографа) с автоматическим измерением параметров. Также автоматически вычислялось абсолютное время от начала эксперимента в выбранной точке изображения.

В итоге осуществлялось сканирование детонационной волны, где вместо движущейся светоприемной линейки регистрировалось движущееся мимо неподвижного сенсора изображение объекта [53, 54]. Поскольку кадры видеосъемки имели сдвиг по времени, то реализовывалась x,t – диаграмма светящихся продуктов, движущихся по радиусу камеры. Светящиеся объекты, движущиеся в тангенциальном направлении, фиксировались с искажением, поскольку они двигались по окружностям разного диаметра, а фоторазвёртка

имеет линейную форму. Поэтому, как и в случае с фоторегистратором (ФР) с падающим барабаном, для восстановления структуры волн и течения в плоскости камеры необходимо преобразование линейной развёртки в кольцевую. При установке режима съемки 400000 кадров в секунду структура течения регистрировалась достаточно отчетливо, несмотря на то, что за время экспозиции (не более 2,5 мкс) светящиеся объекты двигались относительно неподвижного фотоэлемента видеокамеры [55, 56].

Развитие оптических методов исследования потоков может предполагать использование метода цифровой трассерной визуализации с одновременной видеосъемкой процесса [57, 58], однако это усложняет конструкцию установки и в данной работе не применялось.

Помимо оптических способов регистрации волн НСД существуют еще акустические и химионизационные способы регистрации параметров детонационных волн [59]. Преимуществом этих методов является пригодность для использования в действующих установках без какого-либо изменения их конструкции, а к их недостаткам относится меньшая разрешающая способность по длине канала. Поскольку целью работы ставится фундаментальная задача исследования НСД, ПРК проектируется так, чтобы было возможно использование оптических методов регистрации потока.

1.5.4. Преобразование линейной развёртки в кольцевую

Для восстановления картины процесса, происходящего в камере сгорания, было разработано программное обеспечение на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV, осуществляющее геометрические преобразования над линейной развёрткой изображения. Произведена сборка программных библиотек Qt и OpenCV в общие объектные файлы, что позволило создать платформу разработки приложений для обработки изображений детонационных волн. В результате был разработан программный код, позволяющий осуществлять преобразование изображения детонационной

волны НСД в плоскорадиальной камере сгорания из линейной системы координат в аксиальную.

Программный модуль сопоставляет вектор к точке от края на плоском изображении вектору такой же длины – на кольцевой канве. При этом координата точки по оси времени преобразуется в угол наклона вектора. В результате, изображение из двумерной декартовой системы координат преобразовывается в двумерную цилиндрическую систему. Для правильного преобразования необходимо знать количество волн, существующих в камере в данный момент времени и передавать на вход программе изображение с нужным количеством периодов волн. Схематично преобразование представлено на рис. 8, где на рис. 8(а) изображена двумерная картина течений, восстановленная по серии фотоснимков, а результат преобразования в цилиндрическую систему координат представлен на рис. 8(б). Исходное изображение, приведено в разделе 3.2.3 главы 3. В центре изображения отчетливо видно местоположение фронта детонационной волны (BC) и предшествующей ему области натекающих продуктов, расположенных вблизи внутреннего радиуса изображения.

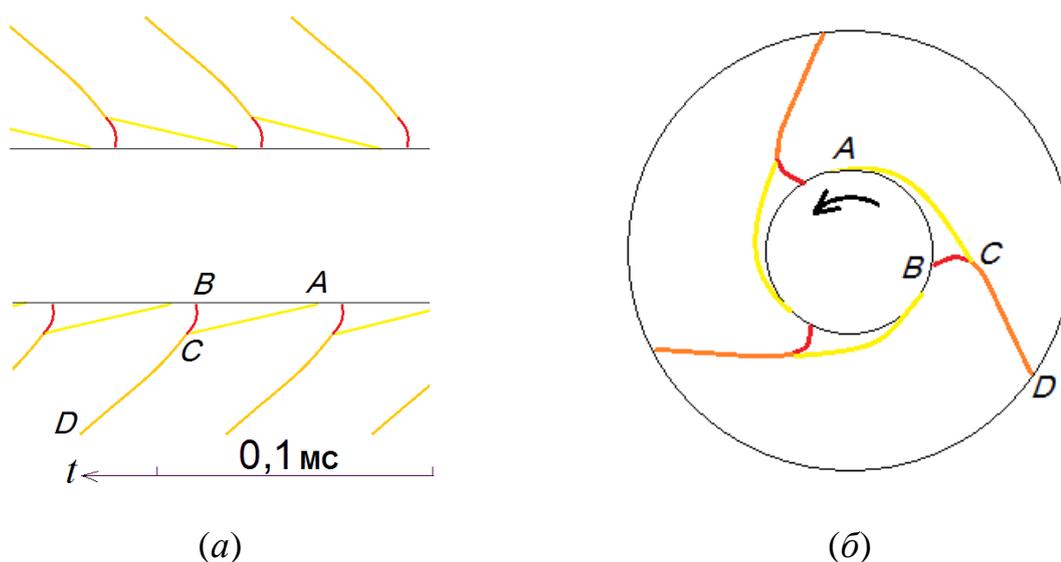


Рисунок 8. Фоторегистрограмма изображения (фрагмент) (а) и свёртка выделенной области (б); BC – фронт, CD – ударная волна в продуктах (шлейф), стрелкой указано направление движения волн

1.5.5. Вычисление скорости детонационной волны по частоте

Вычисление скорости детонационной волны основывается на следующих данных:

1. Кадровая частота
2. Длина окружности детонационной камеры
3. Количество волн (четность), одновременно существующих при данных значениях расхода и соотношениях компонентов топливной смеси.

Этих данных достаточно, чтобы определялось время появления поперечных детонационных волн (ПДВ) против окна Δt , которое позволяет однозначно находить частоту их вращения f и скорость НСД D относительно цилиндрической поверхности камеры, по которой расположены форсунки:

$$f = 1/\Delta t, \quad (1a)$$

$$D = \pi d_{in}/(n\Delta t), \quad (1б)$$

здесь n – число ПДВ вдоль окружности камеры.

По снимкам, зарегистрированным методом компенсации скорости, а также видеокамерой, число ПДВ точно определить нельзя за исключением случаев, когда делался выбор между одной, двумя или даже тремя ПДВ. В случае большего числа волн недостаточно знание их чётности или нечётности, определяемой по периодичности прохождения волн напротив первого и второго окна. В общем случае критерием выбора числа волн являлась величина скорости идеальной детонации Чепмена–Жуге D_{C-J} для данного состава смеси. При непрерывной вращающейся детонации вследствие неполного перемешивания компонентов, их частичного выгорания перед ПДВ, а также потерь импульса из-за искривления детонационного фронта, имеет место неравенство $D_{C-J} > D$ [60, 62, 63]. Поэтому при выборе числа ПДВ это неравенство должно соблюдаться. Если в камере появляются слабые околзвуковые волны, то они выделяются на фоне ПДВ отсутствием характерной структуры и забегающим вперёд шлейфом. Шлейф в этом случае уже не является ударной волной, а представляет собой слабую околзвуковую волну с горением по всей её длине. Задача выбора числа волн упрощалась

благодаря наличию двух наблюдательных окон и определения четности количества детонационных волн.

Погрешность измерения скорости

Поскольку скорость волны определялась визуально по графическим изображениям, восстановленным сшивкой строк из нескольких кадров, при достаточной четкости изображения могло быть отклонение правой и левой границы на 1 пиксел. При расчётах использовалось расстояние между двадцатью соседними волнами, составлявшее в среднем 255 строк (пикселей). Таким образом, погрешность измерения составляет около 1 %.

1.5.6. Определение скорости детонационных волн по наклону развертки

Скорость волны по наклону развёртки x,t – диаграммы приближённо вычисляется по формуле:

$$v = kv_p t g \alpha, \quad (2)$$

где k – коэффициент уменьшения изображения, v_p – скорость движения фотоматериала, α – угол наклона касательной к развёртке в выбранной точке x,t – диаграммы. Погрешность на уровне 10 % обусловлена тем, что имеется некоторая неопределённость в проведении касательной. На основе этих данных определяется число волн. Затем по формуле (1) более точно вычисляется скорость волн.

Для волн, движущихся вдоль камеры сгорания (продольные волны), съёмка через продольное окно является их x,t – диаграммой. По наклонам траекторий светящихся объектов на x,t – диаграммах определяется их скорость - $v_l = L_w / \Delta t_w$ (3), где L_w – длина или ширина окна, а Δt_w – время нахождения светящегося объекта в окне. Поскольку траектория имеет наклон, по формуле (2) оценивается их продольная скорость в любой точке напротив окна.

Процесс, связанный с существованием ПДВ, движущихся навстречу и периодически сталкивающихся друг с другом, очень не регулярный. В этом случае представляется возможным вычислить частоту появления тангенциально движущихся волн в видимой области камеры, но невозможно

вычислить их скорость по описанному ранее алгоритму. Поэтому производилась регистрация развёртки движения волн через щель, ориентированную по направлению вращения волн (x, t – диаграммы). Направление вращения волн, снятых фоторегистратором, легко определить по размытости их изображения (компенсация или раскомпенсация скорости изображения). Направление вращения волн можно зафиксировать и цифровой видеокамерой, если произвести сшивку пикселей по краям окна и сравнить перемещение светящегося объекта во времени (подробнее о методе – в главе 2, в разделе 2.2.1).

Все используемые в данной работе ПРК имеют два наблюдательных окна (или одно окно удвоенного размера), расположенные на одном диаметре – в верхней и нижней половине камеры. По этой причине на развёртке в окнах видна ориентация волн в одном направлении, в то время как при одном и том же угловом направлении вращения в действительности тангенциальная ориентация волн в верхнем и нижнем окне будет противоположна, но сканирующий принцип работы видеокамеры не позволяет этого зафиксировать. Поскольку развёртка процесса линейная, то для восстановления истинной картины течения необходимо сворачивание малых фрагментов в кольцо.

Обработкой кадров, снятых поперёк окна, в отдельных опытах фиксировались x, t – диаграммы этих светящихся объектов (главным образом, волн) рис. 9.



Рисунок 9. x, t – диаграмма детонационных волн

Если на x, t – диаграмме угол наклона развёрток относительно оси времени одинаковый, например, острый, то волны движутся в одном

направлении, если чередуются острый и тупой - волны совершают возвратно-поступательные движения. В таком случае в камере сгорания волны сталкиваются между собой. По аналогии с классической многофронтной детонацией [28] такую детонацию будем называть непрерывной многофронтной детонацией (НМД). Раньше для построения x,t – диаграммы требовалось проводить эксперимент повторно, однако соискателем было разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять поворот изображений в процессе проведения операции «сшивки», что избавило от необходимости повторения эксперимента (более подробно – в разделе 4.3).

НМД в отличие от НСД нельзя свернуть в кольцо с помощью описанного метода (см. рис. 8), так как процесс нестационарный в системе волны. Структуру в плоскости камеры можно зафиксировать мгновенным кадром через всю прозрачную стенку. Но она будет меняться от кадра к кадру, так как процесс нестационарный. При НСД процесс в системе волны стационарный, поэтому возможно преобразование линейной развёртки в кольцевую.

1.6. Измерение давлений

Измерение давлений перед началом эксперимента производилось манометрами (в ресиверах), а в процессе работы установки контролировалось средними давлениями, регистрируемыми сертифицированными датчиками давлений фирмы WIKA (Австрия) с точностью измерения $\pm 0,5$ %, установленными в различных точках: ресиверах, коллекторах и камерах сгорания (КС).

Аналоговый сигнал, соответствующий давлению и регистрируемый датчиками, поступал на многоканальный АЦП, где оцифровывался и помещался в текстовый файл общий для всех шестнадцати каналов для низкочастотного АЦП Lcard E14-140. Для построения графиков давлений требовалось произвести поканальную разбивку и масштабирование в соответствии с тарировочными коэффициентами. Для этой цели были разработаны такие программные продукты, как Parser и Cutter. Первый из них,

принимая на вход файл с данными от всех шестнадцати каналов разбивал его на шестнадцать отдельных файлов. Каждый из сгенерированных файлов соответствовал одному каналу. Второй программный продукт преобразовывал файлы данных с высокоскоростного АЦП, разбивая их на последовательные отрезки и помещая в отдельные файлы, которые могут быть легко обработаны в дальнейшем, поскольку офисные пакеты обработки таблиц имеют ограничение в 65 000 строк. После построения каждого отдельного графика они наносились на общую координатную плоскость.

На рис. 10 цифрой 1 обозначено давление в ресивере кислорода, а цифрой 2 в ресивере водорода. На графике давлений отчетливо видны моменты открытия и закрытия клапанов. Так резкий спад давлений в ресивере соответствует моменту открытия клапанов, а установившееся постоянное значение давления говорит о закрытии клапанов.

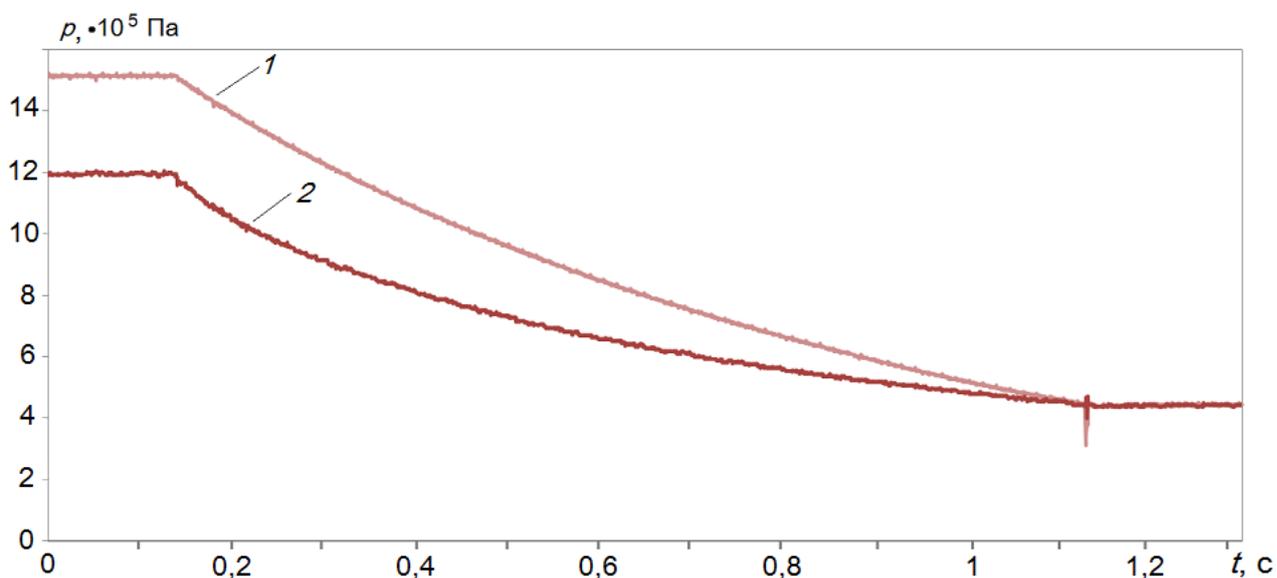


Рисунок 10. Профили давления газов в ресиверах в одном из экспериментов: 1 – давление кислорода, 2 – водорода

На рис. 11 цифрой 1 обозначено давление в коллекторе кислорода, а цифрой 2 – давление в коллекторе водорода. Цифрой 3 обозначено давление в камере сгорания, а цифрой 4 отмечено давление в бочке для продуктов.

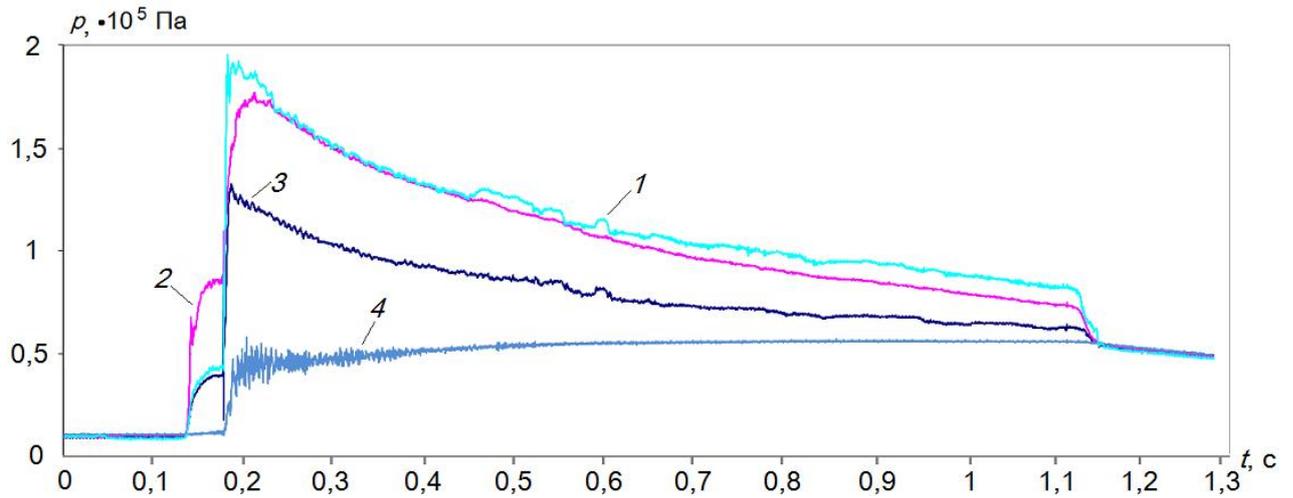


Рисунок 11. Осциллограммы давлений: 1 — полное на выходе КС, 2 — в коллекторе водорода, 3 — в «бочке», 4 — в коллекторе кислорода

Благодаря достаточно большому объему бочки для продуктов ($0,5 \text{ м}^3$), давление 4 в ней в течение устойчивого процесса возрастало незначительно. Резкий подъём давления связан с инициированием детонации скопившейся в «бочке» свежей смеси. Дальнейшие угасающие колебания давления вызваны воздействием в ней затухающих ударных волн.

1.7. Определение расходов газов. Погрешность вычислений

При определении расходов водорода и кислорода использовалась методика, подробно изложенная в монографии [52]. На основании уравнений сохранения, и используя условия критического истечения газов через форсунки, выведены следующие зависимости:

$$\frac{p}{p_0} = (1 + ct)^{-2\gamma/(\gamma-1)}; \frac{\rho}{\rho_0} = (1 + ct)^{-2/(\gamma-1)}; \frac{T}{T_0} = (1 + ct)^{-2}; \quad (4)$$

$$\frac{G}{G_0} = (1 + ct)^{-(\gamma+1)/(\gamma-1)}; G_0 = 2V_0\rho_0c/(\gamma - 1); V = (G_0/\rho_0)(1/c)\ln(1 + ct),$$

где $\frac{p}{p_0}$, $\frac{\rho}{\rho_0}$, $\frac{T}{T_0}$, $\frac{G}{G_0}$ — отношение текущих и начальных давлений, плотностей, температур и расходов газов, соответственно, V — текущие значения вытекшего объёма газа в момент времени t ; индекс «0» соответствует начальным параметрам газа при $t = 0$; коэффициент c определяется по формуле:

$$c = [2/(\gamma + 1)]^{1/(\gamma-1)} \cdot [(\gamma - 1)/2] \cdot \frac{S_f \mu}{V_0} \sqrt{[2\gamma/(\gamma + 1)] \cdot (p_0/\rho_0)}, \quad (5)$$

где S_f – площадь наименьшего сечения в системе подачи, μ – коэффициент расхода, V_0 – объем ресивера; p , ρ и T – текущие параметры газа в ресивере.

При использовании данной методики для расчёта расходов через форсунки 2 в камеру сгорания 3 необходимо учитывать следующие обстоятельства (рис. 12). Газ перед попаданием в отверстия форсунки 2 проходит через трубопровод 4, клапан 5, подводящий трубопровод 6 и коллектор 7, в сумме составляющих некоторый объём ΔV , со стенками которого возможен теплообмен.

Поэтому расход кислорода и водорода определялся по-разному. Это объясняется их различной молекулярной массой и, как следствие, соответствие адиабатичности истечения. В частности, истечение кислорода из ресивера считалось адиабатическим, так как его коэффициент c близок к постоянной величине на интервале расходов, соответствующем периоду существования НСД. Однако истечение водорода иногда нельзя считать адиабатическим, так как коэффициент c уменьшается в течение эксперимента.

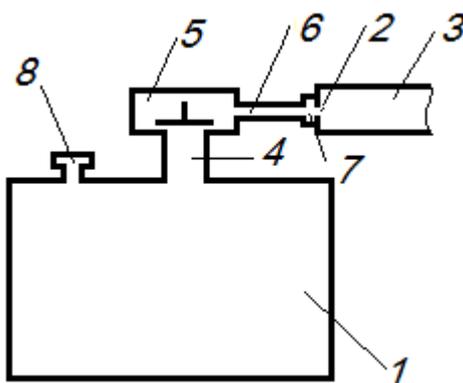


Рисунок 12. Схема ресивера объема V_0 и тракта подачи топливных компонентов объемом ΔV [52]

Определение расхода кислорода

Для реальной форсунки, имеющей множество мелких отверстий с неопределённым профилем сечения и входа (изготовленных, например,

накаткой), определение значения S_f вызывает затруднения. При выборе значения коэффициента расхода μ нельзя также точно идентифицировать и профиль сечения отверстия со стороны входа. Поэтому для определения постоянной c использовались экспериментальные данные, а именно, осциллограммы давления в ресивере. Для этого высчитывались коэффициенты c из первого уравнения (4):

$$c = \left[\left(\frac{p_i}{p'} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - 1 \right] \frac{1}{t_i}, \quad (6)$$

где p' – начальное, а p_i – текущее значение давления в момент времени t_i .

Вычисленные таким образом значения c усреднялись, и итоговая величина использовалась для вычисления расхода кислорода. Коэффициент c для проведенных экспериментов, составлял в среднем $0,248 \pm 0,003$. Таким образом, отклонение в его вычислении было в пределах 1,2 %.

Определение расхода водорода

В тех случаях, когда коэффициент c значительно уменьшался, вычисления производились путем дифференцирования по известной формуле:

$$G = -V_{0H} \rho_{0H} \frac{d \left(\frac{p_H}{p_{0H}} \right)^{\frac{1}{\gamma}}}{dt}. \quad (7)$$

Впоследствии строился график расхода топлива, величины имели некоторый разброс значений в разные моменты времени, поэтому их величина в дальнейшем аппроксимировалась полиномиальной функцией шестого порядка. Максимальное отклонение между вычисленным значением среднего расхода на отрезках длиной 32 мс и усредняющей кривой составляло 1,5 %.

Производилась оценка среднеквадратичного отклонения расхода топлива и окислителя. Основной вклад в погрешность измерения вносит погрешность определения плотности газов истекающих из форсунок, поскольку температура на экспериментальном стенде в различных экспериментах могла варьироваться в пределах 293 ± 5 К и поэтому плотность также могла отличаться на ± 2 %. В итоге, среднеквадратичное отклонение определения расходов составляло 3,65 %.

1.8. Разработка специализированного программно-аппаратного комплекса для видеосъемки детонационных волн

В работе был выделен ряд направлений, позволяющих улучшить качество данных, получаемых при проведении экспериментов, а также ускорить время их обработки. Среди них стоит отметить как программные, так и аппаратные средства, указанные в табл. 2. Программные способы отмечены в правом столбце и были реализованы и описаны в начале главы. Аппаратные способы обработки данных описаны в левом столбце и были также реализованы в работе. Особенно стоит выделить разработку специализированного прибора для видеорегистрации детонационных волн, поскольку это позволит увеличить разрешение видеосъемки без существенной потери качества изображений. Подробнее разработка прибора описана в работах [53–56, 64–68]. Ниже приводятся результаты тестирования программно-аппаратного комплекса, включающего как разработанный прибор, так и программное обеспечение для считывания с прибора и обработки данных.

Таблица 2. Способы оптимизации при обработке данных эксперимента

Обработка данных эксперимента			
аппаратная		программная	
изображений	датчиков	изображений	датчиков
1) Настройка разрешения	Преобразователь сигнала для	1) Сшивка	1) Parser
2) Минимизация длины строки и их количества	низковольтных датчиков с	2) Свертка	2) Cutter
3) Ускорение передачи данных с коммутатора сенсора	дифференциальным выходом	3) Разбиение видеопотока на «папки»	3) Преобразование Фурье
4) Параллельная обработка (без использования центрального процессора)		4) Вычисление абсолютного времени для волны на изображении	

Основная идея разработки специального устройства для исследования НДС заключается в том, что большая площадь матрицы светочувствительного сенсора при видеосъемке НДС не используется. Полезные данные содержатся только в одной строке, при том, что архитектура серийных устройств рассчитана на обработку или всей матрицы или какого-то минимального «окна» шириной не менее 8-ми строк при максимальной кадровой частоте (рис. 13). Таким образом, реальные потребности в объеме памяти, и что важнее того, к пропускной способности памяти устройства на специализированном приборе будут гораздо менее жесткими. В итоге специализированное устройство будет проще производимых устройств, будет надежнее за счет меньшей рассеиваемой мощности и теплонапряженности.

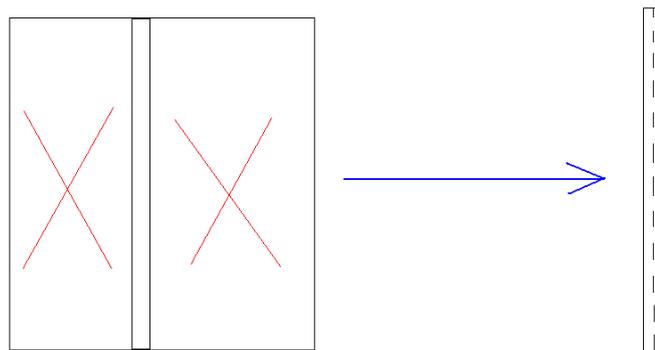


Рисунок 13. Сравнение серийного устройства со специализированным прибором

Для достижения поставленной цели были проделаны следующие шаги: разработка блок-схемы устройства, разработка схемотехники, разработка микропрограммного кода устройства. После проведения проектировочных работ были изготовлены печатные платы, и производился их монтаж, был собран корпус устройства, налажена система охлаждения компонентов. В процессе работы производилась разработка программного обеспечения для передачи данных на персональный компьютер, сохранения в оперативную память и отображения на экран [53, 54]. Отлаживался микропрограммный код, осуществляющий управление высокоскоростным сенсором, в частности

отвечающий за точную регулировку периодов экспозиции. Устройство основывается на сенсорах, разработанных российскими учеными и обладающими параметрами на уровне лучших мировых разработок.

На рис. 14 представлена фотография прибора, установленного на штативе.



Рисунок 14. Прибор, установленный на штативе

Проведен эксперимент с одновременной видеосъемкой одного наблюдательного окна разработанным устройством и высокоскоростной видеокамерой Photron SA5. Так на рис. 15(а) приведено изображение инициирования детонационной волны, зарегистрированное при помощи разработанного устройства, а на рис. 15(б) – изображение, зарегистрированное видеокамерой Photron SA5. Видно, что разработанное устройство нуждается в доработке, а именно, в устранении шумов, возникающих при закрытом объективе. Однако это не мешает использовать прибор для видеосъемки детонационных волн, о чем подробно написано в работе [97].

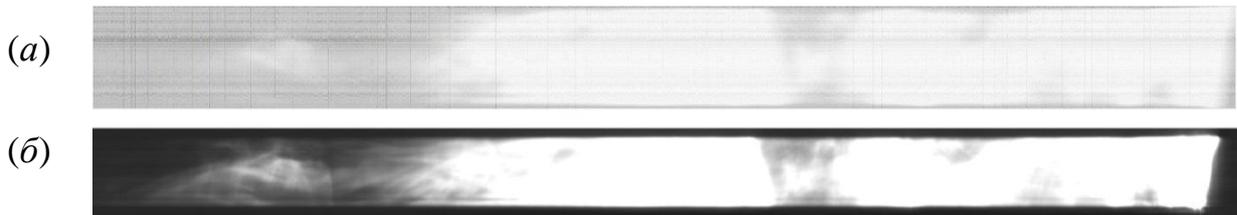


Рисунок 15. Момент инициирования детонации топливно-воздушной смеси, снятый разработанным прибором (а) и видеокамерой Photron SA5 (б)

Производилась оценка чувствительности разработанного прибора. При емкости ячейки 20 тысяч электронов (ke^-) и полной разрядности АЦП 10 бит, получаем эквивалентный заряд, необходимый для перехода значения младшего бита АЦП из нуля в единицу равный $20ke^-/2^{10} = 20e^-$. Эта величина чуть ниже документированного производителем уровня шума, лежащего в пределах $22e^-$. Что говорит о необходимости точной настройки смещения на данном сенсоре или исключения младшего бита АЦП из рассмотрения, поскольку лежащее в нем значение не превышает порог шума. Производилась оценка нелинейности отклика светочувствительной ячейки на освещенность. Она складывается из погрешности чувствительности собственно ячейки на уровне 1,5 % и помехой вызванной работой усилителей строки матрицы. Суммарная величина отклонения составляет 5,3 % от максимального заряда ячейки. В работе [97] более подробно объясняется принцип определения нелинейности отклика сенсора на освещенность и объясняется, почему указанная погрешность практически не оказывает никакого влияния на точность определения скорости детонационных волн.

Выводы из главы 1

1. Спроектированы камеры сгорания и собрана экспериментальная установка, отлажена синхронизация работы экспериментальной установки и приборов, фиксирующих параметры процесса.

2. По результатам исследования установлено соответствие методов вычисления расходов компонентов топливной смеси по спаду давления в соответствующих ресиверах поставленным задачам. Обосновано различие в алгоритмах вычисления расходов водорода и кислорода.

3. Предложены оптические способы выявления НСД и их отличие от НМД.

4. Определены методы измерений. Разработано ПО для построения картины детонационных волн по серии изображений («сшивка») в систему волны, позволяющих определить структуру, скорость детонационных волн, а также течение в их окрестности. Имплементирован в программном коде алгоритм восстановления картины течений в камере по отдельным кадрам – кольцевая «свертка», позволяющая в режиме НСД отразить реальное течение в камере сгорания. Создана программа «parser» для восстановления поканальной разбивки давлений в камере сгорания, фиксируемых датчиками давления. Разработано ПО для построения x, t – диаграмм из исходных данных без повторения эксперимента.

5. Разработан прибор, способный конкурировать с существующими типами высокоскоростных видеокамер. Его преимуществами является то, что

- он не греется и не подвержен аварийным выключениям;
- основывается на сенсоре, разработанном отечественными учёными;
- имеет в 4 раза большую длину строки при той же кадровой частоте по сравнению с Photron SA5 (1098 против 512 пикселей при использовании одной строки);
- имеет высокую ремонтпригодность.

ГЛАВА 2. НЕПРЕРЫВНАЯ СПИНОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ В КАМЕРЕ ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ С ИСТЕЧЕНИЕМ К ЦЕНТРУ

НСД по схеме Б.В. Войцеховского [27] в камерах плоскорadiaльной геометрии с истечением к центру экспериментально изучалась ранее в метан–кислородных [46, 52] и топливовоздушных смесях [48, 52, 60]. Опыты выявили возможность детонационного сжигания в вихревых вариантах камер и химически малоактивных топлив, например, угля с воздухом. Для диагностики режимов необходимо иметь достоверную математическую модель НСД в таких камерах, которая ещё не создана к настоящему времени. Модель потенциального вихря лишь качественно описывала детонационные явления в вихревых камерах [48, 52].

Дальнейшее изложение данной главы следует работам [69–72] (общее проведение эксперимента и расчёта [69, 70], вычисление удельного импульса и тяги [71], измерение давлений в ПРК с истечением к центру приведено в работе [72]).

Здесь представлены экспериментальные результаты, которые определяют условия существования НСД для водород–кислородных смесей в плоскорadiaльной камере наружным диаметром $d_{in} = 80$ мм при периферийной подаче компонентов смеси вдоль радиуса камеры, а также проведено сравнение с расчётными данными из [69].

2.1. Постановка экспериментов

Экспериментальные исследования проведены в плоскорadiaльной камере с наружным диаметром $d_{in} = 80$ мм, расстоянием между параллельными стенками $\Delta = 5$ мм и варьируемым отверстием с внутренним диаметром d_{out} в одной из стенок, через которое происходит истечение продуктов, $d_{out} = 40, 30$ и 20 мм (рис. 16, табл. 3, см. рис. 6(a) и табл. 1). Раздельная подача компонентов

смеси в камеру сгорания в направлении центра осуществлялась через отверстия форсунок, равномерно расположенных по цилиндрической стенке.

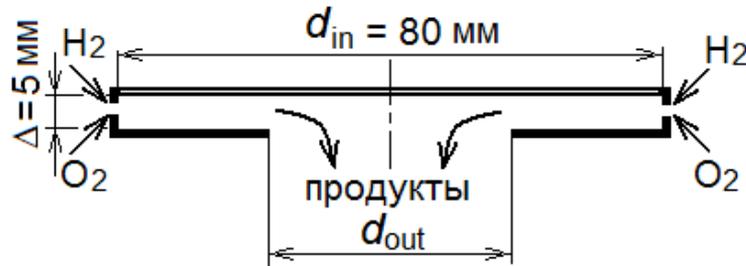


Рисунок 16. Схематичное обозначение элементов ПРК с истечением в центр на её поперечном сечении

Таблица 3. Геометрические параметры установки с ПРК с истечением к центру

d_{in} , мм	d_{out} , мм	Δ , мм	$S_{In\Delta}$, мм ²	V_t , л	$V_{гф}$, л	$V_{гох}$, л
80	40	5	12,57	430	4,05	1,83
	30	5				
	20	5				

Здесь $S_{In\Delta}$ – площадь сечения щели на входе в камеру, $V_{гох}$ – объём ресивера кислорода, $V_{гф}$ – объём ресивера водорода, V_t – объём ёмкости для продуктов.

Образующаяся смесь инициировалась пережиганием проволоочки с энергией разряда около 5 Дж. Истечение продуктов производилось в ёмкость $V_t = 0,43 \text{ м}^3$ (бочку) при начальном давлении $p_{i0} \approx 0,1 \cdot 10^5$ или $1 \cdot 10^5$ Па. По мере истечения продуктов давление в бочке возрастало. В одной из плоских стенок вдоль диаметра установлено окно из оргстекла, через которое наблюдался процесс в камере. Напротив выходного отверстия камеры окно закрывалось для устранения яркого свечения продуктов. Подсветка течения вдоль окна осуществлялась тонкими струйками ацетилена, подаваемых в камеру на противоположных сторонах окна вблизи цилиндрической поверхности. Начальные расходы компонентов $\text{H}_2\text{--O}_2$ смеси изменялись в диапазонах: водорода $G_{гф} = 0,5\text{--}10$ г/с, кислорода – $G_{гох} = 10\text{--}44$ г/с. Удельный расход смеси

составлял $g_{\Sigma} = (G_{\text{ок}} + G_f)/S_{\text{in}\Delta} = 3,6\text{--}37,9 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, а коэффициент избытка горючего $\phi = 0,1\text{--}2,58$. Здесь площадь поперечного сечения камеры на входе вычислялась по формуле $S_{\text{in}\Delta} = \pi \cdot d_{\text{in}} \cdot \Delta$ (см. табл. 3).

Процесс в камере сгорания фотографировался высокоскоростной камерой Photron FASTCAM SA1.1 675K-M3. Благодаря разработанному программному обеспечению из последовательности кадров собиралось изображение детонационных волн. В результате конструировалось течение (фоторегистрограмма) в системе волны с некоторым искажением масштаба. Перенос изображений с видеокамеры на персональный компьютер требовал значительных временных затрат, что объясняется рекурсивным поиском элементов файловой системой в папке. Во избежание таких временных затрат, максимальное количество элементов в папке было ограничено двадцатью тысячами. Это позволило значительно сократить время на обработку данных. Одновременно производилась съёмка фоторегистратором с падающим барабаном [52].

Одновременно с фоторегистрацией производилось измерение давлений в ресиверах кислорода и водорода ($p_{\text{гок}}$ и $p_{\text{гф}}$), коллекторах ($p_{\text{мох}}$ и p_{mf}), в камере на расстоянии 2 мм от цилиндрической поверхности (p_{cl}), статическое и полное давления на выходе из камеры ($p_{\text{сз}}$ и $p_{\text{сз0}}$), в бочке (p_t). Для измерения использовались датчики S-10 фирмы WIKA (Австрия) с классом точности 0,5 %.

2.2. Результаты экспериментов

2.2.1. Опыты с начальным противодавлением $p_{t0} \approx 0.1 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Инициирование и развитие НСД. На рис. 17 приведены фоторегистрограммы одного и того же опыта, включающие момент инициирования (яркая вспышка справа) и дальнейшее развитие детонационного процесса в камере сгорания, снятые видеокамерой рис. 17(a) и

фоторегистратором с падающим барабаном рис. 17(б). Видно, что детонационная волна формируется за 1–2 периода времени между ПДВ, а устойчивая НСД – примерно через 7 таких периодов (через 0,5 мс после инициирования). В других опытах длительность переходного процесса не превышала 1 мс. Сравнение фоторегистрограмм наглядно показывает правомерность «сшивки» кадров по одной строке для восстановления течения в системе волны.

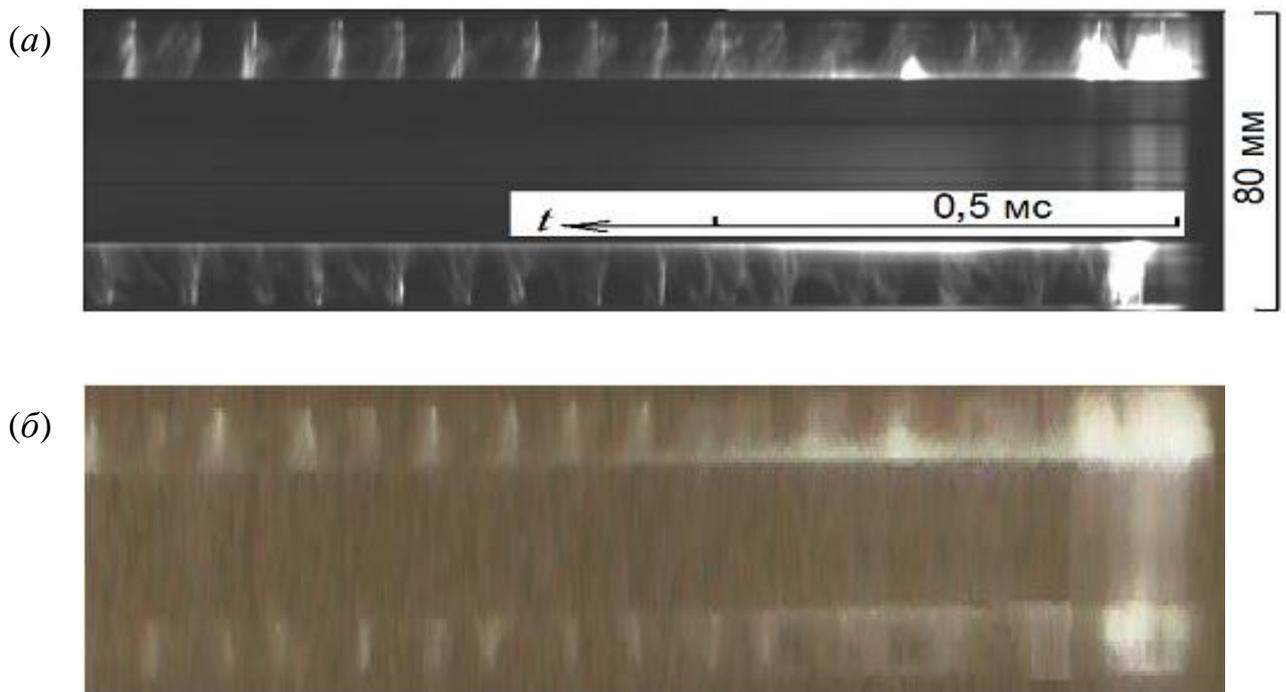


Рисунок 17. Фоторегистрограммы инициирования НСД в камере с $d_{\text{out}} = 40$ мм, зафиксированные: (а) видеокамерой, (б) фоторегистратором с падающим барабаном. До момента инициирования: $g_{\Sigma} = 11$ кг/(с·м²), $\phi = 0,73$, $p_{c10} = 0,12 \cdot 10^5$ Па, $p_{i0} = 0,14 \cdot 10^5$ Па. Через 1 мс после инициирования: $D = 1,82$ км/с, $n = 2$, $p_{c1} = 0,55 \cdot 10^5$ Па, $p_t = 0,17 \cdot 10^5$ Па

На фоторегистрограмме, восстановленной «сшивкой» по одной строке (см. рис. 17(а)), не удастся определить направление вращения ПДВ в силу способа восстановления фоторазвертки (течения в системе волны). Однако фоторегистратор с падающим барабаном позволяет это сделать. По

фоторегистрограмме на рис. 17(б) видно, что в верхней части окна ПДВ движутся слева направо – направления движения изображения волн и пленки совпадают, поскольку ПДВ фиксируются отчетливо. Наоборот, в нижней части окна они имеют встречные направления (волны движутся справа налево), поэтому изображения ПДВ размыты. Для определения направления вращения ДВ было разработано программное обеспечение, осуществляющее «сшивку» не по одной строке из каждого кадра (как сделано на рис. 17(а)), а по двум строкам изображения, расстояние между которыми может быть вычислено исходя из скорости ПДВ и кадровой частоты. Если направление и порядок следования пары строк в новом изображении совпадают — получится равномерное изображение (рис. 18(а), фрагмент обозначенный стрелкой), в ином случае получится ступенчатое изображение с неравномерным градиентом (рис. 18(б)).

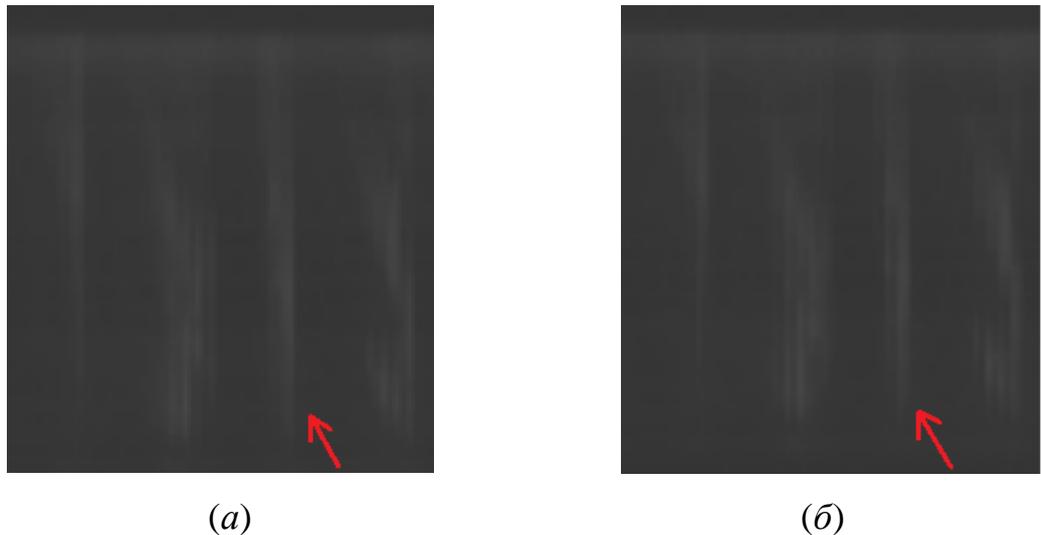


Рисунок 18. Определение направления движения ДВ в ПРК с истечением в центр с диаметром выходного отверстия 40 мм при $p_{i0} \approx 0,1 \cdot 10^5$ Па, где порядок следования строк изображения совпадает с направлением движения ПД (а) и противоположен направлению движения ПД (б)

Время на обеих фоторегистрограммах отсчитывается в одну сторону – справа налево (в одну сторону от момента инициирования). Однако видео,

снятое видеокамерой с частотой 400000 кадров в секунду, используя специальное программное обеспечение, можно преобразовать в несколько десятков кадров в секунду, и наблюдать движение волн в окне.

Фоторегистрограммы позволяют определять четность количества ПДВ. При четном количестве волны фиксируются одновременно в верхней и нижней части окна, а при нечетном – со сдвигом на половину периода между волнами. При изменении скорости ПДВ на половине окружности камеры и сохранении их количества, возможно небольшое отклонение от этого правила (времени появления волн в окне). При смене их количества, наблюдается хаотичность их появления в окне.

Характерные фрагменты фоторегистрограмм устойчивого процесса НСД для камер с выходным отверстием диаметром $d_{\text{out}} = 40$ (а), 30 (б) и 20 мм (в) приведены на рис. 19. Фрагменты охватывают промежуток времени 0,5 мс. Высота фоторегистрограмм соответствует наружному диаметру камеры $d_{\text{in}} = 80$ мм, а внутренняя темная полоса – выходному отверстию d_{out} . Приведенные фоторегистрограммы НСД зарегистрированы для смесей, близких к стехиометрии ($\phi \approx 1$). На рис. 19(а) и 19(б) зафиксировано 4, а на рис. 19(в) – 7 ПДВ на окружности камеры. Волны устойчивые, однако, их локальная скорость на обороте волны может отклоняться от среднего значения (при четном числе волн они подходят к окну на противоположных участках камеры не всегда в одинаковое время). При одинаковых расходах смеси давление в камере изменяется примерно обратно пропорционально площади выходного сечения, а при одном и том же выходном сечении – пропорционально удельному расходу g_{Σ} . С уменьшением d_{out} степень расширения продуктов за фронтом ПДВ в камере уменьшается, и они начинают ярче светиться (см. рис. 19(а) и 19(в)). Основные параметры НСД, соответствующих рис. 19, приведены в табл. 4, а диапазоны изменения параметров на протяжении всего эксперимента, вычисленные по формулам (4,7) – в табл. 5. Стрелка показывает изменение параметров в течение эксперимента. В таблицах приведены отношение скорости к скорости Чепмена–Жуге (D/D_{CJ}). В данных

экспериментах она превышает границу в 0,7 от Чепмена–Жуге во всех экспериментах, кроме эксперимента с пониженными давлениями подачи при $d_{\text{out}} = 20$ мм. Здесь D_{CJ} – экспериментальные значения идеальной детонации Чепмена–Жуге покоящейся водород–кислородной смеси при нормальных условиях [61]. Увеличение количества ПДВ от $n = 4$ в камерах (а) и (б) до $n = 7$ в камере (в) приводит к уменьшению их интенсивности (величины D/D_{CJ}). Поток продуктов на выходе у отверстия диаметром d_{out} дозвуковой ($p_{c30}/p_{c3} < 1,8$). То есть, звуковая поверхность формируется ниже по потоку. Потери полного давления на выходе из камеры примерно равны динамической составляющей давления вблизи форсунок, так как $p_{c1} \approx p_{c30}$.

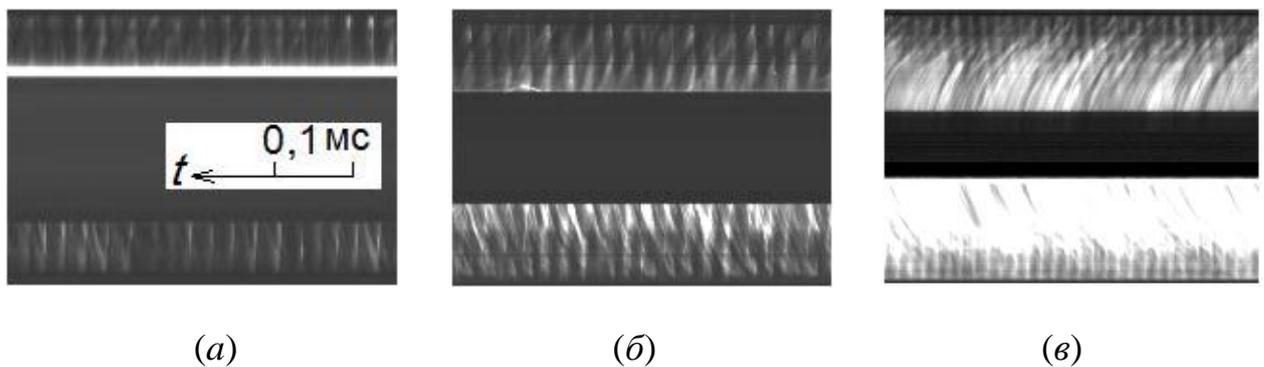


Рисунок 19. Фоторегистрограммы НСД в водород–кислородной смеси ($\phi \approx 1$) с начальным противодавлением $p_{10} \approx 0,1 \cdot 10^5$ Па для камер с диаметром выходного отверстия d_{out} : (а) – 40 мм, (б) – 30 мм, (в) – 20 мм

Таблица 4. Параметры НСД для типичных режимов без противодавления

Камера	d_{out} , мм	G_{Σ} , кг	g_{Σ} , кг/(с·м ²)	ϕ	p_t	p_{c1}	p_{c3}	p_{c30}	f , кГц	n	D , км/с	D/D_{CJ}	h , мм	$I_{\text{sp,h-c}}$, с
					$\cdot 10^5$ Па									
а	40	46,2	36,8	1,0	0,45	1,66	1,13	1,66	38,5	4	2,42	0,853	6	262,4
б	30	27,85	22,2	1,02	0,84	1,53	1,29	1,5	37,2	4	2,34	0,826	5	167,2
в	20	19,05	15,2	1,12	0,58	1,75	1,6	1,75	57,1	7	2,05	0,7	3	132,8

В табл. 5 приведены диапазоны изменения параметров, а также их пограничные значения, при которых НСД в камере сгорания без

противодавления еще возможна. Количество волн в экспериментах, как правило, убывает со временем, что связано с понижением расхода. Однако в некоторых экспериментах сразу после инициирования количество волн было меньше, чем через 50 мс после него. Это объясняется, прежде всего, характером развития процесса во времени. Для эксперимента с $d_{out} = 30$ мм были выявлены два диапазона существования НСД, между которыми при расходах 11–13,22 кг/(с·м²) детонации не наблюдалось. Причина этого, вероятно, кроется в несовершенстве установки и, как следствие, неравномерности подачи газов.

Таблица 5. Диапазоны изменения параметров НСД в камере сгорания без противодавления (стрелка показывает изменение параметров в течение эксперимента)

d_{out} , мм	g_{Σ} , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	D , км/с	D/D_{CJ}	p_{c1}/p_a	Процесс
40	44,4→5,1	1,41→0,37	27,3–41,6	6→2	2,48→1,65	0,72	2,19→0,84	НСД
30	11→4,4	1→0,77	22,3–27,3	5→2	2,3→1,8	0,71	1,53→1,0	НСД
	31,8→13,22	2,0→0,77	27–40	3, 5, 4	2,2→1,8	0,75	2,17→1,0	НСД
20	31,4→8,25	1,75→0,78	32–61	6, 7, 5	2,62→1,68	0,70	2,3→1,25	НСД

2.2.2. Физическая модель процесса

Восстановленная схема течения для ПРК с истечением к центру

Исходными данными для определения структуры ДВ являлись изображения с высокоскоростной видеокамеры, преобразованные в соответствии с разработанными алгоритмами. На рис. 20 представлены изображения одной волны (а) и восстановленная картина двух волн в КС (б). Разрешение съемки, использованное при построении – 384 x 1 пикселей на окно; стрелка показывает направление вращения ПДВ. Структура течения на

фоторегистрограммах искажена, поскольку при одинаковой скорости развертки видеокамеры и фотопленки, тангенциальные составляющие скорости элементов ПДВ и течения в их окрестности изменяются пропорционально радиусу камеры. Поэтому для реального изображения ПДВ с линиями тока фоторазвертку необходимо свернуть в кольцо, что удалось сделать благодаря разработанному программному обеспечению.

На основании этих данных разработана схема течения для КС с истечением к центру и построена модель процесса (рис. 21). Исходные компоненты окислителя и горючего I разделяются в кольцевую камеру 2 через ряд равномерно расположенных вдоль цилиндрической поверхности камеры отверстий.

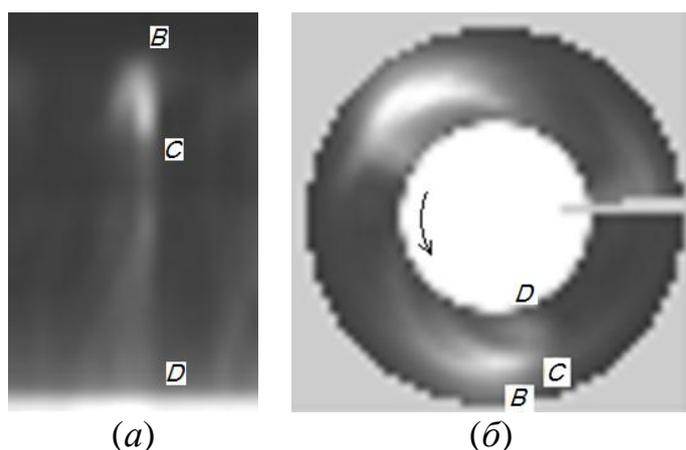


Рисунок 20. Фрагмент развертки волн НСД в ПРК с истечением к центру на плоскость (а) и восстановленная картина течений в ПРК (б)

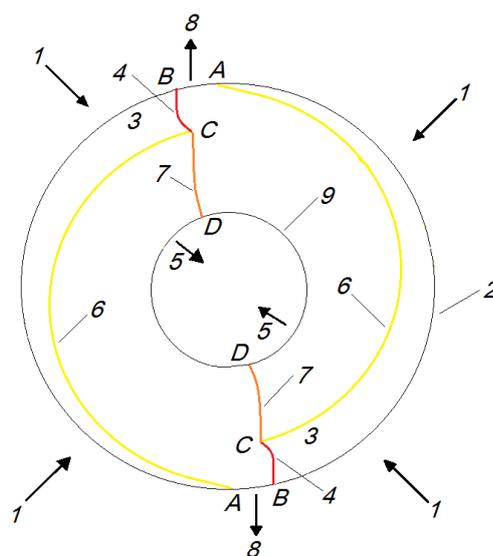


Рисунок 21. Структура ПДВ и течение в их окрестности для ПРК с истечением к центру

На некотором расстоянии от цилиндрической поверхности происходит перемешивание компонентов и по образующейся смеси 3 перпендикулярно потоку распространяется одна или несколько ПДВ 4. Высота фронта 4 устанавливается близкой к околосверхкритической для существования детонации. Количество ПДВ определяется химической активностью и степенью перемешивания компонентов, а также диаметром камеры. Оно возрастает с увеличением этих параметров (на рисунке изображены две ПДВ). За фронтом ПДВ в волне разрежения, примыкающей к поверхности Чэпмена-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 контактными разрывом 6, который в общем случае трансформируется во фронт горения. Поэтому, наряду с детонационным горением в камере существует и обычное горение, вызываемое также нагретыми стенками и продуктами в вихревых зонах. Развитое горение ослабляет детонационные волны. На рис. 20 заметно, что шлейф 7 (косая ударная волна) отклоняется вперед и его проекция на окружность выходного отверстия опережает аналогичную для фронта детонационной волны. Были реализованы режимы ПД и НМД. Режимы НМД были аналогичны процессу в плоских камерах наблюдавшемуся ранее.

2.2.3. Удельный импульс

Для приведённых в табл. 4. значений давлений вычислялся удельный импульс как отношение силы тяги F к расходу водород–кислородной смеси G_{Σ} [73, 74]. Сила тяги вычисляется по формуле:

$$F = \int_S [p + \rho v^2 - p_a] dS = (K p_{c30} - p_a) S_{\Delta}, \quad (8)$$

где ρ – плотность, v – скорость, p_a – противодействие, dS – площадь элементарной трубки тока, S_{Δ} – площадь выходного сечения камеры сгорания, причем

$$K = (1 + \gamma M^2) / [1 + (\gamma - 1)(M^2/2)]^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad (9)$$

здесь M – число Маха, γ – показатель политропы (для продуктов $\gamma \approx 1,25$, для исходной газовой смеси $\gamma \approx 1,4$). Поскольку отношение полного p_{c30} и статического p_{c3} давлений на выходе из камеры равно

$$p_{c30}/p_{c3} = [1 + (\gamma - 1)(M^2/2)]^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad (10)$$

становится возможным оценить число Маха и вычислить значение K . Вычислив разность между силой тяги горячих продуктов при НСД F_h и результатом для холостого выстрела F_c , получим величину «чистого» удельного импульса по формуле:

$$I_{sp} = (F_h - F_c) / G_{\Sigma} / g, \quad (11)$$

где g – ускорение свободного падения.

Результаты вычислений приведены в табл. 4. Видно, что с ослаблением детонационных волн удельный импульс уменьшается. Однако столь значительное уменьшение удельного импульса говорит, скорее всего, о снижении полноты сгорания с уменьшением интенсивности ПДВ. Сравнение результатов с работами [39, 94] показывает несколько большие значения удельного импульса (авторами показаны значения в диапазоне 100–160 с) для плоскорадиальной камеры сгорания в отличие от результатов для цилиндрической камеры с конусной вставкой диаметром 50 мм, однако это вызвано, прежде всего, отличиями в удельных расходах. Так в работах [39, 94]

указан массовый расход водород–кислородной смеси на уровне 0,056 кг/с, при котором вычислялась тяга, в то время как в проведенных экспериментах расходы лежали в пределах 46,2–19,05 кг/с. Понижение удельного импульса при переходе из детонации в горение, описанное в работах [39, 94] при постоянном расходе и соотношении компонентов говорит об эффективности применения НСД на ракетном двигателе.

При оценке среднеквадратичного отклонения силы тяги учитывались погрешности вычисления скорости, давлений, объема, плотности и температуры газов. Основной вклад в погрешность определения силы тяги вносило отклонение атмосферного давления от постоянной величины. В результате возможная погрешность составляла 2,83 %.

2.2.4. Опыты с начальным противодавлением $p_{t0} = 1 \cdot 10^5$ Па

Характерные осциллограммы давлений в камере с выходным отверстием $d_{out} = 40$ мм приведены на рис. 22. Резкий подъём давления в камере и бочке соответствует моменту инициирования детонации в камере. В течение 0,5 с после инициирования существовала устойчивая НСД в камере сгорания с $n = 4$, затем появилось множество акустических волн на фоне обычного горения. На рис. 22 граница перехода детонации в горение ориентировочно обозначена штриховой линией. Фоторегистрограммы ПДВ практически не отличались от приведенных на рис. 20(a), однако скорости ПДВ составляли величины $D/D_{Cl} = 0,67 \pm 0,02$, т.е. волны ослаблены. На пределе окончания НСД перепад давления на форсунках водорода и кислорода составил всего $p_{mf} - p_{cl} \approx 0,1 \cdot 10^5$ Па и $p_{mox} - p_{cl} \approx 0,15 \cdot 10^5$ Па, соответственно, при удельном расходе водород–кислородной смеси $g_{\Sigma} \approx 4,45$ кг/(с·м²). Статические давления в камере и бочке практически сравнялись, и в них господствует дозвуковое течение, за исключением областей за фронтами ПДВ до поверхности Чепмена–Жуге. Очевидно, что давление в камере в начале опыта (сразу после инициирования) зависит от расхода смеси. Однако в дальнейшем оно определяется в основном растущим противодавлением.

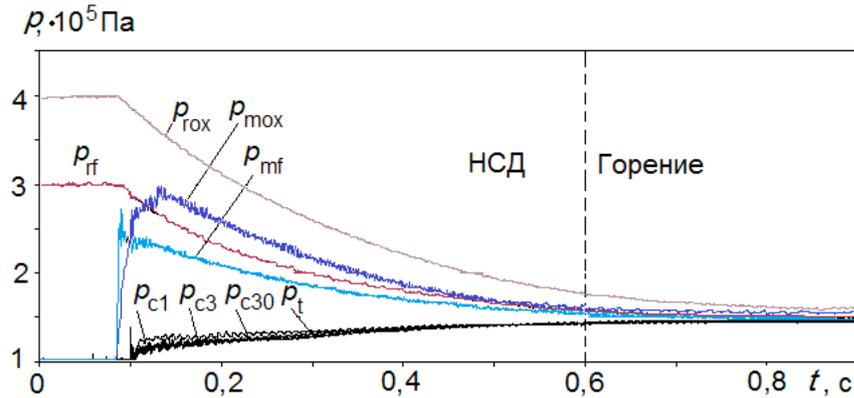


Рисунок 22. Давления в системе подачи и в камере сгорания при начальном противодавлении в бочке $p_{t0} = 1 \cdot 10^5$ Па; $d_{out} = 40$ мм

В аналогичном эксперименте с повышенными давлениями подачи НСД имеет место в диапазоне расходов $25,5 \rightarrow 11,6$ кг/(с·м²). Таким образом экспериментально определён нижний предел существования НСД по удельному расходу $g_{\Sigma} \approx 4,45$ кг/(с·м²) (см. табл. 6), а достигнутое верхнее значение $g_{\Sigma} = 25,5$ кг/(с·м²) ограничено возможностями установки.

Таблица 6. Диапазоны изменения параметров НСД в камере сгорания с противодавлением

d_{out} , мм	g_{Σ} , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	D , км/с	D/D_{CJ}	Процесс
40	11 → 4,45	0,9 → 0,2	22,3–27,4	5 → 3	2,3 → 1,4	0,69	НСД
	25,5 → 11,6	1,2 → 0,35	24,1–28,6	4	2,668 → 1,7	0,65	НСД
30	9,55 → 4,46	2,5 → 0,87	32,2–44,4	4–5	2,79 → 2,02	0,73	НСД

Подобная картина развития НСД наблюдалась и в камере с $d_{out} = 30$ мм. ПДВ со скоростью $D/D_{CJ} = 0,73 \pm 0,03$ в количестве $n = 4-5$ (менялись в течение опыта) существовали до $g_{\Sigma} \approx 5$ кг/(с·м²) и $\phi = 0,87$. Опыты при $d_{out} = 20$ мм и $p_{t0} = 1 \cdot 10^5$ Па не проводились.

2.3. Анализ результатов

Анализ осциллограмм давлений

Уровни давлений с датчиков передавались на АЦП и записывались на ПК автоматически, что избавляло от необходимости производить достаточно трудоемкие замеры значений, отображенных на экране осциллографа. Разработанное программное обеспечение осуществляло поканальную разбивку, после чего умножением на нормировочные коэффициенты производился перевод напряжений в давления. В момент открытия клапанов давления в коллекторе водорода и кислорода изменялись по-разному. Так давление кислорода понижалось плавно с практически постоянной скоростью, в то время как скорость изменения давления водорода вначале максимально, а через 0,05 с. снижается медленнее. Это объясняется низкой теплоемкостью водорода и потерей энергии на нагрев стенок коллектора.

В результате экспериментов показано сильное влияние процессов в камере на систему подачи смесевых компонентов, особенно водорода (рис. 23). Обозначение кривых: $1,1'$ - p_{mf} ; $2,2'$ - $p_{моx}$; $3,3'$ - p_{cl} ; $4,4'$ - p_t .

Осциллограммы приведены для камеры (а) при одинаковых начальных условиях в системах подачи компонентов смеси. Видно, что до инициирования (резкий подъём давления p_{cl} и p_t) кривые совпадают, а после – увеличивается давление в коллекторах водорода (кривая 1) и кислорода (кривая 2), а расходы этих компонентов уменьшаются. Несмотря на то, что в среднем обеспечивается критический перепад давления на форсунках, волны сжатия от ПДВ проникают в систему подачи и даже влияют на расход газов из ресиверов. Это является одной из особенностей в камерах с НСД [52], а в камерах плоскорадиальной геометрии с истечением к центру проявляется наиболее ярко. Следует отметить, что давление в ёмкости возрастает не пропорционально количеству истекающих продуктов, а значительно быстрее (в 5 раз за 100 мс при уменьшении расхода всего на 10 %). Затем давление в ёмкости слабо растёт, а в конце истечения продуктов даже уменьшается за счёт их охлаждения на стенках.

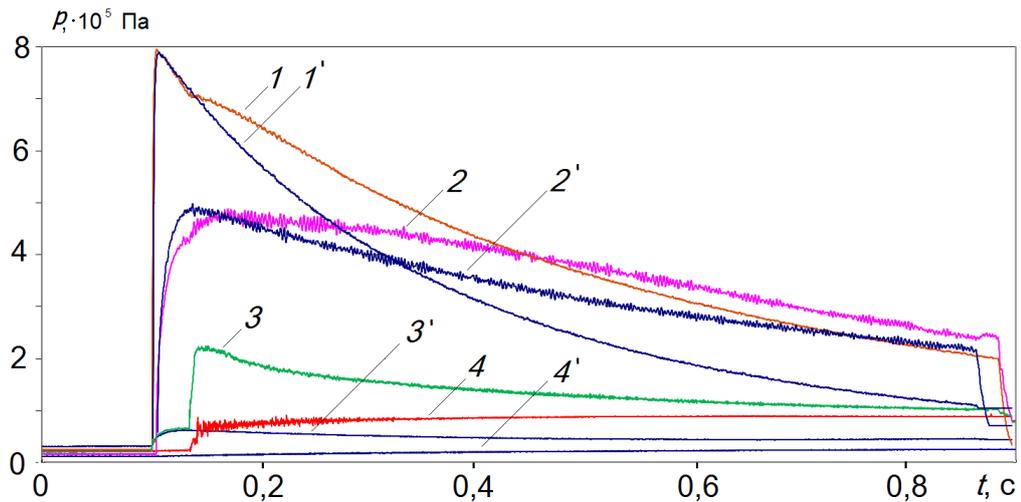


Рисунок 23. Давления в системе подачи компонентов смеси в коллекторе (p_{mf} и $p_{моx}$), в камере (p_{cl}) и в ёмкости (p_t) при холостом выстреле ($1' - 4'$) и НСД ($1 - 4$), соответственно, при истечении в среду с начальным противодавлением $p_{i0} = 0,1 \cdot 10^5$ Па

2.3.1. Влияние противодавления на существование детонационных волн

С увеличением начального противодавления влияние процессов в камере на систему подачи возрастает, однако снижается относительный рост давления в бочке, так как относительная доля продуктов в меньшей степени нагревает её содержимое. При $p_{i0} = 0,23 \cdot 10^5$ Па за время 100 мс давление в бочке увеличилось в 3,5 раза, а при $p_{i0} = 1 \cdot 10^5$ Па – только на 45 %. В последнем случае истечение из коллекторов в камеру хотя и оставалось критическим (см. рис. 22), но наблюдалось более сильное воздействие процессов в камере на систему подачи, особенно водорода. Уменьшение давления в коллекторе водорода происходило практически пропорционально уменьшению давления кислорода, в то время как при $p_{i0} = 0,1 \cdot 10^5$ Па наблюдалось относительно более быстрое уменьшение этого давления (см. рис. 23, кривые p_{mf} и $p_{моx}$ пересеклись).

2.3.2. Параметры детонационных волн и область существования НДС

Высота фронта ПДВ h , определённая по точке его излома из ряда фоторегистрограмм на рис. 20, составляет: для камеры (а) - ~ 6 , (б) - ~ 4 и (в) - ~ 3 мм. От точки излома обычно отходит яркосветящаяся линия, которая представляет собой контактный разрыв или ударную волну – элемент «ножки Маха».

Зависимости частоты вращающихся ПДВ f от удельного расхода смеси g_{Σ} для трех значений внутреннего диаметра камеры $d_{\text{out}} = 40$ мм (а), 30 мм (б) и 20 мм (в) представлены на рис. 24.

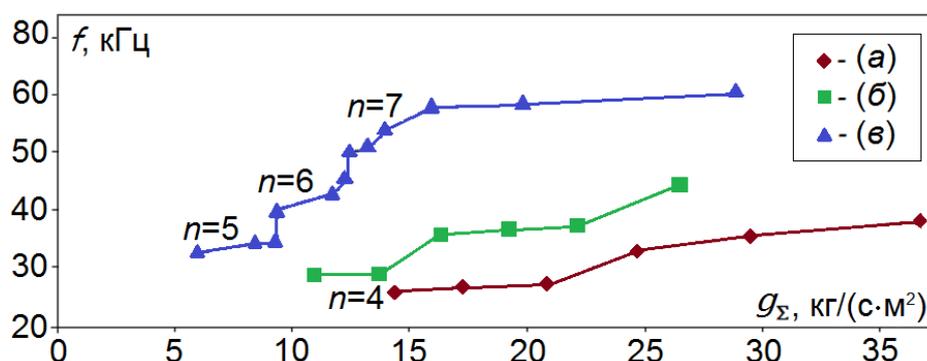


Рисунок 24. Частота вращающихся ПДВ f (кГц) в зависимости от удельного расхода $\text{H}_2\text{--O}_2$ смеси g_{Σ} (кг/(с·м²)) для камер $d_{\text{out}} = 40$ мм (а), 30 мм (б) и 20 мм (в)

Видно, что при уменьшении площади выходного отверстия камеры частота вращающихся ПДВ возрастает. Это, как правило, связано с увеличением числа ПДВ. В диапазоне $g_{\Sigma} = 14\text{--}26$ кг/(с·м²) число ПДВ для камер (а) и (б) не изменилось, а в камере (в) это изменение существенно – до $n = 7$. Прямые скачки величины f при определённых значениях g_{Σ} соответствуют изменению числа волн на единицу. Минимальная частота, при которой ПДВ ещё существовало в камере (а), составляла $f_{\text{min}} = 12,8$ кГц при $n = 2$ и $g_{\Sigma\text{min}} = 5$ кг/(с·м²). В камере (б) эти минимальные значения составляли: $f_{\text{min}} = 17,7$ кГц при $n = 2$ и $g_{\Sigma\text{min}} = 3,6$ кг/(с·м²) (на рис. 24 не показаны). По

приведенным на рис. 24 значениям частоты ПДВ скорости НСД легко рассчитываются по формуле (1). Очень устойчиво количество ПДВ в камерах (а) и (б) – при изменении g_{Σ} в 3 раза количество волн не меняется.

Область реализованных режимов НСД водород–кислородной смеси в координатах g_{Σ}, ϕ приведена на рис. 25.

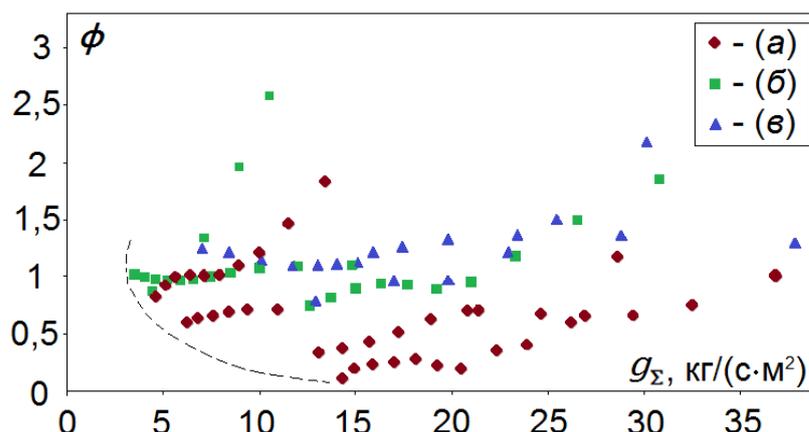


Рисунок 25. Область реализованной НСД водород–кислородной смеси в плоскорадиальной камере с истечением к центру; $d_{\text{out}} = 40$ мм (а), 30 мм (б) и 20 мм (в)

Из всей приведённой совокупности экспериментальных данных видно, что в камере плоскорадиальной геометрии НСД исследуемой смеси осуществима при достаточно низких значениях переменных: $g_{\Sigma} \geq 3,6 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ и $\phi \geq 0,1$. Нижние значения этих величин ориентировочно ограничены пунктирной линией. Верхние пределы существования НСД по этим параметрам в данной работе не определялись, и на рис. 25 приведены лишь те максимальные значения g_{Σ} и ϕ , при которых реализована НСД.

2.3.3. Сравнение экспериментальных и расчётных данных НСД

Как показано в работе [69], расчётные данные не сильно расходятся с экспериментом. Так, для камеры $d_{\text{out}} = 40$ мм прослеживается совпадение числа ПДВ по окружности камеры ($n = 4$), но существенное различие в высоте детонационного фронта – $h = 2$ и 6 мм, соответственно. Для камер $d_{\text{out}} = 30$ мм и 20 мм – результаты аналогичные. Это различие неизбежно, поскольку в эксперименте существует область перемешивания компонентов, включающая в себя и участок не способный к детонации. Значение расчётной скорости детонации в приведенной выше работе незначительно превышает экспериментальную – $D = 2,54$ вместо $2,415$ км/с (расхождение 5%). Среднее статическое давление на торце камеры ($\langle P \rangle = 1,75 \cdot 10^5$ Па) близко к давлению на плоской стенке на расстоянии 2 мм ($p_{cl} = 1,67 \cdot 10^5$ Па). При этом надо учитывать, что, во-первых, при удалении от стенки статическое давление уменьшается, а во-вторых, высота фронта в расчёте – меньше, чем в эксперименте.

Выводы из главы 2

1. В плоскоцилиндрической камере внешним диаметром 80 мм при периферийной подаче смеси $\text{H}_2\text{--O}_2$ и диапазоне удельных расходов смеси $3,6\text{--}37,9$ кг/(с·м²) для экспериментов без противодействия и $4,45\text{--}25,5$ кг/(с·м²) для экспериментов с противодействием реализованы режимы непрерывной спиновой детонации смеси $\text{H}_2\text{--O}_2$. В камере сгорания наблюдали поперечные детонационные волны в количестве от одной до семи.

2. Определены частоты вращающихся волн, лежащие в пределах $22\text{--}61$ кГц для экспериментов без противодействия и $22\text{--}44$ кГц для экспериментов с противодействием и выявлена зависимость количества волн от диаметра выходного отверстия в камере 40 , 30 или 20 мм, удельного расхода смеси и противодействия. Так с уменьшением выходного сечения камеры или

при возрастании противодействия число детонационных волн растет, а их интенсивность убывает.

3. Реконструированы детонационные волны и течение в их окрестности в системе волны посредством обработки фотоснимков процесса детонации, зарегистрированных высокоскоростной видеокамерой. По результатам исследования установлено совпадение числа волн по окружности камеры в эксперименте с расчетным [69], однако высота фронта заметно отличается и составляет $h = 6$ мм, против расчетной для такой же геометрии – 2 мм.

4. Установлена достоверность результатов, получаемых при видеосъемке на цифровую видеокамеру Photron SA1.1 в результате сравнения с фоторегистрограммами, зафиксированными фоторегистратором с падающим барабаном и специально разработанным прибором.

5. Экспериментально показано сильное влияние процессов в камере на системы подачи компонентов, особенно водорода, возрастающее с повышением противодействия.

6. Определено направление вращения ПДВ по изображениям течений в области детонационных волн, восстановленным в результате программной обработки. Построена область реализованных режимов детонации в координатах «коэффициент избытка горючего – удельный расход смеси».

7. Показано, что при одинаковых параметрах подачи водорода и кислорода в камеру сгорания экспериментальные и расчетные параметры детонационных волн, описанные в работе [69], весьма схожи. В частности, близки скорость волн и их количество по окружности камеры. Экспериментальная скорость движения ПДВ ниже расчетной примерно на 5 % ($D = 2,415$ против 2,54 км/с).

8. Определен удельный импульс, лежащий в пределах 133–263 с для ПРК (с $D_{out} = 20–40$ мм), превышающий результат для цилиндрической КС диаметром 50 мм с заужением канала на выходе на 30–60 %, приведенный в работах [39, 94], что объясняется значительно большими удельными расходами смеси H_2-O_2 .

ГЛАВА 3. НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ ВОДОРОД–КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ В ПЛОСКОРАДИАЛЬНЫХ КАМЕРАХ С ИСТЕЧЕНИЕМ К ПЕРИФЕРИИ

3.1. Исследование НСД в ПРК с внутренним диаметром 20 мм

Цель настоящего подраздела – изучение НСД и ПД водород–кислородных смесей в плоскорадиальной камере с истечением к периферии с внутренним диаметром 20 мм и сравнение экспериментальных данных с расчётами по модели, построенной в работе [63]. Дальнейшее изложение данного раздела следует работе [63]. Приведенные в главе результаты также опубликованы в работах [72, 75, 76], некоторые идеи по развитию модели представлены в работе [77].

Для этой серии экспериментов была собрана детонационная ПРК, наружный диаметр которой варьировался и составлял 40, 60 и 80 мм. Продукты сгорания также истекали в бочку, что позволяло выявить влияние противодавления на ДВ. Удалось осуществить НСД и ПД водород–кислородной смеси. Разработанное ПО было использовано для проведения экспериментов и с истечением к периферии. Благодаря меньшему количеству волн при том же разрешении видеосъемки результат преобразования в цилиндрическую систему координат получается более наглядным. Более низкая скорость к тому же обеспечивает лучшую четкость изображения.

3.1.1. Камера сгорания

Экспериментальные исследования проведены в ПРК, схема и геометрические параметры которой представлены на рис. 6(б), рис. 26 и в табл. 1(б), описанной во введении.

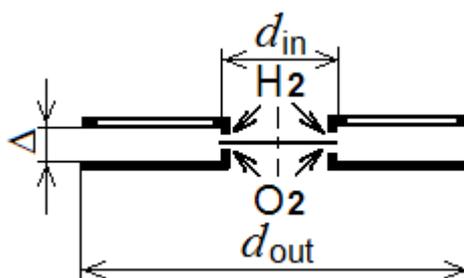


Рисунок 26. Схематичное обозначение сечения ПРК с истечением к периферии

Водород и кислород подавались в камеру отдельно из соответствующих коллекторов (на рис. 6(б) и рис. 26 не показано) через отверстия, расположенные равномерно по взаимно перпендикулярным коническим плоскостям, и имели наклон 45° относительно плоскости радиального и осевого сечений камеры. Таким образом, создавалась система скрещивающихся струй, которая обеспечивала перемешивание компонентов для организации непрерывного детонационного процесса. Общая площадь сечения отверстий и объемы ресиверов приведены в табл. 7.

Таблица 7. Геометрические параметры установки для ПРК с истечением к периферии

d_{in} , мм	d_{out} , мм	Δ , мм	S_{ff} , мм ²	S_{fox} , мм ²	V_{rf} , л	$V_{гох}$, л
20	80	5	5	12	4,05	1,83
		2,5				
		12				
	40					
	60					

Здесь S_{ff} – площадь сечения отверстий форсунок водорода, S_{fox} – кислорода, V_{rf} – объём ресивера для кислорода, $V_{гох}$ – водорода.

Начальное давление в ресиверах составляло: водорода $p_{rf0} = (12-47,5) \cdot 10^5$ Па, кислорода - $p_{гох0} = (12-60) \cdot 10^5$ Па. При этом начальные расходы изменялись в пределах: водорода - $G_{f0} = 4,7-29,6$ г/с, кислорода

$G_{\text{ox}0} = 22\text{--}80$ г/с и за время эксперимента (около 0,9 с) уменьшались примерно в 4 и 2 раза, соответственно. Удельные расходы компонентов смеси $g_{\Sigma} = (G_{f0} + G_{\text{ox}})/S_{\text{In}\Delta}$ где $S_{\text{In}\Delta} = \pi d_{\text{in}} \cdot \Delta$ для значений $\Delta = 2,5\text{--}12$ мм изменялись в пределах $g_{\Sigma} = 35\text{--}522$ кг/(с·м²), при этом наибольшие значения соответствовали $\Delta = 2,5$ мм. Коэффициент избытка горючего во время опыта в разных экспериментах варьировался в пределах $\phi = 0,7\text{--}4,0$. Определение расходов газов производили по уменьшению давления в ресиверах воздуха $p_{\text{гох}}$ и горючего $p_{\text{гф}}$ [52] с погрешностью не более 3,65 %. Соответственно погрешность вычисления удельных расходов g_{Σ} и коэффициентов избытка горючего ϕ не выходила за пределы этой погрешности.

Инициирование процесса производилось на расстоянии 10 мм от цилиндрической поверхности камеры со стороны плоской стенки пережиганием электрическим током полоски алюминиевой фольги с выделением энергии около 5 Дж. Продукты истекали в ёмкость $V_i = 0,43$ м³ с начальным давлением $p_{i0} = (0,1\text{--}1,0) \cdot 10^5$ Па. По мере их истечения давление в ёмкости возрастало.

Для наблюдения процесса в одной из плоских стенок камеры вдоль радиуса, установлены два окна из оргстекла длиной 30 мм и шириной 8 мм, охватывающие поле течения вдоль окон для камер с $d_{\text{out}} = 40, 60$ и 80 мм. Подсветка течения вдоль окон осуществлялась тонкими струйками ацетилена, впрыскиваемых около цилиндрической поверхности. В проведенной серии экспериментов также использовалась высокоскоростная камера Photron FASTCAM SA1.1 675K-M3. Она производила покадровую съёмку самосвечения волн горения и детонации и течения в их окрестности через продольные окна камеры сгорания. Далее строки из каждого кадра компоновались в одно изображение, отражающее характер развития процесса во время эксперимента (см. раздел 1.5).

При реализации НСД или ПД по фоторегистрограммам определялось время появления детонационных волн против окна Δt , которое позволяет однозначно находить их частоту f . Для этого использовалось разработанное

ПО, позволяющее осуществить «сшивку» строк из отдельных кадров в целостное изображение в системе волны. Учитывая количество детонационных волн в камере сгорания по формуле (1) вычислялась скорость D движения ПДВ относительно диаметра цилиндрической поверхности d_{in} , в каждый конкретный момент времени, причем разработанная программа позволяла видеть абсолютное время для точки на кадре, куда установлен программный маркер (аналогично маркеру на экране осциллографа), а также разницу во времени между маркерами.

Измерялись давления в: ресиверах водорода p_{rf} и кислорода p_{rox} , соответствующих коллекторах p_{mf} и p_{mox} , статические в камере p_{c1} на расстоянии 2 мм от цилиндрической поверхности камеры, статическое p_{c2} и полное (p_{c20} с помощью трубок Пито) на выходе из камеры (аналогично приведенному на рис. 3 и рис. 5), а также p_t в ёмкости $V_t = 0,43 \text{ м}^3$ для сброса продуктов. Измерения давления производились сертифицированными датчиками S-10 фирмы WIKA (Австрия) с классом точности 0,5 %. По измеренным давлениям производилось вычисление расходов компонентов. Для этого в электронной таблице были реализованы формулы, описанные в разделе 1, после чего процесс вычисления расходов производился автоматически. Значения отыскивались в моменты времени с шагом 32 мс, что соответствует 200 отсчетам АЦП при частоте 6,25 кГц. Поскольку для вычисления расхода водорода использовалась формула с дифференцированием входных параметров на небольшом отрезке, возникал значительный разброс вычисленных значений. Для усреднения значения G_f использовался полином пятого порядка. Проведенная соискателем работа по автоматизации вычисления параметров процесса позволила ускорить обработку результатов эксперимента и провести ее в полном объеме для всего диапазона изменения давлений топлива и окислителя, что повышает достоверность полученных результатов.

3.1.2. Результаты экспериментов

Суммарные расходы смеси кислорода G_{ox} и водорода G_f , в пределах которых реализованы детонационные режимы, составляли: $G_{\Sigma} = (G_{ox} + G_f) = 36,1-73,8; 14,1-67,2$ и $24,9-67,9$ г/с для камер $\Delta = 2,5; 5$ и 12 мм, соответственно, а коэффициенты избытка горючего изменялись в широком диапазоне $\phi = 0,5-4$.

При $p_{i0} \approx 0,1 \cdot 10^5$ Па реализованы режимы сжигания: НСД, ПД и обычное горение (рис. 27(a), рис. 27(б) и рис. 27(в), соответственно).

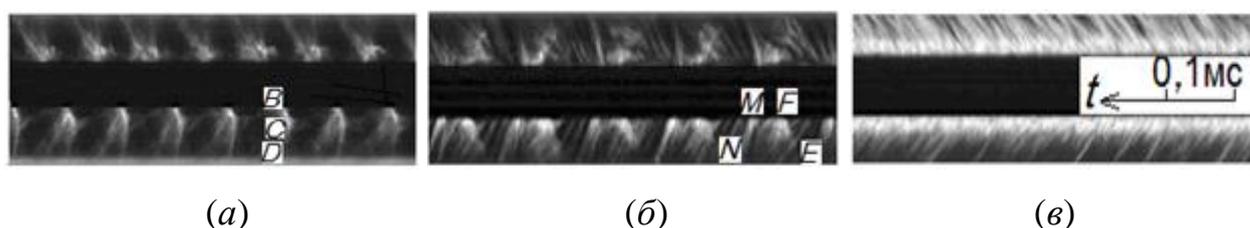


Рисунок 27. Типичные фоторегистрограммы (фрагменты): НСД (a), ПД (б) и горения (в), $d_{out} = 80$ мм, $\Delta = 5$ мм; НСД – $g_{\Sigma} = 200$ кг/(с·м²), $\phi = 0,83$, $n = 1$, $D = 0,737$ км/с ($f = 11,73$ кГц); ПД – $g_{\Sigma} = 179$ кг/(с·м²), $\phi \approx 1,0$, $f = 10,2$ кГц; горение – $g_{\Sigma} \approx 70$ кг/(с·м²), $\phi \approx 1,0$; $p_t = 0,73 \cdot 10^5$ Па

Длительность фрагментов процесса вдоль дорожки составляет около 0,6 мс. Поскольку съёмка производилась через два окна, то для каждого режима зафиксировано две дорожки, разделённые тёмной полосой - областью расположения цилиндрической поверхности диаметром $d_{in} = 20$ мм. Эта полоса может служить масштабом фоторегистрограммы.

В случае НСД (см. рис. 27(a)) фронты BC поперечных детонационных волн и присоединённые к ним шлейфы CD (ударные волны в продуктах реакции) на верхней и нижней дорожках движутся в противоположных направлениях: на нижней дорожке слева направо, на верхней – справа налево, сжигая поступающую смесь, подсвеченную продуктами сгорания ацетиленовой струйки. Видно, что на нижней дорожке съёмка производилась с

компенсацией скорости изображения волны, а на верхней – с раскомпенсацией. Во время появления волны в одном окне камеры, в другом она отсутствует. Это обстоятельство прямо указывает на нечётное количество волн по окружности камеры (в данном случае реализована одна волна – $n = 1$). Размер фронта BC (размер ПДВ) составляет величину $h = 10$ мм, а отношение размера ПДВ к расстоянию между волнами l (здесь длине окружности $l = \pi \cdot d_{in} = 62,8$ мм) равно $h/l \approx 1/6$. Исходное изображение ДВ в КС с истечением к периферии приведено на рис. 28(а), а восстановленное изображение волны представлено на рис. 28(б). На рис. 28 отчетливо выделяются фронт детонационной волны – BC и шлейф продуктов реакции – CD .

3.1.3. Физическая модель процесса

На основании фоторегистрограмм детонационных режимов построена обобщённая структура ПДВ и течения в её окрестности (рис. 29), а также структура ПД (рис. 30).

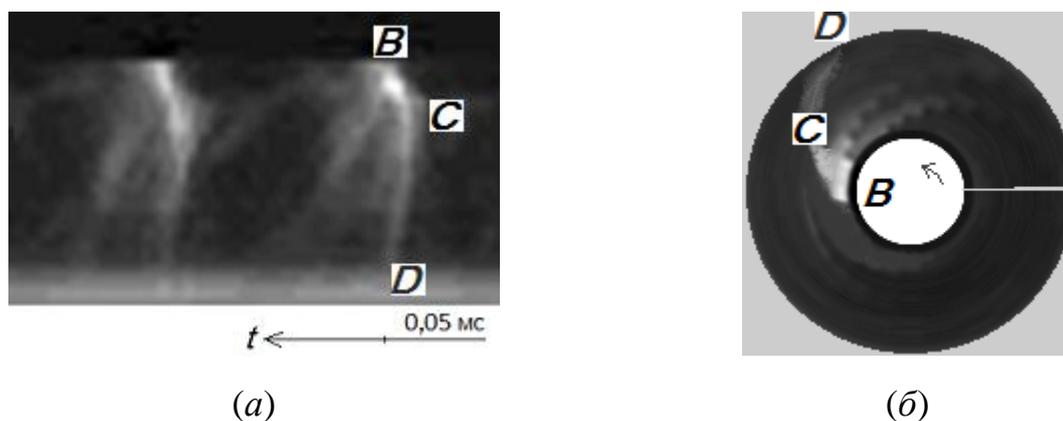


Рисунок 28. Фрагмент развертки волн НСД в ПРК с $d_{out} = 80$ мм, $\Delta = 5$ мм с истечением к периферии на плоскость (а) и восстановленная картина течений в ПРК (б)

На рис. 29 схематически изображена структура волн в КС с истечением к периферии. Позиции на схеме соответствуют приведённым на рис. 21.

Важным отличием от ПРК с истечением к центру является отклонение шлейфа 7 детонационной волны назад. Это вызвано прохождением большей доли длины окружности на большем радиусе при постоянной угловой скорости.

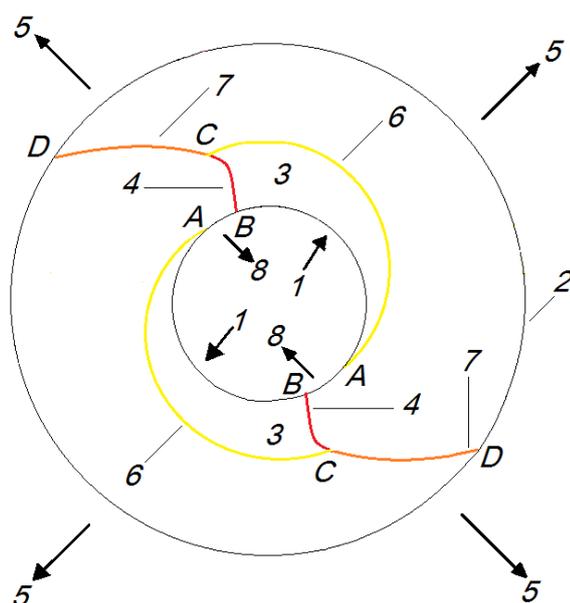


Рисунок 29. Структура ПДВ и течение в их окрестности для ПРК с истечением к периферии

Исходные компоненты окислителя и горючего 1 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 ооолокритической для существования детонации. За фронтом ПДВ в волне разрежения, примыкающей к поверхности Чэпмена-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 открытой части ПРК на

периферию. Возможен также заброс продуктов δ в систему подачи из зоны повышенного давления за фронтом. Продукты детонации отделены от зоны смесеобразования 3 контактными разрывом 6 , который в общем случае трансформируется во фронт горения.

Структура ПД изображена на рис. 30, так фронт волны ПД 1 движется по натекающей смеси 2 в радиальном направлении к центру, после чего отражается от цилиндрической поверхности и меняет направление на противоположное, двигаясь от центра к периферии. Продукты 3 и не сгоревшая топливная смесь удаляется от периферии.

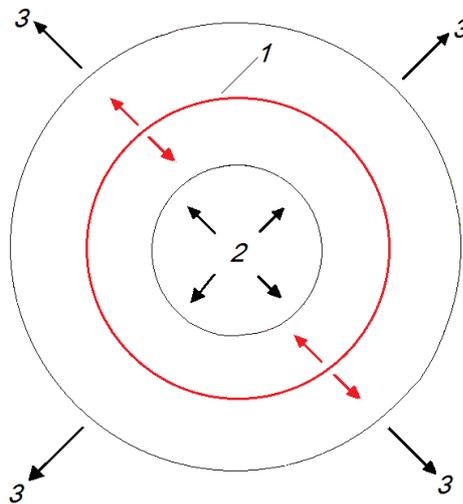


Рисунок 30. Схематическое обозначение движения волн ПД

Волны НМД по своей структуре были аналогичны волнам НМД в плоских каналах описанными в работе [28].

Устойчивые режимы НСД наблюдали в камерах $\Delta = 5$ мм при $d_{\text{out}} = 40$ и 60 мм, а при $d_{\text{out}} = 80$ мм – неустойчивые режимы при повышенных расходах смеси. В камерах с $\Delta = 2,5$ и 12 мм устойчивые режимы реализованы и при $d_{\text{out}} = 80$ мм, но в очень узких диапазонах. Во всех экспериментах при $\Delta = 5$ и 12 мм наблюдалась одна ($n = 1$) ПДВ, а при $\Delta = 2,5$ мм – от трёх ($n = 3$) до одной ПДВ ($n = 1$). Скорости ПДВ относительно внутренней цилиндрической поверхности оказались достаточно низкими –

$D = 640\text{--}1295$ м/с, причём наибольшие значения наблюдались в камерах с $\Delta = 2,5$ мм, а наименьшие – с увеличением зазора Δ (табл. 8).

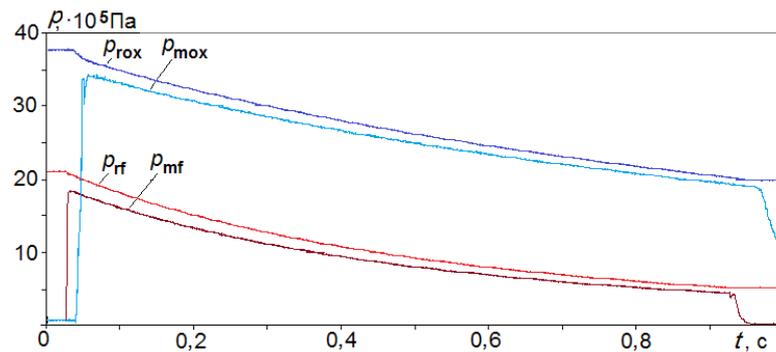
Таблица 8. Параметры процесса в камере сгорания с истечением в стороны

d_{out} , мм	прот ивод авле ние	g_{Σ} , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	D , км/с	p_{c1}/p_a	Режим
80 ($\Delta=5$ мм)	есть	361→347	1,24→1,12	15,8–31,6	2→4	0,5→0,49	6,1→3,9	НСД
	нет	211→189	0,89→0,81	8,3–11,8	1	0,74→0,63	3,0→1,5	НСД
	нет	184,7→44,9	0,8→0,5	7,7–14,3	-	-	1,5→0,8	ПД
80 ($\Delta=2,5$ мм)	нет	418→375	1,86→1,63	15,3–17,5	3→1	1,3→0,64	3,2→1	НСД
	нет	374→225	1,62→1,2	10,2–15,2	1	0,64→1,1	1→1,7	НСД
80 ($\Delta=12$ мм)	есть	82→42,7	1,56→0,71	6,4–8,18	1	0,5→0,4	5→9	НСД
40 ($\Delta=5$ мм)	нет	161→140	1,57→1,36	10,7–13,2	1	0,83→0,81	0,4→1	НСД
	нет	136	1,02	11,3–17,8	1	0,71→1,21	н.д.	НСД
60 ($\Delta=5$ мм)	нет	152→82	1,23→0,57	9,7–15,5	1	1,0→0,7	5→7	НСД
	нет	210→153	1,47→1,27	н.д.	-	-	9→5	ПД

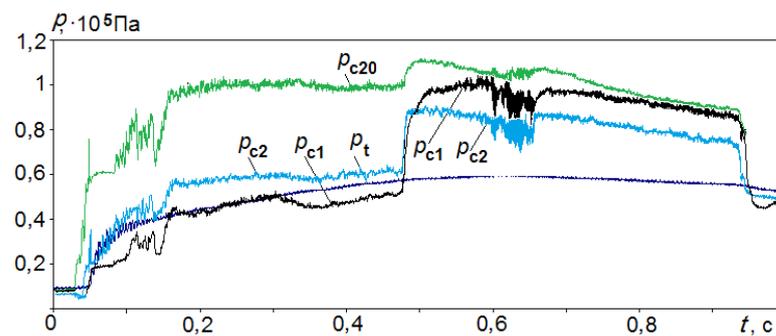
Устойчивая ПД (см. рис. 27(б)) была реализована в камере $\Delta = 5$ мм при $d_{\text{out}} = 80$ мм с частотой $f = 7,7\text{--}14,3$ кГц при $G_{\Sigma} = 14,1\text{--}58$ г/с, а в камере $d_{\text{out}} = 60$ мм и $\Delta = 5$ мм – ПД только при достаточно высоких значениях $G_{\Sigma} = 46,2\text{--}66$ г/с. Продольная (радиальная) волна распространяется вдоль радиуса от периферии к центру вдоль траектории EF , сжигая поступающую в камеру смесь. За время между точками M и F устанавливается горение вблизи форсунок, фронт которого затем сбрасывается за пределы камеры по траектории MN .

Обычное горение наблюдали, как правило, во всех рассматриваемых камерах после инициирования во время переходного процесса, а также в конце эксперимента при малых значениях расходов смеси и большого противодавления в ёмкости (см. рис. 27(в)).

Типичные осциллограммы давлений в системе подачи, в камере сгорания и в ёмкости для сброса продуктов приведены на рис. 31. После подачи кислорода в камеру сгорания (рис. 31(а)) сработала система инициирования, запустившая процесс в камере сгорания (резкий подъём давления в камере, рис. 31(б)). Давление в ёмкости для сброса продуктов p_t также резко поднялось за счёт нагрева продуктами находящегося в ней воздуха. Поскольку истечение компонентов смеси происходило из ресиверов конечного объёма, то давления и расходы в них уменьшаются в течение эксперимента. Однако давления в камере и ёмкости, ввиду установившегося дозвукового течения из камеры, продолжают и дальше возрастать из-за роста давления в ёмкости.



(а)



(б)

Рисунок 31. Типичные осциллограммы давлений: (а) в системе подачи (в ресивере и впускном коллекторе); (б) в камере и в ёмкости для сброса продуктов $d_{\text{out}} = 40$ мм, $\Delta = 5$ мм

По мере охлаждения продуктов на стенках ёмкости, давление в ней проходит через максимум ($p_t = 0,6 \cdot 10^5$ Па), а затем уменьшается, поскольку рост давления за счёт поступления продуктов становится меньше его спада за счёт охлаждения. Примерно так же ведут себя и давления в камере под влиянием давления в ёмкости. Резкий подъём давления в камере через 0,46 с от начала регистрации обусловлен проникновением скачка уплотнения в камеру, который привёл к резкому увеличению скорости ПДВ. При параметрах процесса $g_\Sigma = 136$ кг/(с·м²), $\phi = 1,02$, $n = 1$ скорость ПДВ и частота изменились скачком $D = 0,71 \rightarrow 1,21$ км/с ($f = 11,3\text{--}17,8$ кГц).

3.1.4. Анализ результатов

В процессе работы требовалось определить роль геометрии камеры и других параметров в существовании НСД. Так благодаря увеличивающейся площади сечения ПРК с истечением к периферии уровень возникающего давления в камере сгорания значительно ниже, чем в камере с истечением к центру. Это оказывает негативное влияние на повышение скорости движения детонационных волн и сужает пределы существования детонации (по расходам).

Повышение расстояния между стенками камеры Δ также негативно сказывается на качестве НСД. Так понижается скорость и уменьшается количество ПДВ, а пределы существования НСД по расходам становятся уже.

Экспериментально было показано, что для лучшего перемешивания газов форсунки кислорода должны иметь заведомо большую площадь, чем форсунки водорода, при этом их расположение напротив друг друга под углом 45 градусов к оси значительно улучшало качество смесеобразования.

Проведенная серия экспериментов показала возможность организации НСД в ПРК с истечением в стороны при отсутствии противодействия в области, отведенной для выхода продуктов реакции. Для ситуации с противодействием на уровне атмосферного давления, НСД возможна в гораздо

более узком диапазоне расходов и в большинстве экспериментов вырождается в ПД или горение. Так при истечении продуктов в среду с начальным противодавлением $p_{t0} = 1 \cdot 10^5$ Па устойчивая НСД наблюдалась только в камере с $\Delta = 2,5$ мм, поскольку из-за высокого давления в камере влияние противодавления было незначительно.

ПРК с $\Delta = 5$ мм и $d_{out} = 80$ мм. В камере с $\Delta = 5$ мм и $d_{out} = 80$ мм НСД и ПД наблюдали только в начале подъёма давления в ёмкости (до $p_t = 3 \cdot 10^5$ Па). На рис. 32 этой геометрии соответствуют два отрезка I в области с высокими расходами водород–кислородной смеси. Затем развивалось интенсивное обычное горение с подъёмом давления в ёмкости до $p_t = 6 \cdot 10^5$ Па. Режимы НСД и ПД оказались близкими к наблюдаемым в ацетилен–кислородной смеси как по структуре волн, так по скорости их распространения [78]. Скорости ПДВ относительно цилиндрической поверхности d_{in} оказались близкими к скорости звука в продуктах. Однако в т. С (см. рис. 33) скорость детонационной волны примерно в 1,5 раза больше при $h \approx 10$ мм ($h/l \approx 1/6$).

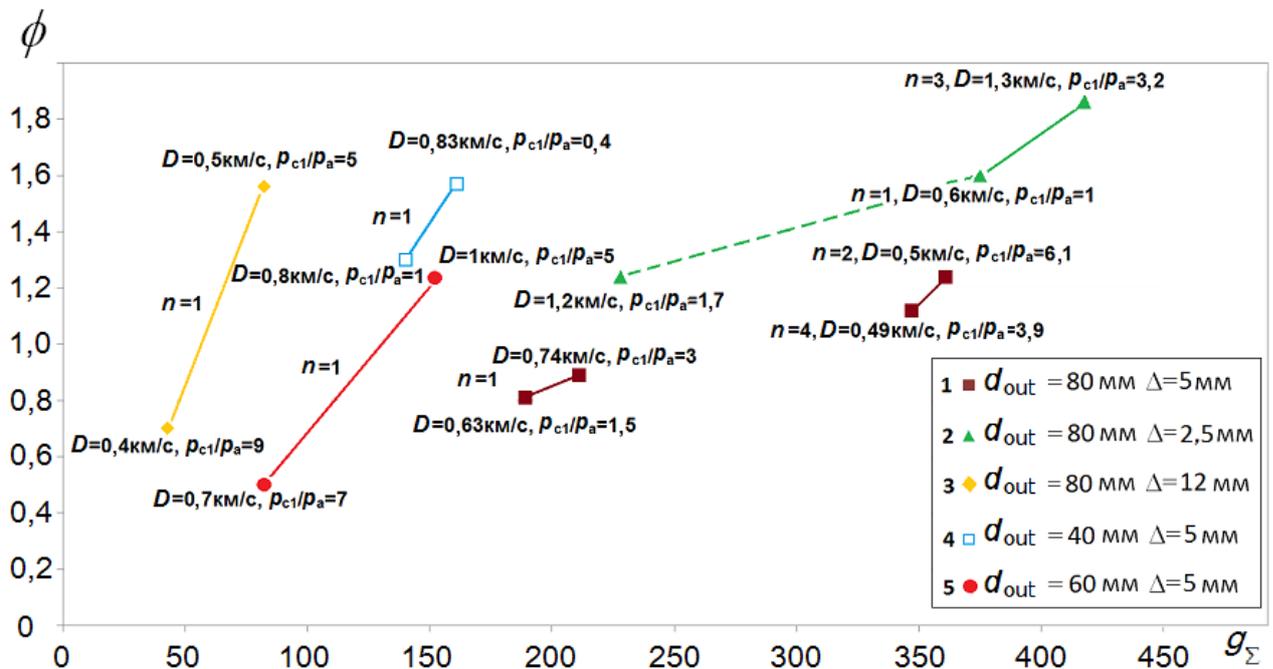


Рисунок 32. Диапазоны существования НСД в координатах «коэффициент избытка горючего – удельный расход смеси H_2-O_2 »

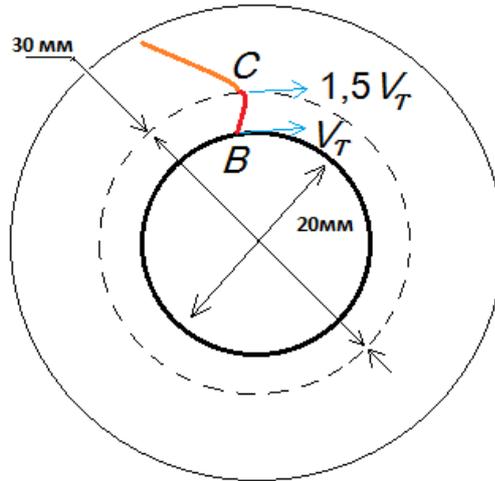


Рисунок 33. Определение скорости волны при $h \approx 10$ мм

ПРК с $\Delta = 2,5$ мм и $d_{out} = 80$ мм. При $n = 3$ и $\Delta = 2,5$ мм наблюдаем $h \approx 3$ мм ($h/l \approx 1/7$), поэтому значения скорости будут повышены на 15%. Однако эти значения скоростей будут далеки от идеальной скорости Чепмена–Жуге. Неидеальность детонации, по-видимому, связана с процессами перемешивания, вызывающими кривизну фронта, а также и значительную разгрузку в зоне химпика в сторону периферии от влияния центробежных сил на продукты.

ПРК с $\Delta = 5$ мм и $d_{out} = 40$ мм. При $d_{out} = 40$ мм часть потока смеси выбрасывается наружу, так как $h > (d_{out} - d_{in})/2$. Эта часть потока сжигается уже в других условиях.

Построим область существования НСД в координатах (g_{Σ}, d_{out}) для зазоров $\Delta = 2,5, 5$ и 12 мм (рис. 34). Наиболее полная информация экспериментально установлена для зазора $\Delta = 5$ мм, который устанавливался во всех камерах.

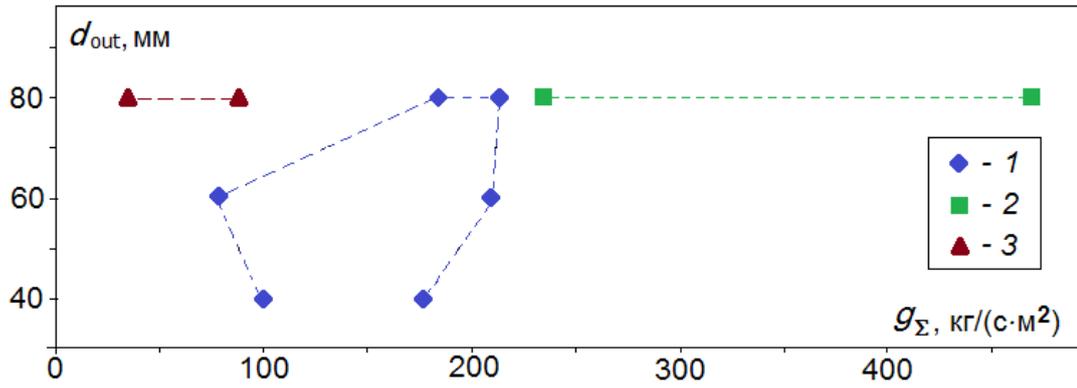


Рисунок 34. Область реализованной НСД в исследованных камерах; 1 – $\Delta = 5$ мм, 2 – $\Delta = 2,5$ мм, 3 – $\Delta = 12$ мм

Видно, что наиболее широкие пределы существования НСД (по минимальному уровню расходов смеси) удалось реализовать для зазора $\Delta = 2,5$ мм. При $g_{\Sigma} > 470$ кг/(с·м²) сверхзвуковой поток смеси выносил детонацию за пределы камеры и ПДВ вращались вне камеры со скоростью $D = 1,94$ км/с при $n = 1$ и $D = 1,7$ км/с при $n = 2$. Только при $g_{\Sigma} = 470$ кг/(с·м²) детонация проникала в камеру и формировалась в виде трёх ПДВ, которые с уменьшением расхода сократились по количеству до двух, а затем и до одной. Левая граничная точка соответствует моменту закрытия клапанов подачи компонентов смеси, поэтому поведение НСД при меньших удельных расходах неизвестно. Пунктирная линия на рис. 34 соответствует области, где устойчивая детонация сменяется неустойчивыми режимами НСД.

В наиболее узких пределах по g_{Σ} существовала детонация при $\Delta = 12$ мм. Детонация реализована в обеих граничных точках и за их пределами не исследовалась.

При $\Delta = 5$ мм НСД в наиболее широком диапазоне по g_{Σ} существовала в камере с $d_{out} = 60$ мм. Детонация реализована в обеих граничных точках и за их пределами не исследовалась. В камерах с большим и меньшим внешним диаметрами этот диапазон сокращался. В камере $d_{out} = 80$ и 40 мм правее области существования НСД наблюдали горение, а левее – ПД в камере $d_{out} = 80$ мм, а в камере $d_{out} = 40$ мм исследования не проводились.

Задача определения причины возникновения ПД в данной работе не исследовалась. Однако из работы [78] следует, что при «нерасчётном» режиме истечения из камеры воспламенение несгоревшей смеси происходит в скачках уплотнения, которые усиливаются и в виде радиальных детонационных волн заходят в камеру.

3.1.5. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования

Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования [63] для ПРК с $d_{in} = 20$ мм, $d_{out} = 40$ мм, $\Delta = 5$ мм при начальном расходе $g_{\Sigma 0} = 132,84$ кг/(с·м²) и $\phi = 1$ показывает, что совпадает лишь количество ПДВ – $n = 1$. В эксперименте скорость детонации и давление в камере на расстоянии 2 мм от цилиндрической поверхности примерно вдвое меньше, чем представлено в расчёте [63] – $D = 1,11$ км/с и $p_{cl} \approx 1 \cdot 10^5$ Па. В эксперименте нижняя часть фронта (точка С, см. рис. 27(a)) выходит за пределы камеры, а в приведенном в работе [63] расчёте $h \approx 8$ мм $< (d_{out} - d_{in})/2$. Эти расхождения объясняются влиянием процессов перемешивания, которые неизбежны при отдельной подаче компонентов смеси в камеру сгорания и которые не были учтены в расчетной модели в работе [60].

Выводы из раздела 3.1

1. Осуществлены режимы непрерывной спиновой детонации (НСД), пульсирующей детонации (ПД) вдоль радиуса камеры, а также горения водород–кислородной смеси в камере плоскорадиальной геометрии с истечением к периферии с внутренним диаметром $d_{in} = 20$ мм и варьируемыми расстояниями между стенками (составлявшим: 2,5; 5; 12 мм) и наружным диаметром камеры (40; 60; 80 мм).

2. Скорость волн при НСД относительно внутреннего диаметра камеры оказалась достаточно низкой - $D = 640\text{--}1295$ м/с, а частота ПД составляла $f = 7,7\text{--}14,3$ кГц.

3. Показано, что для каждой геометрии камеры сгорания указанные режимы детонации имеют пределы существования по удельному расходу смеси. Так для существования НСД необходимы расходы порядка $140\text{--}361$ кг/(с·м²), в то время как ПД превалирует в камере при больших и при меньших расходах в зависимости от геометрии камеры.

4. Определена высота детонационного фронта, составляющая 10 мм. На основании исследования деталей течений в окрестности фронта ДВ, построена физическая модель процесса для ПРК с истечением к периферии. Экспериментально установлены факторы, влияющие на качество НСД.

5. Экспериментальные результаты были сопоставлены с численной моделью ПРК с $d_{in} = 20$, $d_{out} = 40$ мм, $\Delta = 5$ мм при начальном расходе $g_{\Sigma 0} = 132,84$ кг/(с·м²) и $\phi = 1$. Так при НСД имеет совпадение лишь количество детонационных волн по окружности камеры. Другие газодинамические параметры значительно расходятся, что говорит о не совершенности модели, поскольку она не учитывает перемешивания компонентов смеси.

3.2. Непрерывная детонация газовой смеси водород–кислород в ПРК с внутренним диаметром 100 мм и с истечением к периферии. Проверка масштабного эффекта

В текущем подразделе описывается реализация и исследование структуры детонационных волн в ПРК с истечением к периферии газообразных потоков водорода и кислорода с внутренним диаметром $d_{in} = 100$ мм и варьируемым наружным диаметром $d_{out} = 120\text{--}300$ мм, а также проведена проверка масштабного эффекта.

В работе японских авторов [50], экспериментально для смеси водород–воздух в ПРК, состыкованной с компрессором и турбиной, реализованы детонационные режимы. В этой работе приводится способ применения плоскорадиальной детонационной камеры сгорания в энергетической установке, однако авторы не дают ответ на вопрос, почему ими была выбрана именно такая геометрия и размеры камеры сгорания. Данная глава ставит целью показать, влияют ли размеры камеры на возможность детонации, и может ли камера сгорания быть масштабирована без потери основных свойств, необходимых для НСД.

Помимо проведения экспериментов и анализа результатов была проведена работа по автоматизации процесса «съемки на развертку» путем разработки ПО, обладающего функциями геометрического преобразования (в том числе, поворота) серии входных изображений. Ранее проведение экспериментов всегда сопровождалось двумя повторениями. Вначале производилась видеосъемка процесса с областью видеосъемки видеокамеры разрешением 16×256 ориентированной по длине наблюдательного окна. Для случая с пленочным фоторегистратором – это была фотосъемка, при которой барабан вращается так, что точка на фотопленке проходит вдоль кратчайшей стороны окна ПРК из оргстекла. После этого видеокамера или фоторегистратор поворачиваются на 90 градусов, в результате чего

движущаяся светящаяся частица проходит максимальное расстояние, так что её проекция попадает на активную область сенсора видеокамеры или на фотопленку. В этом случае фиксируется трек движущейся частицы. Подобный метод позволяет отличить пульсирующую детонацию, при которой фронт, отражаясь от стенки камеры, движется в обратном направлении, от вращающейся волны, при которой направление движения не меняется. Однако недостаток этого метода в необходимости повторять эксперимент дважды, при том, что условия эксперимента часто оказываются не идентичными из-за особенностей в системе подачи газа, а иногда и человеческого фактора. Поскольку при повороте видеокамеры часть активной области матрицы все равно обращена на глухую стенку ПРК, полезные данные получаются лишь с области 16x16 пикселей. Однако предложено произвести поворот зарегистрированных изображений при прежней ориентации видеокамеры. В результате последующей «сшивки» строки кадров, описанной в главе 1, получаем картину течений, выполненную «на развертку». Это позволяет точно определять, какой вид детонации наблюдается в камере, НСД или ПД, не повторяя эксперимент.

Упомянутые в текущем и следующем разделе результаты опубликованы в работах [79, 80, 81].

3.2.1. Камера сгорания и методика проведения экспериментов

Контуры ПРК с истечением к периферии с внутренним диаметром $d_{in} = 100$ мм приведены на рис. 6(в), а более детальная схема представлена на рис. 35. Геометрические параметры ПРК помещены в табл. 9.

Таблица 9. Геометрические параметры установки с ПРК

d_{in} , мм	d_{out} , мм	$L_c = (d_{out} - d_{in})/2$, мм	Δ , мм	Δ^I , мм	$S_{In\Delta}$, мм ²	$S_{Out\Delta I}$, мм ²	S_{ff} , мм ²	S_{fox} , мм ²	V_{ff} , л	V_{fox} , л
100	120	10	5	-	15,7	-	34,2	60,8	1,95; 4,2; 10	1,95; 4,2
	150	25	5	-		-				
	200	50	5	-		-				
				10	-	31,4	-		4,2; 1,95	4,2
	300	100	10	3,3	31,4	31,4			1,95; 4,2; 10	1,95; 4,2

Здесь $S_{In\Delta}$, $S_{Out\Delta I}$, S_{ff} , S_{fox} – площади канала на входе в камеру, на выходе из сужающейся камеры, топливной форсунки и форсунки окислителя, соответственно.

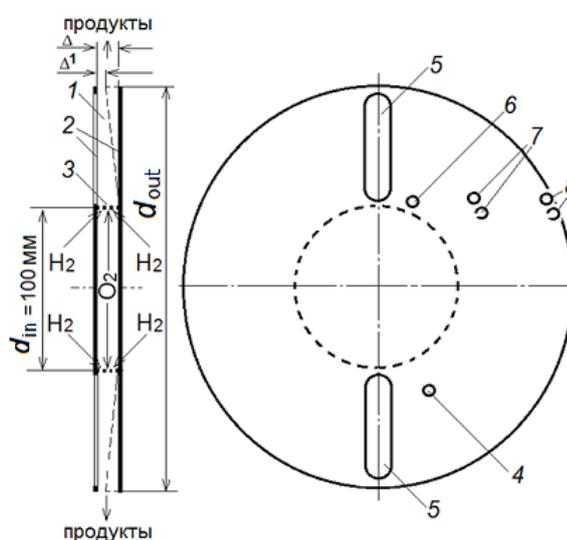


Рисунок 35. Схема ПРК и местоположение датчиков на плоскорадиальной КС с истечением к периферии (1 – рабочее пространство ПРК, 2 – стенки камеры, 3 – форсунки, 4 – расположение инициатора; 5 – окна; 6, 7, 8 – расположение датчиков)

В проведенной серии экспериментов варьировалось расстояние между плоскими стенками $\Delta = 5$ или 10 мм и диаметр кольцевого отверстия, через которое происходит истечение продуктов – $d_{out} = 120, 150, 200$ и 300 мм. При

$d_{\text{out}} = 300$ мм ($\Delta = 10$ мм) в ряде опытов в камеру устанавливалась коническая вставка с $\Delta^l = 3,3$ мм, обеспечивающая постоянство площади кругового сечения канала $S_{\text{Out}\Delta l} = 31,4 \text{ см}^2 = S_{\text{in}\Delta}$.

Система подачи и площадь отверстий форсунок, объемы ресиверов приведены в табл. 9. Местоположение датчиков отмечено на рис. 35. Начальное давление в ресиверах составляло: водорода - $p_{\text{rH}_2} = (30-48) \cdot 10^5$ Па, кислорода - $p_{\text{r,oxO}} = (30-52) \cdot 10^5$ Па. Начальные расходы компонентов смеси $\text{H}_2\text{-O}_2$ изменялись в диапазонах: водорода $G_{f\text{H}_2} = 31,2-90,1$ г/с, кислорода $G_{\text{oxO}} = 363-576$ г/с.

Удельный расход смеси и коэффициент избытка горючего составляли соответственно $g_{\Sigma} = (G_f + G_{\text{ox}})/S_{\text{in}\Delta} = 13,7-336$ кг/(с·м²) и $\phi = 0,26-1,7$. Здесь $S_{\text{in}\Delta} = \pi d_{\text{in}} \cdot \Delta$ – площадь ПРК на входе.

Инициирование процесса производилось на расстоянии 20 мм от входа в ПРК со стороны плоской стенки пережиганием электрическим током полоски алюминиевой фольги с выделением энергии около 1 Дж. Принцип определения мощности электрического разряда описан подробнее в работах [82, 83]. Продукты истекали в атмосферу с давлением $p_a = 1,0 \cdot 10^5$ Па.

Наблюдения производятся через два окна из оргстекла в одной из плоских стенок ПРК длиной 95 мм и шириной 10 мм, охватывающие практически всё поле течения вдоль окна.

Лишь небольшая область течения вблизи форсунок на расстоянии 5 мм исключалась из наблюдения. Подсветка течения вдоль окон осуществлялась тонкими струйками ацетилена, впрыскиваемых именно в этой невидимой части канала.

Съёмка процесса производилась камерой Photron FASTCAM SA5 с кадровой частотой 420000 и 620000 Гц. Аналогично вышеописанным экспериментам получали развертку картины в системе волны и x, t – диаграмму движущихся по окружности волн и продуктов. По фоторегистрограммам вычислялась частота f по формуле (1а). При НСД

рассчитывалась и скорость движения поперечных детонационных волн (ПДВ) D относительно диаметра цилиндрической поверхности d_{c1} по формуле, приведенной ранее (1б).

Измерялись давления в: ресиверах водорода ($p_{r,f}$) и кислорода ($p_{r,ox}$), соответствующих коллекторах ($p_{m,f}$ и $p_{m,ox}$), статические в камере p_{c1} на расстоянии 10 мм от цилиндрической поверхности ПРК, статическое (p_{c2}) и полное p_{c20} (с помощью трубок Пито) на расстоянии 50 мм от цилиндрической поверхности ПРК, статическое (p_{c3}) и полное (p_{c30}) на выходе из ПРК (см. рис. 35). Измерения давления производились сертифицированными датчиками фирмы Trafag (Швейцария) с классом точности 0,5 %.

3.2.2. Результаты экспериментов

Камера сгорания с $\Delta = 10$ мм = const, $d_{out} = 300$ мм

В диапазонах удельных расходов смеси H_2-O_2 $g_{\Sigma} = 13,7-297$ кг/(с·м²) и коэффициента избытка горючего $\phi = 0,26-1,7$ реализованы детонационные режимы: непрерывная многофронтная детонация (НМД) со встречными ПДВ и НСД (рис. 36(a) и рис. 36(б), соответственно).

Продолжительность процесса на фрагменте слева составляет около 2,1 мс, а более детальных фрагментов справа – 0,16 мс. Поскольку съёмка производилась через два окна, то для каждого режима зарегистрированы две дорожки, разделённые тёмной полосой – ближайшим расстоянием между окнами вдоль диаметра камеры - $d_{in} + 2 \cdot 5 = 110$ мм, где 5 мм – расстояние от входа в ПРК до края окна. Эта полоса служит масштабом фоторегистрограммы.

На рис. 36(a) слева приведён момент инициирования (яркая вспышка) и дальнейшее развитие детонационного процесса. Примерно в течение 0,5 мс развиваются ПДВ одного направления, но затем процесс переходит в режим

НМД. Детонационные и ударные волны, а также течение в их окрестности, наиболее отчётливо видны на малом фрагменте. До столкновения фронт детонационной волны BC высотой $h \approx 35$ мм и примыкающим шлейфом CD набирает скорость до максимальной аналогично структуре классической многофронтной детонации газообразных взрывчатых смесей [28].

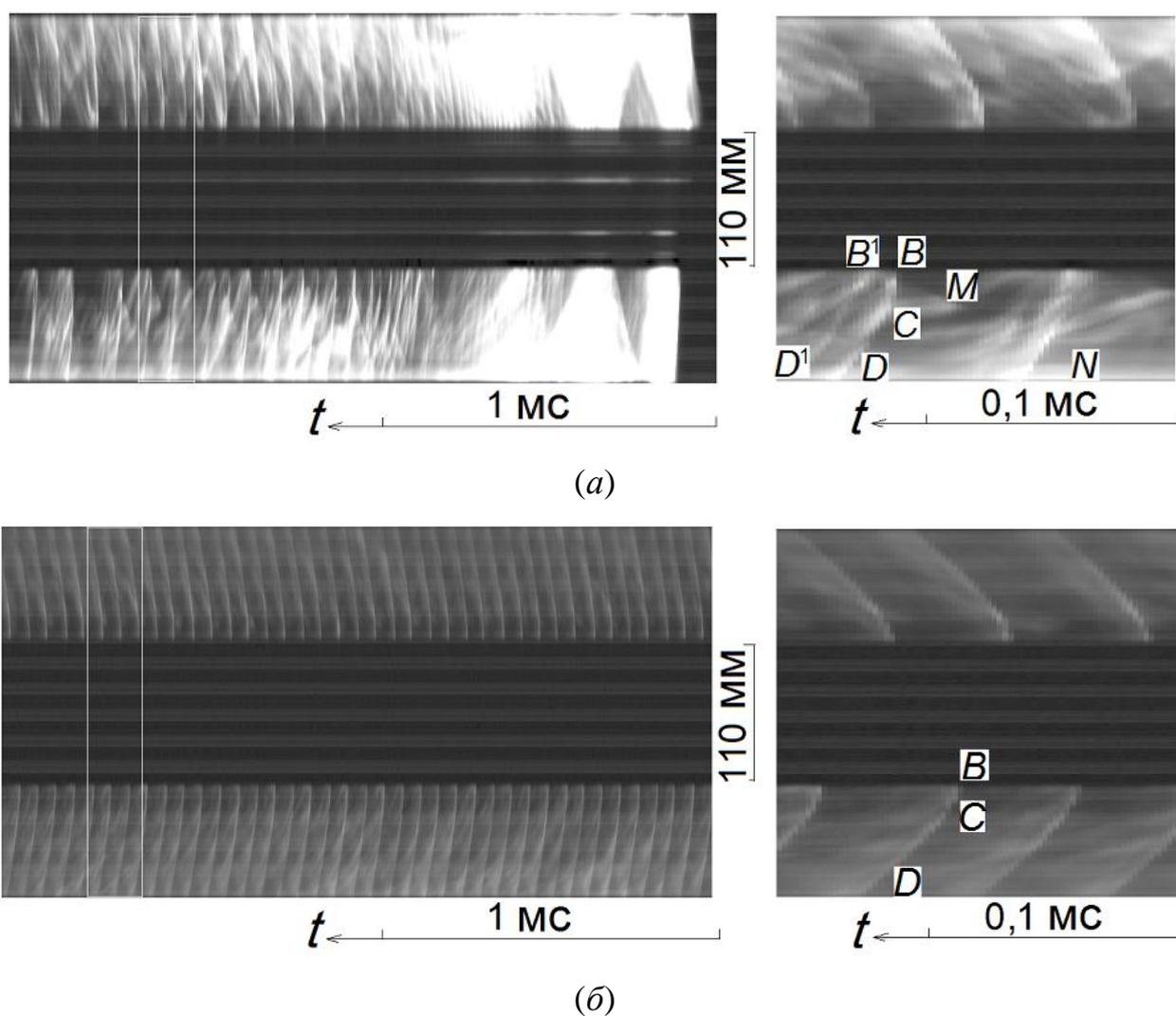


Рис. 36. Типичные фоторегистрограммы (фрагменты) при $\Delta = 10$ мм, $d_{\text{out}} = 300$ мм: (а) НМД – $g_{\Sigma} = 157$ кг/(с·м²), $\phi = 1,51$, $f = 19,3$ кГц; (б) НСД – $g_{\Sigma} = 87$ кг/(с·м²), $\phi = 0,85$, $n = 3$, $f = 18,4$ кГц, $D = 1,93$ км/с

Высота фронта ПДВ отсчитывается от цилиндрической поверхности (точка B) до пересечения с контактной поверхностью между свежей смесью и

продуктами реакции (точка C). После столкновения «прямой» ПДВ со «встречной» (за пределами кадра), она вырождается в ударную волну B^1D^1 и движется в обратном направлении сначала по продуктам детонации от прямой волны, а потом с возрастающей скоростью по слою смеси, увеличивающемуся к моменту следующего столкновения в другой точке. То же самое происходит и со «встречной» ПДВ. Процесс очень нерегулярный как по структуре ПДВ, так и течению в их окрестности. В данном случае можно точно говорить о частоте f , но затруднительно говорить о величине средней скорости детонации, поскольку трудно идентифицировать число волн на окружности камеры. Так как течение продуктов происходит в расширяющемся по площади канале (при $\Delta = \text{const}$), а истечение – в среду с противодавлением $p_a = 1,0 \cdot 10^5$ Па, то при сравнительно небольшом полном давлении у входа в ПРК [52] $p_0 = (D_{\text{СД}}/\gamma) \cdot g_{\Sigma} = 3,9 \cdot 10^5$ Па (здесь $D_{\text{СД}} = 3,1$ км/с – скорость идеальной детонации Чепмена–Жуге для $\phi = 1,51$ [84] и $\gamma \approx 1,25$ – эффективный показатель адиабаты продуктов [85], $g_{\Sigma} = 157$ кг/(с·м²)), сверхзвуковой поток продуктов тормозится в скачках MN , которые заходят внутрь ПРК вплоть до ее входа.

С уменьшением удельного расхода смеси режим НМД со встречными ПДВ устойчиво сохраняется до $g_{\Sigma} = 105$ кг/(с·м²), а затем сменяется регулярным режимом НСД (рис. 36(б)). Слой смеси перед фронтом BC достаточно стабильный – $h \approx 15$ мм и по отношению к расстоянию до последующей волны l составляет величину $h/l \approx 1/7$. В камерах кольцевой цилиндрической геометрии с расширением канала это отношение больше – $h/l \approx 1/5$ [28]. В диапазоне $g_{\Sigma} = 105 \rightarrow 50$ кг/(с·м²) и $\phi = 1,01 \rightarrow 0,54$ в ПРК распространяются три ($n = 3$) ПДВ со скоростями $D = 1,99 \rightarrow 1,89$ км/с ($f = 18\text{--}19$ кГц), затем при $g_{\Sigma} = 50 \rightarrow 43,3$ кг/(с·м²) и $\phi = 0,54 \rightarrow 0,5$ появляется четвертая волна, и скорость ПДВ уменьшается до $D = 1,52$ км/с ($f = 19,4$ кГц).

Наблюдаемые флуктуации скорости и увеличение числа волн, вероятно, связаны с уменьшением давления в камере сгорания и проникновении

ударных волн *MN*-типа в камеру сгорания. При $g_{\Sigma} < 43,3 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ проявляются слабые акустические волны.

Если число волн вращающихся в камере сгорания известно, существует возможность увеличить фрагмент изображения в необходимой пропорции с учетом диаметра цилиндрической поверхности камеры сгорания (рис. 36(б), справа). Так как изображение, зарегистрированное в результате видеосъемки линейное, фрагмент, записанный через одно из окон (в частности рассматривается нижнее окно) должен быть свернут в кольцо для восстановления реальной картины течения в камере сгорания.

Фрагмент на рис. 36(а) не может быть свернут в кольцо из-за неустойчивости процесса: записанная структура волн и структура потока вблизи волн различны в верхнем и нижнем окнах. Детальное изображение потока может быть зарегистрировано покадровой видеосъемкой процесса через прозрачную стенку, как сделано в работе [49]. Параметры процесса в плоскорадиальной камере сгорания с расстоянием между стенками 10 мм для некоторых экспериментов приведены в табл. 10. Следует отметить, что горение с акустическими волнами наблюдается в камере сгорания для значений g_{Σ} меньших, чем указано в табл. 10.

Таблица 10. Параметры НСД и НМД в камере сгорания с $\Delta = 10 \text{ мм}$

d_{out} , мм	L_c , мм	g_{Σ} , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	D , км/с	p_{c1}/p_a	Режим детонации
300	100	157→105	1,51→1,01	14,9–19,3	–	–	1,83→1,3	НМД
		105→43,3	1,01→0,5	18,4–19,4	3→4	1,93→1,52	1,3→1,0	НСД
300	100 ($\Delta^l=3,3 \text{ мм}$)	163→45	1,39→0,5	23,9–53,2	8→5	2,09→1,5	3,7→1,1	НСД
200	50	155→115	1,53→1,14	13,5–16,5	–	–	1,9→1,51	НМД
		115→43	1,14→0,48	18,5–20,8	3→4	2,0→1,45	1,51→1,0	НСД
200	50	208→108	1,08→0,99	21,8–35,6	–	–	2,5→1,4	НМД
		108→27	0,99→0,85	18,7–27	3→6	1,96→1,4	1,4→0,97	НСД

Осциллограммы давлений в течение опыта в системе подачи и ПРК для эксперимента, фрагменты фоторегистрограмм которого представлены на рис. 36, приведены на рис. 37(а) и рис. 37(б).

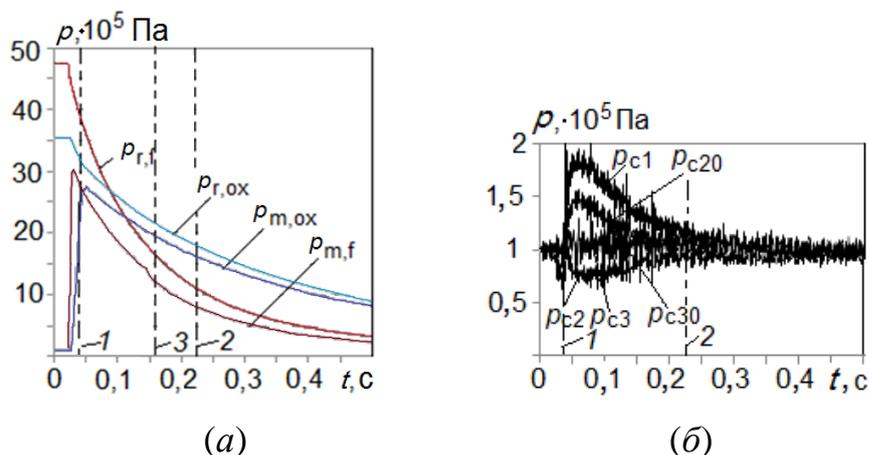


Рисунок 37. Осциллограммы давлений в системе подачи (а) и в ПРК (б); 1 – инициирование (фрагмент на рис. 36(а)), 2 – давления, соответствующие фрагменту на рис. 36(б), 3 – граница между НМД и НСД

Видно, что в течение опыта давление в ресивере водорода $p_{r,f}$ уменьшается быстрее, чем в ресивере кислорода $p_{r,ox}$. Поэтому коэффициент ϕ уменьшался $\phi = 1,51 \rightarrow 0,4$. Течение продуктов у датчиков p_{c2} и p_{c20} сверхкритическое в момент перехода из НМД в НСД (рис. 37, линия 3), а на выходе из ПРК скачок давления извне входит в канал, течение становится докритическим и полное давление p_{c30} практически выравнивается со статическим p_{c3} . Регистрируется наличие значительных колебаний давления в ПРК, но из-за инерционности датчиков это не их истинные значения. Для обеспечения необходимых расходов компонентов смеси давления подачи поддерживаются достаточно высокими, поэтому процессы в камере не влияют заметно на систему подачи.

Камера сгорания с $d_{\text{out}} = 300$ мм с заужением канала от $\Delta = 10$ до

$$\Delta^1 = 3,3 \text{ мм, } S_{\text{Out}\Delta} = 31,4 \text{ см}^2 = \text{const}$$

При заужении канала ПРК от $\Delta = 10$ до $\Delta^1 = 3,3$ мм (см. рис. 35) существенно изменяются условия в камере и протекание в ней детонационного режима. Примерно вдвое увеличилось статическое давление в камере, а на выходе из неё осталось на уровне атмосферного. В диапазонах $g_{\Sigma} = 163 \rightarrow 45$ кг/(с·м²) и $\phi = 1,39 \rightarrow 0,5$ наблюдался режим НСД. Смесь сжигалась в большем количестве ПДВ ($n = 8 \rightarrow 5$) при скоростях ПДВ $D = 2,09 \rightarrow 1,5$ км/с. Скорость волн, а также их число проверялось по x, t – диаграммам при повторении опыта при схожих начальных условиях.

Камера сгорания $d_{\text{out}} = 200$ мм с $\Delta = 10$ мм = const

Опыты были произведены с целью минимизации длины ПРК (наружного диаметра камеры d_{out}). На рис. 36(б), видно, что размер фронта детонации BC достаточно малый ($h \approx 15$ мм) по отношению к длине канала ПРК $(d_{\text{out}} - d_{\text{in}})/2 = 100$ мм. Поэтому линии тока продуктов многократно (4–5 раз) проходят через шлейфы CD детонационных волн, что повышает энтропию продуктов. В связи с этим наружный диаметр камеры был уменьшен до $d_{\text{out}} = 200$ мм, и длина канала ПРК уменьшилась вдвое (до 50 мм). Характер процесса в ПРК не изменился. Вначале существовал режим НМД, а потом – НСД. Структура волн и течений в окрестности волны похожи на показатели для эксперимента при $d_{\text{out}} = 300$ мм изображенные на рис. 33. Однако смена режимов произошла несколько раньше – при $g_{\Sigma} = 115 \rightarrow 5$ кг/(с·м²) и $\phi = 1,14$ в одном опыте и $\phi = 1,0$ – в другом. В первом опыте ресиверы под кислород и водород были одинаковы - $V_{\text{r,ox}} = V_{\text{r,f}} = 4,2$ л, поэтому уменьшение в них давления во время эксперимента было близко к приведённому на рис. 37(а). Во втором случае ресивер под кислород был ёмкостью $V_{\text{r,ox}} = 4,2$ л, а под водород - $V_{\text{r,f}} = 1,95$ л, что способствовало более

быстрому уменьшению коэффициента избытка горючего в течение опыта. Для подтверждения числа волн, их скоростей, а также смены детонационных режимов были проведены съёмка, а также сшивка изображений поперёк окон, описанная в начале главы (x,t – диаграммы). На рис. 38 выбран момент перехода режима с НМД в НСД также в координатах времени и длины окружности (x,t – диаграмма).



Рисунок 38. x,t – диаграмма, отображающая переход режима с НМД в НСД: $g_{\Sigma} = 114 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, $\phi = 0,99$; НМД – $f = 13,8 \text{ кГц}$; НСД – $f = 24,9 \text{ кГц}$, $n = 4$, $D = 1,96 \text{ км}/\text{с}$

Видно, что в режиме НМД развёртки имеют разные наклоны, что указывает на вращение волн в разных направлениях. Тангенциальные треки движущихся объектов в правой части x,t – диаграмм показывает нерегулярное поведение и наклонены в противоположных направлениях, что четко указывает, что волны вращаются в различных направлениях и сталкиваются друг с другом (НМД – режим). В левой части x,t – диаграммы изображение движущихся волн регулярно и имеет одинаковый угол наклона, что явно указывает на НСД в камере. Основываясь на известной ширине окна ($b = 10 \text{ мм}$) и временном интервале Δt от начала до конца изображения, может быть примерно определена скорость детонационной волны. Число волн n и точная скорость ПДВ находится по формуле (1б).

Камера сгорания с $\Delta = 5 \text{ мм}$, $d_{\text{out}} = 120, 150 \text{ и } 200 \text{ мм}$

Для уменьшенного до 5 мм расстояния между стенками ПРК при всех изменениях удельного расхода смеси $\text{H}_2\text{--O}_2$ $g_{\Sigma} = 13,7\text{--}336 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ были

реализованы режимы НСД. Параметры процесса для определенных значений d_{out} , зафиксированные в некоторых экспериментах, представлены в табл. 11.

Наибольшее число ПДВ (до $n = 14$) наблюдали при больших значениях g_{Σ} и ϕ . На рис. 39 представлена характерная фоторегистрограмма НСД в ПРК, имеющей $\Delta = 5$ мм, $d_{out} = 200$ мм.

Таблица 11. Параметры НСД в камере сгорания с $\Delta = 5$ мм

d_{out} , мм	L_c , мм	g_{Σ} , кг/(с·м ²)	ϕ	f , кГц	n	D , км/с	p_{c1}/p_a	Процесс
200	50	323→30	1,12→0,67	26–117	12→4	2,3→2,14	4,2→0,97	НСД
150	25	292→21	1,45→0,96	31,8–93,3	14→5	2,36→2,0	4,1→1,0	НСД
120	10	336→250	1,3→1,0	–	–	–	0,5	горение,
		250→81	1,0→0,43	13,8–15,6	13→3	1,99→1,97	3,1→0,9	НСД

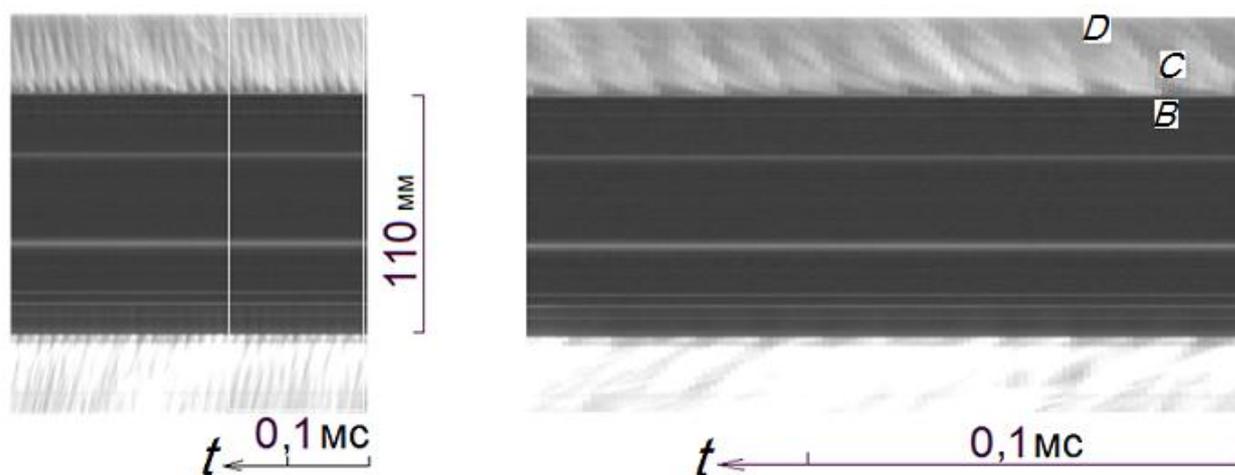


Рисунок 39. Характерная фоторегистрограмма (фрагменты) НСД в ПРК: $\Delta = 5$ мм, $d_{out} = 200$ мм; $g_{\Sigma} = 323$ кг/(с·м²), $\phi = 1,0$, $f = 68,9$ кГц, $n = 11$, $D = 1,97$ км/с

Слева приведена исходная фоторегистрограмма, а справа – приведённая к внутреннему диаметру камеры с одиннадцатью ПДВ, вращающихся, в

плоскости камеры сгорания. Высота фронта ПДВ (BC на рис. 39) составляет $h \approx 10$ мм, а $h/l \approx 1/3$. Структура фронта ПДВ, число волн и их скорости для ПРК с $d_{\text{out}} = 120, 150$ и 200 мм были близки. С уменьшением во время эксперимента g_{Σ} число волн уменьшалось до трёх–четырёх, при скорости $D = 2,0 \pm 0,2$ км/с. Высота фронта ПДВ возрастала до $h \approx 15$ мм, а отношение h/l уменьшалось – $h/l \approx 1/7$. В ПРК с $d_{\text{out}} = 120$ мм ($L_c = (d_{\text{out}} - d_{\text{in}})/2 = 10$ мм) и удельных расходах $g_{\Sigma} = 238 \rightarrow 204$ кг/(с·м²) фронт ПДВ занимал всю длину кольцевого канала вдоль радиуса. При $g_{\Sigma} < 238$ кг/(с·м²) и уменьшении числа ПДВ всё большая часть смеси вытекала за пределы кольцевого зазора. При этом число волн резко уменьшалось от $n = 10$ до 7 и, наконец, до трёх. В диапазоне $g_{\Sigma} = 250\text{--}336$ кг/(с·м²) в кольцевом канале наблюдали слабое горение (частичное сгорание смеси), а на выходе из него появились пульсирующие детонационные волны вдоль радиуса с частотой $f = 5,4\text{--}6$ кГц, дожигающие смесь. В ПРК с $d_{\text{out}} = 150$ и 200 мм при уменьшении числа волн фронт ПДВ не выходил за пределы камеры.

3.2.3. Анализ результатов

В ПРК с шириной зазора $\Delta = 10$ мм впервые реализован режим НМД при детонационном сжигании водород–кислородных смесей. Ранее его наблюдали при сжигании смеси ацетилен–кислород вблизи цилиндрической поверхности $d_{\text{in}} = 20$ мм (в камере без боковых стенок) [78], смеси этилен–кислород в ПРК с истечением к центру, а также смеси метан/водород–воздух в кольцевой цилиндрической камере диаметром 503 мм [32, 38, 73]. Нижний предел режима НМД по удельному расходу смеси $\text{H}_2\text{--O}_2$ в большинстве опытов составил $g_{\Sigma\text{min}} = 100 \pm 15$ кг/(с·м²) и $\phi = 1,0\text{--}0,53$. Верхний предел не установлен из-за технических возможностей установки, обеспечивающей для $\Delta = 10$ мм величину $g_{\Sigma} < 210$ кг/(с·м²). Однако, в ПРК с $\Delta = 5$ мм при всех $g_{\Sigma} = 13,7\text{--}336$ кг/(с·м²) наблюдались лишь режимы НСД. Для всех вариантов

Δ и L_c не наблюдали пульсирующей детонации (ПД) вдоль радиуса, которая в этих диапазонах g_Σ присутствовала в камере $d_{in} = 20$ мм. Причиной может служить ослабление центробежных сил, способствующее лучшему смесеобразованию вблизи цилиндрической поверхности и реализации НСД.

По количеству ПДВ и их скорости видно, что в ПРК с истечением к периферии, в отличие от кольцевых цилиндрических камер с расширением канала [52], масштабный эффект наблюдается частично (рис. 40). Так, например, в ПРК $d_{in} = 20$ мм, $L_c = 10$ мм и удельном расходе $g_\Sigma = 132$ кг/(с·м²) была реализована одна волна ($n = 1$), вращающаяся относительно внутреннего диаметра d_{in} со скоростью $D = 1,11$ км/с [63]. В данной работе в ПРК с $d_{in} = 100$ мм, $L_c = 10$ мм и $g_\Sigma = 132$ кг/(с·м²) было реализовано пять волн ($n = 5$), вращающихся относительно внутреннего диаметра d_{in} со скоростью $D = 1,75$ км/с.

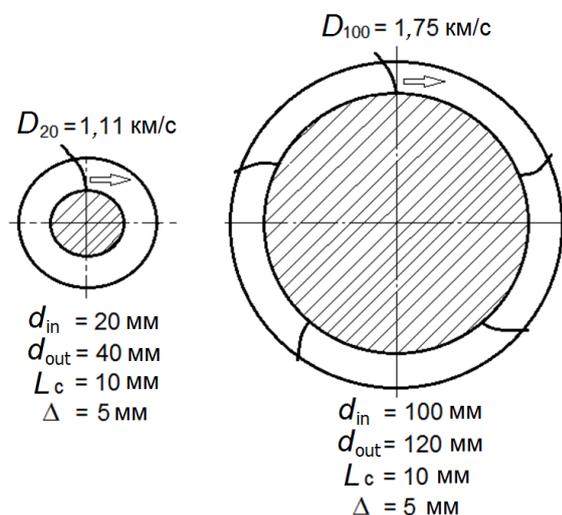


Рисунок 40. Сравнение камер $d_{in} = 20$ мм, $L_c = 10$ мм и $d_{in} = 100$ мм, $L_c = 10$ мм при удельном расходе $g_\Sigma = 132$ кг/(с·м²)

По количеству волн масштабный эффект существует ($n = 5 = 100/20$), однако скорости ПДВ существенно различаются – в ПРК большего диаметра скорость детонации больше. Ясно, что воздействие центробежных сил на

продукты детонации за фронтом ПДВ будет тем больше, чем меньше внутренний диаметр ПРК при одинаковых скоростях продуктов во фронте волны. Поэтому в ПРК с $d_{in} = 20$ мм происходит более сильная разгрузка давления продуктов за фронтом ПДВ, и, следовательно, уменьшение скорости ПДВ. Несомненно, существует и предельно малый диаметр ПРК d_{inmin} , при котором ещё может быть реализована НСД. Даже для заранее приготовленных и неподвижных смесей существует минимальный диаметр цилиндрической поверхности, который может обогнуть классическая детонационная волна. Так в работе [61] показано, что распространение детонации вдоль круглой стенки по заранее приготовленной смеси возможно, если выполняется условие $-(d_{in}/2) \geq 30b$, где b – продольный размер ячеек многофронтной детонации. Фронт, движущийся вдоль стенки, имеет радиус $r_* = (3 \pm 1)b$, поэтому с ухудшением химической активности смеси (ростом b) укрупняется структура волны, и растут потери импульса за искривлённой поверхностью [86]. При этом снижаются параметры детонационной волны и в пределе - невозможность её существования. По этой причине не удалось осуществить НСД в камере $d_{in} = 20$ мм для химически менее активной смеси метан–кислород [52]. С увеличением диаметра ПРК центробежные силы, действующие на продукты, уменьшаются, и условия реализации НСД будут приближаться к существующим для кольцевой цилиндрической камеры с расширением канала. Ручная и программная реконструкции ПДВ и течения в их окрестности в плоскости камеры и в системе волны для трёх ПДВ приведены на рис. 41. За основу был взят правый фрагмент фоторегистрограммы, приведённый на рис. 36(б) и масштабированный по внутреннему диаметру камеры $d_{in} = 100$ мм.

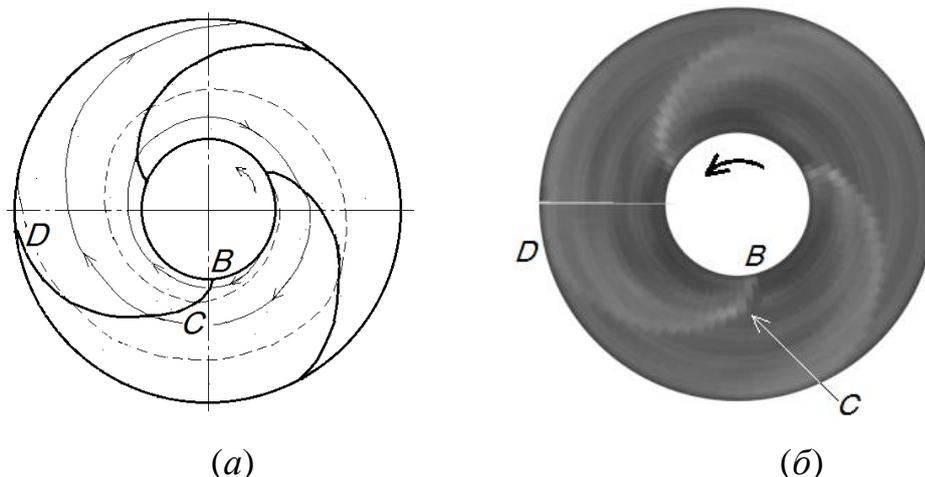


Рисунок 41. Схематичное изображение (а) и результат компьютерной обработки (б) для реконструкции ПДВ и течений в их окрестности в плоскости ПРК в системе волны (см. рис. 36(б))

Как видно из изображения, ручная и компьютерная реконструкции почти одинаковые. Чтобы не загромождать рисунок, на нём показана (рис. 41(а)) лишь одна контактная линия и одна линия тока, проходящие через фронт BC . Контактная линия вблизи входа в ПРК является границей между свежей смесью и продуктами, а дальше – между слоями продуктов. Видно, что линия тока многократно (4 раза) проходит через волны. С энергетической точки зрения это плохо, так как увеличивается энтропия продуктов. Поэтому длину ПРК целесообразно уменьшить без особого изменения детонационного процесса. Ручная реконструкция ПДВ проведена так: элементы волн и течений, попадающие на окружности радиусов $r_{in} \leq r \leq r_{out}$ сдвигались вдоль этих окружностей пропорционально радиусу от базового радиуса, проходящего через точку B . При одинаковой угловой скорости вращения волны тангенциальная скорость участков ПДВ увеличивается от точки B к точке D в пропорции $D^l = D \cdot r / r_{in} = 1,93 \rightarrow 5,76$ км/с. Поскольку для каждой точки фронта BC нормальная составляющая скорости детонации сохранялась постоянной, фронт ПДВ должен отклоняться назад, что и наблюдается из реконструкции.

Для точек шлейфа CD (ударной волны в продуктах) отклонение ещё более значительно, так как вниз по течению снижается его интенсивность. В камерах кольцевой цилиндрической геометрии, имеющих длину $L_c \approx 7h$, шлейф ПДВ на выходе из камеры вырождается в акустическую волну [52]. Если принять, что в ПРК шлейф в точке D также вырождается в акустическую волну, то её скорость в направлении нормали близка к скорости звука в продуктах $D_n^l = D \cdot (r_{out}/r_{in}) \cdot \sin \alpha \approx 1,3$ км/с [87], где $\alpha = 13^\circ$ – угол наклона шлейфа к касательной к окружности.

Высота фронта ПДВ измерялась по фоторегистрограммам. Согласно рис. 41, измеренная величина h лишь проекция кривого фронта BC на радиус. Поэтому с уменьшением числа волн она всё больше будет отличаться от истинного размера фронта BC . Этим обстоятельством объясняется непостоянство отношения h/l и его уменьшение с сокращением числа ПДВ.

Зависимости частоты ПДВ при $\Delta = 5$ и НМД при $\Delta = 10$ мм в ПРК $d_{out} = 200$ мм от удельного расхода смеси g_Σ представлены на рис. 42. Коэффициент избытка горючего изменялся незначительно $\phi = 0,85–1,08$.

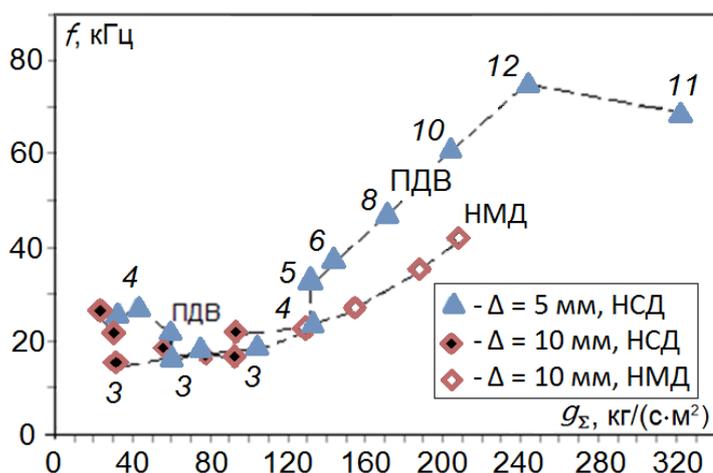


Рисунок 42. Зависимости частоты ПДВ в ПРК для режимов НСД и НМД; \blacklozenge - $\Delta = 10$ мм, \blacktriangle - $\Delta = 5$ мм; цифры 3–12 – количество ПДВ

Для обеих ПРК частота вращающихся волн уменьшается с уменьшением удельного расхода смеси. И только при малых значениях $g_{\Sigma} = 30 \pm 10$ кг/(с·м²) ПДВ вырождаются в акустические и их число возрастает с трёх до четырёх. Режим НМД наблюдали в пределах $g_{\Sigma} = 208 \rightarrow 93$ кг/(с·м²), а при $g_{\Sigma} = 93 \rightarrow 23$ кг/(с·м²) он переходит в режим НСД. Механизм возникновения и устойчивого протекания режима НМД, а также смена его на режим НСД остался невыясненным. Отметим, что скорости ПДВ во всех режимах находятся в узких пределах $D = 2,0 \pm 0,2$ км/с при широких изменениях коэффициента избытка горючего $\phi = 1,6 - 0,5$, соответственно. Это говорит о том, что в данном диапазоне изменения коэффициента избытка горючего газодинамика течения в большей степени влияет на процесс, чем химическая физика во фронте детонационной волны. Неидеальность непрерывной детонации оценивается отношением $D/D_{CJ} = 0,6 - 0,8$, где D_{CJ} – скорость идеальной детонации Чепмена–Жуге для данного состава смеси. При этом меньшие значения D/D_{CJ} соответствуют большим значениям ϕ .

3.2.4. Свойства НСД и роль отдельных параметров

Скорости ПДВ и их структура достаточно устойчивы. Основной причиной устойчивости детонационных волн является отрицательная обратная связь между параметрами системы подачи и детонационной волны (см. рис. 29). Предположим, что слой смеси уменьшился. Поскольку фронт волны распространяется по околоскритическому слою смеси, его скорость также уменьшится, и увеличится время поступления свежей смеси и, следовательно, слой смеси увеличится. Наоборот, если увеличится высота фронта, то увеличится его скорость, что приведёт к уменьшению высоты поперечного фронта. Поэтому при постоянных условиях подачи детонационная волна сохраняет стабильность. Наблюдается некоторая зависимость скорости детонационных волн от удельного расхода топливной смеси через выходное отверстие КС и соотношения компонентов, что

объясняется в первую очередь около предельными режимами существования НСД при определенных условиях. Аналогичное негативное влияние на НСД оказывает уменьшение диаметра камеры сгорания, увеличивающее воздействие центробежных сил на продукты детонации за фронтом ПДВ. В проведенных экспериментах уменьшение расстояния между стенками камеры, равно как и добавление конусной вставки (с $\alpha = 3,83^\circ$) положительно сказалось на расширении пределов существования НСД.

Выводы из раздела 3.2

1. В плоскорадиальной камере внутренним диаметром 100 мм с истечением к периферии для водород–кислородной смеси экспериментально установлены режимы непрерывной спиновой детонации и непрерывной многофронтной детонации, причём, в последнем случае впервые.

2. Экспериментально показано, что для каждой геометрии камеры сгорания режимы непрерывной детонации имеют нижние пределы существования по удельному расходу смеси. Так в ПРК с расстоянием между стенками 5 мм реализованы режимы НСД с количеством волн в диапазоне от 3 до 12 шт. в широком диапазоне расходов H_2 и O_2 , $g_{\Sigma min} \approx 30 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$. При расстоянии между стенками 10 мм диапазон существования НСД уже ($23\text{--}93 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$) и по мере увеличения расходов процесс переходит в НМД ($93\text{--}208 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$).

3. По результатам исследования установлены параметры, влияющие на масштаб структуры ПДВ. Так определена высота фронта ПДВ и расстояние между ДВ в зависимости от геометрии КС. Для непрерывной спиновой детонации проведена реконструкция поперечных детонационных волн и течения в их окрестности в плоскости камеры. По результатам экспериментального исследования детонационных волн установлено, что детонационная волна сильно искривлена вследствие возрастания тангенциальной составляющей скорости вдоль радиуса камеры.

4. Эксперименты показали, что масштабный эффект проявляется лишь по количеству вращающихся волн. Однако их скорость возрастает с увеличением размера камеры сгорания из-за снижения влияния центробежных сил, действующих на продукты и уменьшающих давление за фронтом детонации.

5. Установлено, что отклонение скорости непрерывной детонации по сравнению со скоростью идеальной детонации Чепмена–Жуге в меньшую сторону составляет 20–40 %, при этом наибольшее отклонение соответствует бедной по горючему смеси.

6. Разработано ПО, позволяющее осуществить выявление сталкивающихся волн характерных режимам ПД без повторения опыта.

3.3. Режим эжекции кислорода

Помимо принудительной подачи кислорода в камеру сгорания представляет интерес поведение детонационных волн при самопроизвольной подкачке кислорода областью разряжения сопровождающей фронт детонационной волны. Ранее была доказана возможность существования детонационных волн в кольцевой проточной цилиндрической камере диаметром 100 мм в режиме эжекции кислорода для ацетилен–кислородной и водород–кислородной смесей [88, 89]. Описанные эксперименты указывают на возможность непрерывной спиновой и пульсирующей детонации в плоскорадиальной камере сгорания. В плоскорадиальной камере (ПРК) существенное влияние на детонационные режимы оказывают центробежные силы, действующие на продукты, а также особенности истечения продуктов в расширяющемся канале. Упомянутые в разделе результаты опубликованы в работе [90].

Серия экспериментов включала в себя плоскорадиальную камеру диаметром 100 мм с расстоянием между стенками 12 мм, 7 мм и с равномерно уменьшающимся расстоянием от 12 до 5,3 мм.

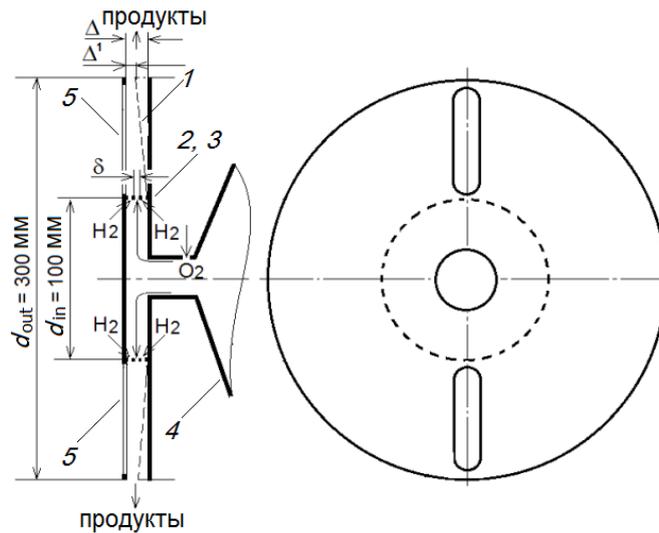


Рисунок 43. Схема ПРК с истечением к периферии, работающая в режиме эжекции: 1 – кольцевой канал для продуктов, 2 – форсунки, 3 – кольцевая щель для кислорода, 4 – усеченная емкость, 5 – прозрачные окна

В главе определяется роль давления в ПРК на поступление окислителя из атмосферы. Измерения давления в ПРК производились низкочастотными датчиками. Также требовалось определить достоверность сигнала и проверить, не является ли он причиной радиочастотных помех. Для этого была разработана программа в среде MATLAB производящая преобразование Фурье от входного сигнала и отображающая результат в виде графика с пиками в определенных областях частот.

3.3.1. Постановка экспериментов

Исследования проводились в камере сгорания, описанной во введении (см. рис. 6(з)). Схема камеры также представлена на рис. 43.

Площадь кольцевого канала на входе в камеру вычисляется по формуле $S_{In\Delta} = \pi \cdot d_{in} \cdot \Delta$, на выходе из камеры (п.1 на рис. 43) соответственно - $S_{Out\Delta} = \pi \cdot d_{out} \cdot \Delta$, а для камеры с заужением канала $S_{Out\Delta} = \pi \cdot d_{out} \cdot \Delta^1$. Необходимые величины приведены в табл. 12. В обоих случаях ПРК имеет к выходу расширяющийся по площади канал.

Таблица 12. Геометрические параметры установки с ПРК

d_{in} , мм	d_{out} , мм	$L_c = (d_{out} - d_{in})/2$, мм	δ , мм	Δ , мм	Δ^1 , мм	$S_{In\Delta}$, см ²	$S_{Out\Delta}$, см ²	S_δ , мм ²	V_{rf} , л	$K_s = \Delta/\delta$
100	300	100	2	7	-	22	65,94	628	4,2	3,5
				12	-	37,7	113,04			6
				12	5,3	37,7	50			

Водород подавался в ПРК из ресивера объёмом $V_{rf} = 4,2$ л через отверстия форсунок 2 рис. 43, равномерно распределённых по цилиндрической стенке камеры на расстоянии 0,5 мм от щели для подачи кислорода и направленные вниз по потоку под углом 45° к оси и образующей цилиндрической поверхности ПРК.

Кислород поступал в ПРК через кольцевую щель 3 шириной $\delta = 2$ мм. Проходное сечение составляло $S_\delta = \pi d_{in} \delta = 6,28$ см². Он всасывался из ёмкости 4 объёмом $V_o = 40$ л, противоположный конец которой сообщался с окружающим воздухом (на рис. 43 не показано) по всей поверхности поперечного сечения ёмкости – 415 см². Ёмкость подпитывалась необходимым количеством кислорода (коэффициент избытка горючего $\phi \leq 1$) на всём протяжении опыта. Таким образом, в усеченном баллоне газ находился при атмосферном давлении, при достаточно высокой концентрации кислорода во время проведения эксперимента.

При поступлении в ПРК водорода формировалось разрежение (как при работе струйного насоса) и происходило подсосывание первых порций кислорода.

Образующаяся в ПРК смесь H_2-O_2 инициировалась пережиганием проволоочки, расположенной на расстоянии 20 мм от цилиндрической поверхности. Примерно через 10 мс развивалась НСД. При этом ПДВ, точнее, их волны разрежения работали как всасывающие поршни для кислорода,

расход которого увеличивался. Продукты детонации выбрасывались в атмосферу. Фоторегистрация процесса производилась высокоскоростной камерой Photron FASTCAM SA5 в режиме 525000 кадров в секунду через два продольных окна 5 из оргстекла длиной 9,5 см и шириной 1,0 см, расположенные по радиусу в плоской стенке камеры. Для подсветки детонации водород–кислородной смеси, со стороны цилиндрической поверхности напротив окон впрыскивались струйки ацетилена. Компьютерная обработка видеок кадров позволяла для светящихся объектов, движущихся в тангенциальном направлении, получать картину течения в системе волны, а вдоль радиуса - x,t – диаграммы. Производилось свертка развёртки в кольцо, включающее количество вращающихся в камере волн. В некоторых опытах производилась фотосъёмка и свертка поперёк длинной стороны окна, и фиксировались x,t – диаграммы движущихся в тангенциальном направлении светящихся объектов. По фоторегистрограммам и x,t – диаграммам определялось время появления детонационных волн против окна Δt , которое позволяло однозначно находить их частоту $f = 1/\Delta t$.

Регистрация давления производилась в ресиверах кислорода ($p_{r,ox}$) и водорода ($p_{r,f}$), на входе щели подачи кислорода (p_o) и в коллекторе горючего ($p_{m,f}$). Помимо этого измерялись давления в камере: средние статические давления на расстоянии 1 см, 5 см и 10 см от цилиндрической поверхности ПРК (p_{c1} , p_{c2} и p_{c3} , соответственно) и полные давления на расстоянии 5 и 10 см от цилиндрической поверхности (p_{c20} и p_{c30}). Измерение давлений производилось сертифицированными датчиками производства компании Trafag (Швейцария) обладающими точностью $\pm 0,5$ %.

Начальное давление водорода в ресивере устанавливалось $p_{r,f0} = 12 \pm 1 \cdot 10^5$ Па. При этом начальный расход H_2 составлял $G_{f0} \approx 19 \pm 2$ г/с, а текущий расход G_f уменьшался в 10 раз за время процесса (0,4 с). В результате удельные расходы водорода через поперечное сечение ПРК на

диаметре d_{cl} изменялись в диапазоне $g_f = G_f/S_\Delta = 0,5-7,4$ кг/(с·м²). Расход кислорода в ПРК оценивался в зависимости от условий проведения опыта.

3.3.2. Результаты экспериментов

Стабильная НСД существовала в камере при установке в ПРК щелевого зазора $\delta = 2$ мм. Коэффициент расширения потока кислорода на входе в ПРК $K_s = \Delta/\delta$ в проведенных опытах составлял 6 или 3,5.

Эксперимент с сужающимся каналом $S_{Out\Delta} = const$

Проводился эксперимент с плоскорадимальной камерой, содержащей конусную вставку, уменьшающую выходное сечение камеры сгорания. Конусная вставка располагалась со стороны сплошной стенки – противоположной стенке с вклеенными окнами из оргстекла, поэтому она не мешает видеосъемке процесса.

На рис. 44 представлен фрагмент фоторегистрограммы, включающий момент инициирования детонации и развитие НСД для сужающегося плоского канала камеры сгорания при $\Delta = 12$ мм и $\Delta^l = 5,3$ мм.

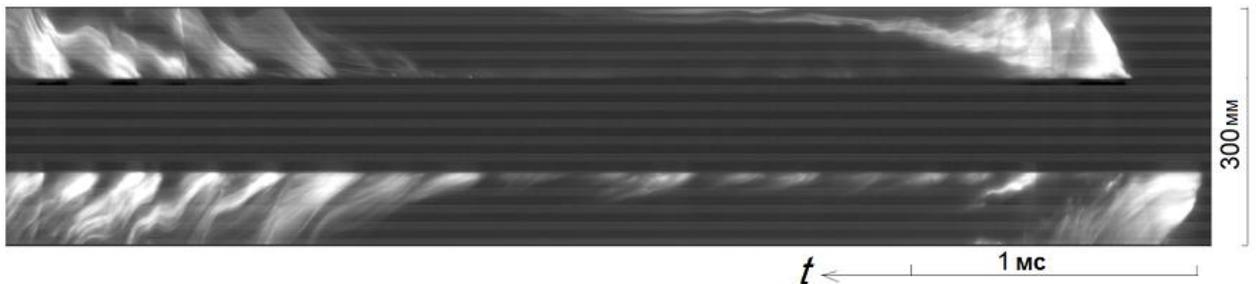


Рисунок 44. Детонационная волна в начале эксперимента

На изображении отчетливо виден момент инициирования процесса горения, снос натекающим потоком области химической реакции в сторону выхода из камеры и обратный возврат с ударной волной вращающейся детонации.

По изображению видно, что от момента инициирования до момента установления детонационной волны проходит около 3 мс. Верхняя половина изображения соответствует проекции одного наблюдательного окна на плоскость объектива, а нижняя половина — другого. Пространство между засвеченными точками соответствуют глухой окружности диаметром 110 мм в центре камеры лишенной окон ($d_{in} + 2 \cdot 5 = 110$ мм, где 5 мм – расстояние от входа в ПРК до края окна). Поскольку на приведенном изображении время откладывается справа налево, а детонационная волна движется с лидирующим фронтом, то и на верхней и нижней половине изображения вначале появляется фронт (он располагается правее), и только после него – течения, примыкающие к фронту волны (они всегда расположены левее по оси времени).

На рис. 45 представлено увеличенное изображение крайней левой детонационной волны, снятой в нижнем окне и приведённой к масштабу длины по радиусу и цилиндрической поверхности ПРК.

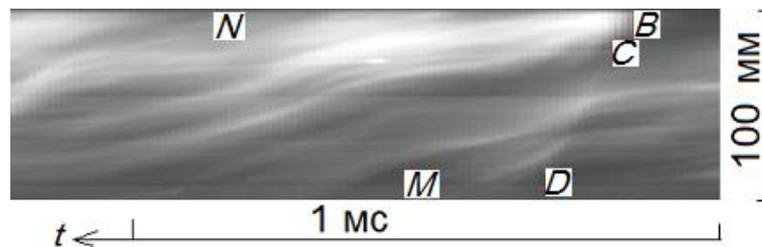


Рисунок 45. Детонационная волна и элементы структуры течения в ее окрестности (BC – фронт ПДВ, CD – ударная волна, распространяющаяся по продуктам, MN – продольная волна сжатия)

Характерная особенность плоскорадиальной камеры сгорания заключается во влиянии центробежных сил действующих на продукты сгорания, увеличивающих давление в камере на периферии. Поскольку развёртка процесса линейная, а процесс одноволновый, то для восстановления истинной структуры волны и картины течения в её

окрестности необходимо сворачивание этого фрагмента в кольцо с соотношением внутреннего и наружного диаметров 110/300.

Результат преобразования приведенного выше изображения представлен на рис. 46. В центре изображения отчетливо видно местоположение фронта детонационной волны и предшествующей ему области натекающих продуктов, расположенные на внутреннем радиусе изображения (стрелка указывает направление движения волны).

Детонационный режим с одной ПДВ, наблюдался примерно 100 мс в диапазоне расхода водорода $G_f = 15,7 \rightarrow 9,75$ г/с ($g_f = 4,17 \rightarrow 2,6$ кг/(с·м²)). Скорость детонации относительно торцевой стенки ПРК изменялась в диапазоне $D = 1,3 \text{--} 1,43$ км/с ($f = 4,17 \text{--} 4,56$ кГц).

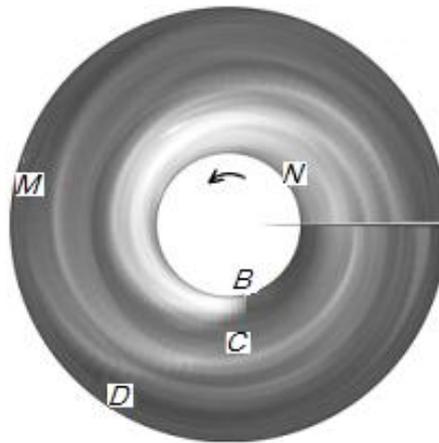


Рисунок 46. Изображение одной детонационной волны развернутое по цилиндрической окружности камеры

Структура детонационной и ударных волн, а также течение в их окрестности, наиболее отчётливо видны на крупном фрагменте (см. рис. 45). Фронт детонационной волны BC является косым и его проекция на радиус камеры (с учётом невидимой части 5 мм) составляет величину $h \approx 45$ мм, а по отношению к длине окружности $l = \pi d_{in}$ – примерно 1/7 часть. Примыкающий к фронту BC шлейф CD (ударная волна в продуктах) также сильно отклонён назад. Просматривается продольная волна сжатия MN ,

идущая извне вверх по потоку до торца камеры и тормозящая поток продуктов. На некоторых фрагментах видно большее количество продольных волн и даже обратное течение (см., например, рис. 45, вторую с левого края ПДВ на верхней дорожке), поскольку течение продуктов происходит в области схождения характеристик. Процесс НСД достаточно нерегулярный как по структуре ПДВ, так и течению в их окрестности.

В области расходов водорода $G_f = 9,75 \rightarrow 5$ г/с ($g_f = 2,6 \rightarrow 1,33$ кг/(с·м²)) ПДВ вырождались в акустические с радиальным перемещением волны сжатия MN и периодическим ($f = 3,8\text{--}4,07$ кГц) воспламенением смеси после отражения продольной волны сжатия от торца ПРК (рис. 47). При $G_f = 5 \rightarrow 1,6$ г/с ($g_f = 1,33 \rightarrow 0,42$ кг/(с·м²)) наблюдались ослабевающие акустические волны на фоне горения (табл. 13).



Рисунок 47. Процесс в ПРК с $\Delta = 7$ мм; $g_f = 2,74$ кг/(с·м²), $f = 3,97$ кГц

На рис. 48 представлены графики давлений в ресиверах водорода ($p_{r,f}$) и кислорода ($p_{r,ox}$), а также график давления в камере сгорания ($p_{m,f}$) для вышеописанного эксперимента с конусной вставкой.

Графики статического давления впереди и позади кольцевой щели p_o и p_{cl} представлены на рис. 49. Истечение водорода в эксперименте имеет дозвуковой характер.

Отметим, что среднее статическое давление кислорода на входе в щель, в камере и в ресивере имеют практически одинаковое значение – $p_o \approx p_{cl} \approx p_{c30} \approx 1 \cdot 10^5$ Па. Лишь момент инициирования первоначально скопившейся смеси в ПРК и от вращающихся ПДВ отмечены колебаниями давлений около этого среднего значения.

Таблица 13. Сводные параметры НСД в камере сгорания для трёх серий экспериментов: с заужением канала, без заужения канала с расстоянием 12 и 7 мм

Ширина	L_c , мм	G_f , г/с	g_f , кг/(с·м ²)	f , кГц	n	D , км/с	Процесс
$\Delta=12$ мм, $\Delta^1=5.3$ мм	100	15,7→9,75	4,17→2,6	4,17–4,56	1	1,3–1,43	НСД Радиальные акустические волны
		9,75→5	2,6→1,33	-	-	-	
$\Delta=12$ мм	100	19,5	5,17	4,9	1	1,54	НСД
		19,5→11,9	5,17→3,16	4,4–4,8	2	0,75→0,69	НСД
		11,9→2,74	3,16→0,73	< 4,4	-	-	горение
$\Delta=7$ мм	100	16,3→15,9	7,4→7,23	н.д.	2	1,45→1,53	НСД акустические волны
		15,9→1,7	7,23→0,77	3,4–4,5	-	-	

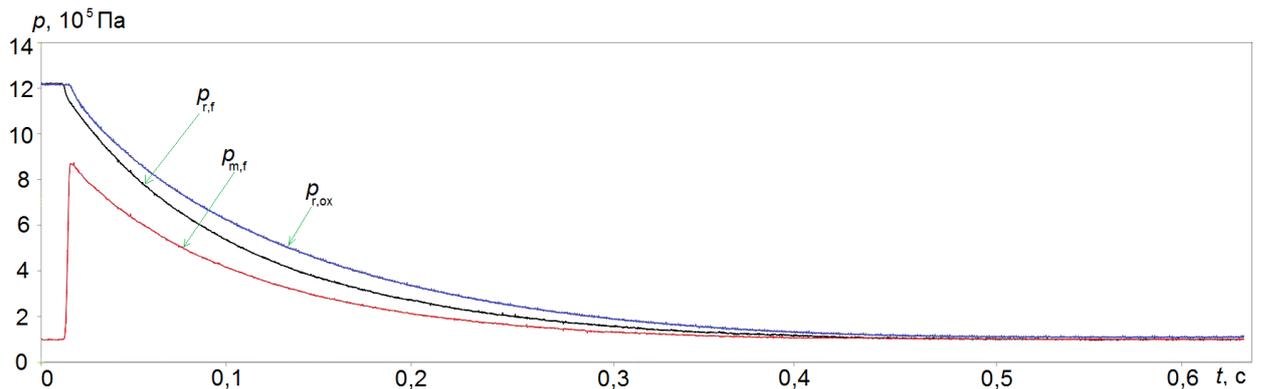


Рисунок 48. Графики давления в системе подачи H_2 и O_2

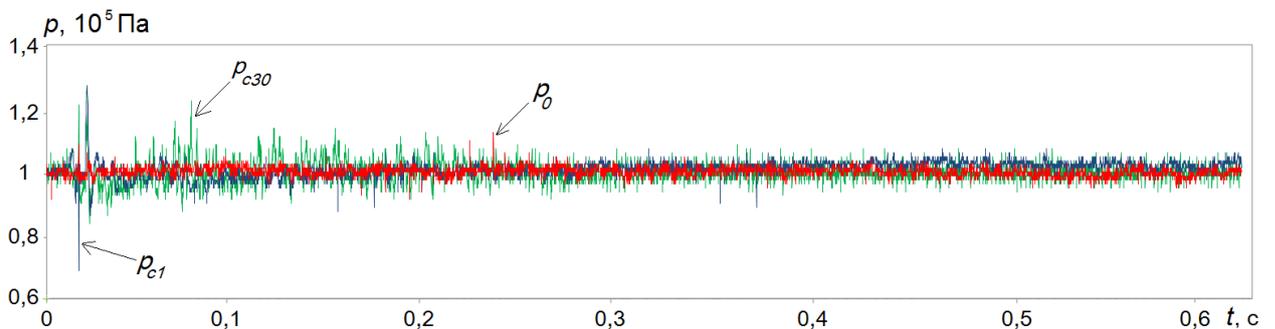


Рисунок 49. Графики статического давления на входе в щель кислорода (p_o) и в ПРК (p_{cl} и p_{c30}) практически не различимы между собой

Эксперимент с прямым каналом ПРК с $\Delta = 12 \text{ мм} = \text{const}$

При установке постоянного зазора $\Delta = 12 \text{ мм}$ сразу же после инициирования режим НСД с одной ПДВ ($n = 1$, $D = 1,54 \text{ км/с}$ и $f = 4,9 \text{ кГц}$) существовал около 2 мс при $G_f \approx 19,5 \text{ г/с}$ ($g_f \approx 5,17 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$). Далее при уменьшении $G_f = 19,5 \rightarrow 11,9 \text{ г/с}$ ($g_f = 5,17 \rightarrow 3,16 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$) установился режим с двумя слабыми околзвуковыми волнами ($n = 2$, $D = 0,75 \rightarrow 0,69 \text{ км/с}$ и $f = 4,4\text{--}4,8 \text{ кГц}$), но достаточно отчётливо выраженными светящимися фронтами (рис. 50, 51). Иногда, в течение нескольких миллисекунд, снова восстанавливался одноволновый режим НСД. При $G_f = 11,9 \rightarrow 2,74 \text{ г/с}$ ($g_f = 3,16 \rightarrow 0,73 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$) светящиеся фронты, движущиеся в тангенциальном направлении, исчезли, а усилились волны сжатия MN , движущиеся в радиальном направлении, которые периодически, с частотой $f = 3,3\text{--}4,4 \text{ кГц}$ воспламеняли смесь после отражения от торца камеры (см., например, рис. 47). С дальнейшим снижением расхода $G_f < 2,74 \text{ г/с}$ ($g_f < 0,73 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$) в ПРК установилось обычное горение (рис. 52).

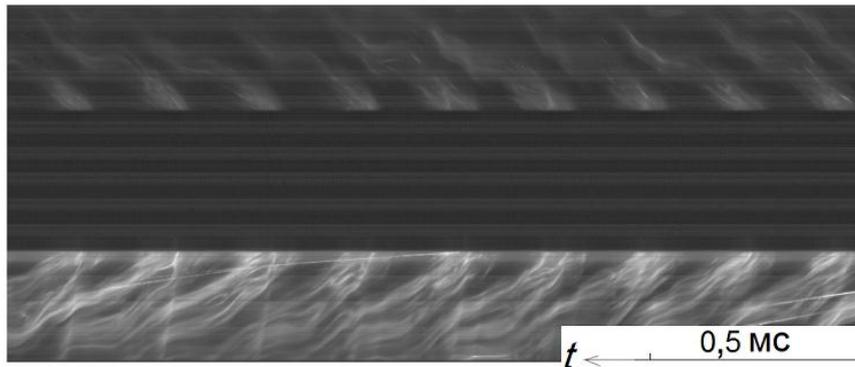


Рисунок 50. Околзвуковые волны, движущиеся в тангенциальном направлении, $G_f = 13,4 \text{ г/с}$ ($g_f = 3,55 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$), $n = 2$, $D = 0,7 \text{ км/с}$ ($f = 4,4 \text{ кГц}$)



Рисунок 51. x, t – диаграмма процесса, построенная вырезом пикселей поперек окна в ПРК

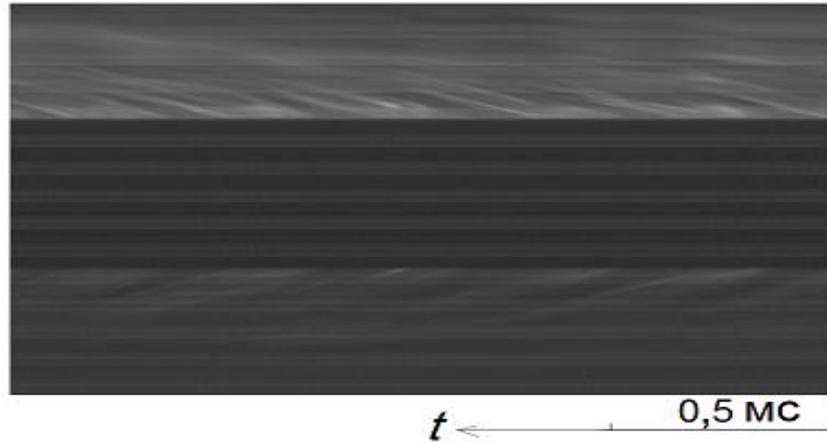


Рисунок 52. Горение, $G_f = 7$ г/с ($g_f = 1,86$ кг/(с·м²))

Эксперимент с прямым каналом ПРК и $\Delta = 7$ мм = const

При уменьшении зазора ПРК до величины $\Delta = 7$ мм в узком диапазоне расходов водорода $G_f = 16,3 \rightarrow 15,9$ г/с ($g_f = 7,4 \rightarrow 7,23$ кг/(с·м²)) наблюдали двухволновой режим НСД ($n = 2$, $D = 1,45 \rightarrow 1,53$ км/с, $f = 9,26 \rightarrow 9,77$ кГц). В области расходов водорода $G_f = 15,9 \rightarrow 1,7$ г/с ($g_f = 7,23 \rightarrow 0,77$ кг/(с·м²)) ПДВ выродились в акустические, волны сжатия MN стали перемещаться в радиальном направлении и периодически, с частотой $f = 3,4 \rightarrow 4,5$ кГц воспламеняли смесь после отражения от цилиндрической поверхности камеры (рис. 47). Волна сжатия в этом случае так же размыта, как и при НСД (см. рис. 50). При $G_f < 1,7$ г/с ($g_f < 0,77$ кг/(с·м²)) продольная волна сжатия постепенно ослаблялась и в канале устанавливался достаточно однородный режим обычного горения (см., например, рис. 52).

3.3.3. Анализ результатов

Наиболее важным результатом работы является экспериментальное подтверждение возможности существования непрерывной спиновой детонации в эжекторах, в данном случае ПРК. Известные типы эжекторов [87, 91] работают за счёт градиента давления, образующегося между струей истекающего из сопла газа и газа во внешней среде. Из рис. 49 следует, что

при одномерном течении в условиях классического эжектора вообще нельзя говорить о наличии эжекции, так как статические средние давления на входе и выходе камеры практически одинаковы и находятся на уровне давления окружающей среды. Даже если предположить, что при погрешности измерения датчиками давления около 1 % и фактическом перепаде давления кислорода на щели $\Delta p_\delta = p_o - p_{cl} = 0,01 \cdot 10^5$ Па, можно обеспечить скорость подачи кислорода в ПРК $v_{ок} = (2\Delta p_\delta / \rho_{ок})^{0.5} = 1,24$ м/с. Этой скорости явно недостаточно для реализации детонации, поскольку за характерное время вращения волны ~ 250 мкс в ПРК поступит лишь 0,3 мм кислорода. Без учёта пути на перемешивание с водородом эта величина меньше критического размера для детонации (размера ячейки), который для водород–кислородной смеси в стандартных условиях составляет величину $a = 1,6$ мм [28]. Поскольку в описанных выше экспериментах НСД реализуется, то существует механизм всасывания наружного газа в ПРК. Он был выяснен на кольцевых цилиндрических камерах с расширением [88, 89] и в настоящей работе подтверждён в ПРК. Радиальная скорость газа в камере $v_r = dr/dt$, определяемая по развёртке движения светящихся частиц газа вдоль окна, впереди фронта ПДВ составляла $v_{r,m} \approx 350$ м/с (см. рис. 44). Согласно расчётам по математическим моделям НСД [52], эта скорость обеспечивается сверхкритическим перепадом давления в волне разрежения за детонационным фронтом BC , которое в 2–3 раза меньше, чем среднее давление в камере. Поскольку среднее давление в камере $p_{cl} \approx 1 \cdot 10^5$ Па, то перед фронтом BC оно составляет величину не более $0,5 \cdot 10^5$ Па. Таким образом, в режиме нестационарной автоколебательной эжекции кислорода детонационная волна выполняет роль насоса, а примыкающая к детонационному фронту волна разрежения – всасывающего поршня.

При НСД детонационный фронт BC приближен к месту отражения волны сжатия MN от цилиндрической поверхности. Скорость продуктов вблизи выхода из ПРК ($v_{r,p}$) является существенно дозвуковой: сразу за ПДВ –

$v_{г,р} \approx 500$ м/с, за косой волной сжатия снижается до $v_{г,р} \approx 200$ м/с и даже приобретает обратное направление (см. рис. 44, верхнее окно, вторая волна слева).

3.3.4. Обобщение результатов

Экспериментально установлены минимальные пределы существования НСД при $\Delta = 12$ и 7 мм, так стабильный процесс устанавливался при удельных расходах водорода ± 1 % от $g_f = 5,1$ и $7,4$ кг/(с·м²), соответственно. Это соответствует моментам времени, лежащим в начале эксперимента, когда расходы максимальны. Опыты с большими удельными расходами водорода не производились. С уменьшением удельного расхода водорода НСД всегда сменялась пульсирующим режимом горения смеси. Назвать этот режим детонационным нельзя, так как скорость волны сжатия MN по продуктам составляла всего $v_l \approx 560$ м/с относительно стенок, а после отражения её от торца ПРК скорость продуктов не превышала 350 м/с. Однако разлёт продуктов обеспечивал необходимое разрежение для поступления в камеру кислорода.

Обращает на себя внимание тот факт, что при НСД и пульсирующем режиме горения частоты волн находились в узких пределах – $f = 3,4\text{--}4,9$ кГц. По-видимому, причиной является достаточно стабильная скорость волны сжатия MN в продуктах. При отражении от торца ПРК в одном случае она стимулировала появление фронта ПДВ, а в другом – воспламенение смеси. Волны сжатия возникают от торможения сверхзвукового потока за фронтом ПДВ, а также от вспышек недогоревшей смеси вне камеры. Вторая причина реальна в силу того, что имеет место выброс водорода во время прохождения фронта ПДВ напротив щели подачи кислорода – поступление кислорода в ПРК прекращается, а водорода продолжается. В результате свободный водород может периодически выбрасываться за пределы камеры и догорать в воздушной среде, генерируя волны сжатия, проникающие в ПРК.

Состав формирующейся смеси перед фронтом неизвестен. Его можно лишь оценить, используя фоторегистрограмму процесса. Видно, что кислород поступает в ПРК на участке $\sigma = (1/2 - 2/3) \cdot S_\delta$. Принимая истечение кислорода через щель критическим, получаем расходы: $G_{\text{ox}} = \mu \rho_{\text{ox}^*} v_{\text{ox}^*} \sigma = 64,2-85,66$ г/с, где $\mu = 0,8$ – коэффициент расхода щели [92], $\rho_{\text{ox}^*} = 0,64 \cdot \rho_{\text{ox}0}$ [87], а $\rho_{\text{ox}0} = 1,35$ кг/м³ при давлении $p_o = 1,013 \cdot 10^5$ Па и $T_o = 293$ К, $v_{\text{ox}^*} = [(2 \cdot \gamma / (\gamma + 1)) \cdot (p_o / \rho_{\text{ox}0})]^{0.5} = 296$ м/с – критическая скорость течения кислорода в щели, $\gamma = 1,4$ – отношение удельных теплоёмкостей при постоянном давлении и объёме. Для опыта, фоторегистрограмма которого приведена на рис. 44, осциллограмма на рис. 48 и рис. 49, коэффициент избытка горючего находился в пределах $\phi = 1,96-1,47$ при $\sigma = (1/2 - 2/3) \cdot S_\delta$, соответственно. Поступление кислорода из ресивера на входе в щель (см. рис. 42) составляло $G_{\text{ox}} = 107$ г/с, что удовлетворяло возможным его расходам в ПРК.

3.3.5. Сравнение с цилиндрической камерой

Проведём сравнение НСД в камерах цилиндрической геометрии с расширением канала от $\Delta = 5$ мм под углом $8,5^\circ$ [88, 89] и в ПРК для случая $\Delta = 12$ мм = const. При близкой степени расширения канала ПРК (3,37 и 3,0, соответственно) нижний предел для детонации по удельному расходу водорода составляет, соответственно $g_{f,\text{min}} = G_f / S_\Delta = 2$ и $5,1$ кг/(с·м²). Верхний предел для НСД в цилиндрической камере находился в области $g_{f,\text{max}} = 4$ кг/(с·м²), а в ПРК не был определён из-за возможностей установки. В ПРК с заужением канала на выходе до $\Delta^1 = 5,3$ мм (степень расширения 1,33) область существования НСД расширилась $g_f = 2,6-4,17$ кг/(с·м²), однако верхний предел также не был определён по той же причине. Скорости детонации в ПРК оказались меньше, чем в цилиндрической камере. По-видимому, повлияли центробежные силы, действующие на продукты детонации, понижающие давление за фронтом детонационной волны ВС. В

ПРК с $\Delta = 7$ мм = const (степень расширения 3,0) нижний предел существования НСД повысился до $g_{f,\min} = 7,23$ кг/(с·м²). Кроме того, в этом ± 1 % диапазоне по g_f удалось реализовать двухволновый режим НСД, в то время как в цилиндрической камере при $g_f > 4,5$ кг/(с·м²) наблюдали режим пульсирующей детонации. Во всех случаях при значениях g_f меньше нижнего предела наблюдали режим пульсирующего горения. При модернизации экспериментальной установки с ПРК путем увеличения расходов горючего и её геометрии имеется возможность реализации НСД и при больших расходах водорода.

Непрерывная спиновая детонация в плоскорадиальной камере диаметром 300 мм в режиме эжекции окислителя осуществима как при расстоянии между стенками 7 мм, так и – 12 мм. Однако более выгодной геометрией, с точки зрения наиболее широкого диапазона расхода смеси, при котором возможна детонация, является сужающийся к периферии плоскорадиальный канал с расстоянием между стенками в области цилиндрической поверхности 12 мм, а около края – 5 мм. Причина в том, что в первом случае детонация наблюдалась лишь в узких пределах изменения удельных расходов водорода ± 1 % от $g_f = 5,1$ и $7,4$ кг/(с·м²), соответственно, в начале эксперимента, пока расходы максимальны. В дальнейшем расходы падают, и НСД сменяется пульсирующим режимом горения водород–кислородной смеси. Этот режим не является детонацией, поскольку скорость волны сжатия MN по продуктам составляла всего $v_l \approx 560$ м/с относительно стенок, а после отражения её от торца ПРК скорость продуктов не превышала 350 м/с. При этом кислород поступал благодаря разрежению, обеспечиваемому разлетом продуктов сгорания.

Несмотря на принципиальные отличия происходящих процессов, частоты волн при НСД и пульсирующем режиме горения лежали в пределах $f = 3,4$ – $4,9$ кГц. Это объясняется достаточно стабильной скоростью волны сжатия MN в продуктах [93]. Волна сжатия стимулировала появление фронта

ПДВ при достаточном для этого расходе смеси, а при понижении расходов – стимулировала воспламенение смеси. Волны сжатия появляются от торможения сверхзвукового потока за фронтом ПДВ и от вспышек недогоревшей смеси вне камеры.

Выводы из раздела 3.3

1. 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.

2. Экспериментально показано наличие волн сжатия в продуктах за фронтом ДВ, а также их усиление по мере ослабления детонационных волн.

3. В ПРК, по сравнению с кольцевой цилиндрической, удалось реализовать непрерывную спиновую детонацию при более высоких значениях удельных расходов водорода (2,6 и 2 кг/(с·м²) соответственно). Заужение выходного сечения камеры позволило снизить нижние пределы по этому параметру с 5,1 до 2,6 кг/(с·м²).

4. В диапазоне 3,6–4,4 кГц обнаружена стабильность частоты вращения детонационных волн и пульсаций горения в отражённых от цилиндрической поверхности волнах сжатия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Сконструирована экспериментальная установка, налажены системы подачи топливных смесей, инициирования детонации и система измерений параметров процесса. Разработано программное обеспечения для восстановления картины течений в КС и преобразования ее между системами координат. Проведены экспериментальные исследования поведения НСД в ПРК с истечением к центру и к периферии, как с принудительной подачей окислителя, так и в режиме эжекции окислителя.

Выработана серия рекомендаций и требований к геометрии ПРК для реализации НСД в ПРК при минимальных расходах топливной смеси. Предложены геометрии камер сгорания, допускающие НСД в наиболее широких диапазонах по расходу водород–кислородной смеси (водорода в случае с эжекцией окислителя). Выполнено тестирование систем измерения и разработано программное обеспечение для обработки результатов эксперимента.

Основные результаты исследований:

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 противодавлением 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 противодавлением более 1 атм влияние ПДВ на систему подачи выражено в большей степени. Экспериментально установлена зависимость количества волн от диаметра выходного отверстия в 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 химпика 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. Так 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 675K-M3) 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.

Выводы по основным результатам работы:

1. Показана принципиальная возможность реализации детонационных режимов в камерах плоскорадиальной геометрии, в том числе в режиме эжекции окислителя.

2. Выработана серия рекомендаций и требований к геометрии КС для реализации НСД в ПРК при обеспечиваемых в данной работе расходах H_2-O_2 смеси.

3. Предложены геометрии камер сгорания, допускающие НСД в наиболее широких диапазонах по расходу H_2-O_2 смеси (водорода в случае с эжекцией окислителя).

4. Выполнено тестирование систем измерения и разработано программное обеспечение для обработки результатов эксперимента.

5. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных результатов, показавшее совпадение по числу волн, однако скорости в эксперименте оказались ниже. Поэтому требуется доработка математических моделей НСД в детонационных камерах плоскорадиального типа.

6. Определен достаточно высокий удельный импульс ПРК на НСД без дальнейшего расширения потока в сопле.

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в мире проявляется повышенный интерес к способу детонационного сжигания топлив в связи с идеей создания детонационного двигателя. По сравнению с режимом дефлаграции, он позволяет интенсивно, более термодинамически выгодно и стабильно проводить сжигание различных топлив в камерах меньших габаритов, определяемых характерным размером детонационной волны.

В работе представлены результаты реализации и исследования режимов непрерывной спиновой детонации потоков газообразных водорода и кислорода в плоскорадиальных камерах сгорания с истечением, как к центру при удельных расходах $g_{\Sigma} \approx 3,6\text{--}37,9 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, так и к периферии при $g_{\Sigma} \approx 23\text{--}93 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ и выше. Проведены эксперименты с истечением как в среду с противодавлением, так и в среду без противодавления. При этом окислитель в камеру подавался как под давлением, так и в режиме эжекции – без избыточного давления. Показано, что при одинаковых параметрах подачи водорода и кислорода в камеру сгорания экспериментальные и расчетные параметры детонационных волн весьма схожи. В частности, близки скорость волн и их количество по окружности камеры. Экспериментальная скорость движения ПДВ ниже расчетной примерно на 5 % ($D = 2,415$ против 2,54 км/с).

Выбор плоскорадиальной геометрии камеры сгорания для изучения процессов детонационного сжигания обусловлен тем, что она хорошо вписывается в комплекс двигателя или другую энергетическую установку с развитием конструкции в радиальном направлении [93] и возможностью набора пакетов из таких камер под одним общим соплом.

Реализованы автоколебательные режимы пульсирующей и непрерывной спиновой детонации с количеством волн НСД от 1 до 12 шт. при принудительной подаче компонентов водород–кислородной смеси, и с

количеством волн от 1 до 2 при эжекции газообразного кислорода. В отличие от камер кольцевой цилиндрической геометрии, для камер плоскорадиальной геометрии наличие центробежных сил, действующих на продукты в волне разрежения при НСД в направлении течения, существенно влияет на параметры детонационных волн. Выявлено влияние на истечение компонентов водород-кислородной смеси в камеру сгорания и продуктов на выходе, что важно для практических приложений. Определен удельный импульс, лежащий в пределах 133–263 с для ПРК с диаметром выходного отверстия 20–40 мм, сопоставлен с результатом для цилиндрической КС, приведенным в работах [39, 94].

Разработаны новые методики обработки результатов эксперимента: спроектирована и изготовлена высокоскоростная видеокамера, имеющая минимальное время экспозиции на уровне промышленных высокоскоростных видеокамер. Благодаря функции видеосъемки одной строкой прибор превосходит серийные образцы видеокамер по продолжительности видеосъемки и по времени безаварийной работы в помещениях с повышенной температурой.

Разработано программное обеспечение для обработки зарегистрированных высокоскоростной видеокамерой изображений, определения направления движения детонационных волн, вычисления скорости волн, выявления сталкивающихся волн, а также восстановления картины течения в цилиндрической системе координат. Показания датчиков давления после оцифровки также обрабатывались программно, что позволяло определять характер истечения газов через форсунку, а также вычислять удельный импульс продуктов и тягу. Авторские права на программное обеспечение были зарегистрированы в ФИПС в установленном порядке и получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [95]. Программное обеспечение было поставлено в АО «НПО Энергомаш» им. Академика В.П. Глушко в рамках контракта для задач, связанных с

ракетным двигателестроением, где использовалось при испытаниях макета ракетного двигателя на спиновой детонации по программе «Ифрит».

Решение поставленных задач расширяет знания в области физики горения и взрыва топлив, а также приближает использование детонационного горения в практических приложениях. Дальнейшее развитие работы представлено в публикации [96], где имитируются условия применения НСД на ракетном двигателе с подачей кислорода в сжиженном виде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михельсон, В. А. О нормальной скорости воспламенения взрывчатых газовых смесей // Научные труды Императорского Московского университета по математике и физике / В. А. Михельсон. – М.: 1893. – Т. 10. – С. 1–93.
2. Chapman, D. L. On the rate of explosion in gases / D. L. Chapman // *Philosophical Magazine*. – 1899. – V. 47, No. 189. – P. 90–104.
3. Jouguet, E. Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz / E. Jouguet // *Journal des Mathématiques Pures et Appliquées*. – 1905. – V. 1. – P. 347–425.
4. Зельдович, Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения / Я. Б. Зельдович // *Журнал технической физики*. – 1940. – Т. 10. – № 17. – С. 1453–1461.
5. Hoffman, H. Reaction propulsion by intermittent detonative combustion / H. Hoffman // *Volkenrode Translation. German Ministry of Supply*. – 1940.
6. Nicholls, J. A. Studies in connection with stabilized gaseous detonation waves / J. A. Nicholls, E. K. Dabora, R. A. Gealler // *Symposium on Combustion and Detonation*. – 1958. – V. 7, Iss. 1. – P. 766–772.
7. Dunlap, R. A Preliminary Study of the Application of Steady-State Detonative Combustion to a Reaction Engine / R. Dunlap, R. Brehm, J. Nicholls // *Jet. Propuls.* – 1958. – V. 28, No. 7. – P. 451.
8. Gross, R. Research of supersonic combustion / R. Gross // *ARS-Journal*. – 1960. – V. 29, No. 1. – P. 63.
9. Gross, R. A. A Study of Supersonic Combustion / R. A. Gross, W. Chinitz // *Journal of the Aero/Space Sciences*. – 1960. – V. 27, No. 7. – P. 517–524.
10. Солоухин, Р. И. Пульсирующее горение газа за ударной волной в сверхзвуковом потоке / Р. И. Солоухин // *ПМТФ*. – 1961.

11. Солоухин, Р. И. Ударные волны и детонация в газах / Р. И. Солоухин. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963.

12. Bazhenova, T. V. Gas ignition behind the Shock Waves / T. V. Bazhenova, R. I. Soloukhin // VII Symposium of Combustion. – London. – 1959. – P. 866–875.

13. Беспалов, И. В. О жизни и деятельности Е. С. Щетинкова (1907–1976) / И. В. Беспалов, В. С. Макарон // Из истории авиации и космонавтики. Выпуск 46. Советское национальное объединение историков естествознания и техники. – М.: ИИЕТ, АН СССР, 1982. – С. 3–12.

14. Пензин, В. И. Е. С. Щетинков – изобретатель ГПВРД / В. И. Пензин // Из истории авиации и космонавтики. Выпуск 46. Советское национальное объединение историков естествознания и техники. – М.: ИИЕТ, АН СССР, 1982. – С. 3–12.

15. Щетинков, Е. С. Физика горения газов / Е. С. Щетинков. – М.: Наука, 1965.

16. Фридман, Д. Применение результатов научных исследований по вопросам горения к работе прямоточных двигателей / Д. Фридман, В. Веннет, Е. Цвик // IV Международный симпозиум по вопросам горения и детонационных волн. – Пер. с англ. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1958. – С. 526–533.

17. Weber, R. An analysis of ramjet engines using supersonic combustion / R. Weber, J. Mackay // NASA TN. 4386, September 1958.

18. Глотов, Г. Ф. Газодинамическая стабилизация горения водородовоздушных смесей в сверхзвуковом потоке / Г. Ф. Глотов // Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по газодинамике взрывных и ударных волн, детонационного и сверхзвукового горения. – Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 1991. – С. 56–57.

19. Барановский, В. И. Исследование рабочего процесса в камерах сгорания прямоточных ВРД в МАИ / В. И. Барановский, В. М. Левин // Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по газодинамике взрывных и ударных волн, детонационного и сверхзвукового горения. – Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 1991. – С. 21–22.

20. Левин, В. М. Широкодиапазонная камера сгорания прямоточного ВРД / В. М. Левин // Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по газодинамике взрывных и ударных волн, детонационного и сверхзвукового горения. – Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 1991. – С. 94.

21. Виноградов, В. А. Экспериментальное исследование горения жидкого углеводородного топлива в канале при сверхзвуковой скорости / В. А. Виноградов, В. А. Кобыжский, М. Д. Петров // Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по газодинамике взрывных и ударных волн, детонационного и сверхзвукового горения. – Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 1991. – С. 41.

22. Пензин, В. И. К вопросу о месте детонационного ГПВРД в семействе прямоточных двигателей / В. И. Пензин // Препринт № 59. – М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1992.

23. Власенко, В. В. Численное моделирование невязких течений с горением водорода за скачками уплотнения в детонационных волнах / В. В. Власенко, В. А. Сабельников // Физика горения и взрыва. – 1995. – Т. 31, №3. – С. 118–133.

24. Берлянд, А. Т. Численное исследование структуры течения с наклонной детонационной волной на клине при углах клина, близких к критическому / А. Т. Берлянд, В. В. Власенко // Математическое моделирование. – 1999. – Т. 11, № 3. – С. 83–94.

25. Безгин, Л. В. Влияние входных параметров на течение в модельной детонационной камере сгорания / Л. В. Безгин, А. Н. Ганжало, О. В. Гуськов,

В. И. Копченков // XXII научные чтения по космонавтике. Тезисы докладов. – М.: ИИЕТ РАН, 1998.

26. Баев, В. К. Горение в сверхзвуковом потоке / В. К. Баев, В. И. Головичев, П. К. Третьяков. – Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 1984.

27. Войцеховский, Б. В. Стационарная детонация / Б. В. Войцеховский // ДАН СССР. – 1959. – Т. 129, № 6. – С. 1254–1256.

28. Войцеховский, Б. В. Структура фронта детонации в газах / Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.

29. Войцеховский, Б. В. Спиновая стационарная детонация / Б. В. Войцеховский // ПМТФ. – 1960. – № 3. – С. 157–164.

30. Войцеховский, Б. В. Стационарная детонация / Б. В. Войцеховский // Ученый совет по народнохозяйственному использованию взрыва. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1960. – Вып. 13. – С. 24–39.

31. Войцеховский, Б. В. Оптические исследования фронта спиновой детонационной волны / Б. В. Войцеховский, Б. Е. Котов // Изв. АН СССР. – 1958. – № 4. – С. 74–80.

32. Михайлов, В. В. К исследованиям непрерывной детонации в кольцевом канале / В. В. Михайлов, М. Е. Топчиян // Физика горения и взрыва. – 1965. – Т. 2, № 4. – С. 20–23.

33. Митрофанов, В. В. Отчет инв. №2216. / В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян, А. А. Васильев и др. // Институт Гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО АН СССР. – Новосибирск, 1974.

34. Быковский, Ф. А. Спиновая детонация газов в цилиндрической камере / Ф. А. Быковский, И. Д. Клопотов, В. В. Митрофанов // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 224, № 5. – С. 1038–1041.

35. Фролов, С. М. Экспериментальная демонстрация рабочего процесса в импульсно-детонационном жидкостном ракетном двигателе / С. М. Фролов,

В. С. Аксенов, В. С. Иванов // Химическая физика. – 2011. – Т. 30, № 8. – С. 58–61.

36. Аксенов, В. С. Экспериментальные исследования непрерывного детонационного горения водорода в кольцевой камере сгорания / В. С. Аксенов, П. А. Гусев, В. С. Иванов, С. М. Фролов, И. О. Шамшин // Третий Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации. – Минск, 11-14 ноября 2013 г., ИТМО НАН Беларуси, 2013. – С. 7.

37. Аксенов, В. С. Экспериментальные исследования непрерывного детонационного горения водорода в кольцевой камере сгорания / В. С. Аксенов, П. А. Гусев, В. С. Иванов, С. Н. Медведев, С. М. Фролов, И. О. Шамшин // Горение и взрыв. – М.: Торус Пресс, 2014.– Вып. 7. – С. 121–128.

38. Быковский, Ф. А. Непрерывное детонационное сжигание кольцевого слоя газовой смеси / Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, No. 5. – С. 17–20.

39. Frolov, S. M. Experimental proof of Zel'dovich cycle efficiency gain over cycle with constant pressure combustion for hydrogen-oxygen fuel mixture / S. M. Frolov, V. S. Aksenov, V. S. Ivanov // International Journal of Hydrogen Energy. – V. 40, No. 21. – P. 6970–6975.

40. Hishida, M. Fundamentals of rotating detonations / M. Hishida, T. Fujivara, P. Wolanski // Shock Waves. – 2009. – V. 19, № 1. – P. 1–10.

41. Wang, Y. H. Discovery of breathing phenomena in continuously rotating detonation / Y. H. Wang, J. P. Wang, T. Y. Shi, Y. S. Liu, Y. S. Li, Y. Li // Procedia Engineering. – 2013. – V. 67. – P. 188–196.

42. Фролов, С. М. Экспериментальное доказательство энергоэффективности термодинамического цикла Зельдовича / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, П. А. Гусев, В. С. Иванов, С. Н. Медведев, И. О. Шамшин // Доклады академии наук. – 2014. – Т. 459, № 6. – С. 711–716.

43. Фролов, С. М. Энергоэффективность непрерывно-детонационных камер сгорания / С. М. Фролов, В. С. Аксёнов, А. В. Дубровский, В. С. Иванов, И. О. Шамшин // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, № 2. – С. 102–117.

44. Третьяков, П. К. Сверхзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель с пульсирующим режимом запуска (СПВРД с ПРЗ) и способ его работы / П. К. Третьяков, А. Н. Прохоров. – Патент № 2651016 С1. – 2018.

45. Вовк, М. Ю. Способ работы прямоточного воздушно-реактивного двигателя и устройство для его реализации / М. Ю. Вовк, Е. Ю. Марчуков, В. Г. Петриенко, С. М. Фролов. – Патент № 2724557 С1. – 2019.

46. Быковский, Ф. А. Детонационное горение газовой смеси в радиальных кольцевых камерах / Ф. А. Быковский, А. А. Васильев, Е. Ф. Ведерников, В. В. Митрофанов // Физика горения и взрыва. – 1994. – Т. 30, № 4. – С. 111–118.

47. Быковский, Ф. А. Непрерывная спиновая детонация водородо-кислородной смеси в плоскорадиальной камере / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников, А. Н. Самсонов, А. С. Зинцова // Достижения в области неравновесных процессов. Плазма, Горение и Атмосфера. – Москва, 2014. – С. 200–208.

48. Быковский, Ф. А. Непрерывное детонационное сжигание топливно-воздушных смесей / Ф. А. Быковский, В. В. Митрофанов, Е. Ф. Ведерников // Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 33, № 3. – С. 120–131.

49. Nakagami, S. Experimental Visualization of the Structure of Rotating Detonation Waves in a Disk-Shaped Combustor / S. Nakagami, K. Matsuoka, J. Kasahara, Y. Kumazawa, J. Fujii, A. Matsuo, I. Funaki // Journal of Propulsion and Power. – 2017. – V. 33, No. 1. – P. 80–88.

50. Higashi, J. Experimental Study of the Disk-Shaped Rotating Detonation Turbine Engine / J. Higashi, S. Nakagami, K. Matsuoka, J. Kasahara, A. Matsuo,

I. Funaki, and H. Moriai // 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum. – 2017. – Article number AIAA 2017-1286.

51. Быковский, Ф. А. Высокоскоростной ждущий фоторегистратор / Ф. А. Быковский // Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. – 1981. – №2. – С. 85–89.

52. Быковский, Ф. А. Непрерывная спиновая детонация: монография / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан; под общ. ред. В. М. Титова. – Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 2013. – 423 с.

53. Samsonov, A. The device for high speed digital recording and analysis of detonation waves / A. Samsonov // 10th International Conference on Pattern recognition and Image analysis: New information technologies. Thesis. – St. Petersburg, 2010. – V. 2. – P. 121–124.

54. Samsonov, A. N. A Device for High-Speed Video Filming of Supersonic Flows and Moving Particles / A. N. Samsonov // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2015. – V. 25, No. 2 – P. 255–262.

55. Самсонов, А. Н. Архитектура устройства высокоскоростной видеосъемки сверхзвуковых потоков / А. Н. Самсонов // 5-ая Молодежная конкурс-конференция по Фотонике и оптическим технологиям ФОТ-2014. – Новосибирск, 2014, – С. 40–41.

56. Самсонов, А. Н. Высокоскоростная параллельная архитектура обработки больших потоков видеоданных / А. Н. Самсонов, Х. В. Самойлова // VII Международная научно-практическая конференция Актуальные проблемы радиофизики. – Томск, 18–22 сентября 2017.

57. Ануфриев, И. С. Изучение аэродинамической структуры потока в модели вихревой топки стереоскопическим методом цифровой трассерной визуализации / И. С. Ануфриев, П. А. Куйбин, Е. Ю. Шадрин, Д. К. Шараборин, О. В. Шарыпов // Теплофизика и аэромеханика. – Т. 23, № 4. – 2016. – С. 645–648.

58. Kuibin, P. Effects of inertia and thermocapillarity in non-isothermal film flow / P. Kuibin, O. Sharypov // *Procedia IUTAM*. – 2013. – P. 166–173.

59. Фролов, С. М. Хемионизационная и акустическая диагностика рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, А. В. Дубровский, А. Э. Зангиев, В. С. Иванов, С. Н. Медведев, И. О. Шамшин // *Доклады академии наук*. – 2015. – Т. 465, № 1. – С. 62–67.

60. Быковский, Ф. А. Детонационное сжигание каменного угля / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников, Ю. А. Жолобов // *Физика горения и взрыва*. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 89–94.

61. Васильев, А. А. Детонационные волны в газах / А. А. Васильев, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян // *Физика горения и взрыва*. – 1987. – Т. 23, № 5. – С. 109–131.

62. 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.

63. Быковский, Ф. А. Непрерывная детонация водородо-кислородной смеси в плоскорадиальной камере с истечением к периферии / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников, А. Н. Самсонов, О. В. Мисовец // *Всероссийская конференция XXXI «Сибирский теплофизический семинар», 17-19 ноября 2014, Новосибирск, Россия, сборник докладов*. – С. 173–178.

64. Samsonov, A. N. High speed video recording system on a chip for detonation jet engine testing / A. N. Samsonov, K. V. Samoiloa // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – V. 158. – Article number 01028.

65. Самсонов, А. Н. Устройство высокоскоростной видеосъемки детонационных волн / А. Н. Самсонов, Х. В. Самойлова // *VIII Международная научно-практическая конференция Лаврентьевские*

чтения по математике, механике и физике. – Новосибирск. 7-11 сентября 2015. – С. 199.

66. Самсонов, А. Н. Построчная видеосъемка детонационных волн, разработка архитектуры оборудования и программного обеспечения / А. Н. Самсонов, Х. В. Самойлова // XIV Всероссийский семинар Динамика многофазных сред. – Новосибирск, 2-5 ноября 2015. – С. 85.

67. Самсонов, А. Н. Испытания устройства высокоскоростной видеосъемки детонационных волн / А. Н. Самсонов, Х. В. Самойлова // Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва. – Новосибирск, 4-8 сентября 2017. – С. 227.

68. Samsonov, A. N. High speed video recording system on a chip for detonation jet engine testing / A. N. Samsonov, K. V. Samoiloa // VI International Forum for Young Scientists. – Tomsk, 26-28 April 2018.

69. Быковский, Ф. А. Детонационное сжигание смеси водород-кислород в плоскорadiaльной 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.

70. Bykovskii, F. A. Continuous spin detonation of a hydrogen-oxygen mixture in a plane-radial combustor / F. A. Bykovskii, S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. N. Samsonov, A. S. Zintsova: Edited by A.M. Starik and S.M. Frolov // Advances in nonequilibrium processes Plasma, Combustion, and Atmosphere. – 2014. – С. 200–208.

71. 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.

72. 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.

73. Быковский, Ф. А. Параметры непрерывной детонации смесей метан/водород – воздух при добавлении воздуха в продукты сгорания / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников // Физика горения и взрыва. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 83–94.

74. Быковский, Ф. А. Непрерывная детонация смеси жидкий керосин–воздух с добавкой водорода или синтез-газа / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников // Физика горения и взрыва. – 2019. – Т. 55, № 5. – С. 83–92.

75. 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.

76. Bykovskii, F. A. Pressure profile for transverse waves of continuous spin detonation in a heterogeneous fuel-air mixture / F. A. Bykovskii, S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. N. Samsonov, A. I. Sychev, A. E. Tarnaikin: edited by S. M. Frolov and G. D. Roy // Progress in Detonation Physics – M.: Torus press, 2016. – P. 311–320.

77. Rybnikov, A. I. Three-dimensional numerical simulation of continuous spin detonation in hydrogen-oxygen and hydrogen-air mixtures using OpenFOAM package / A. I. Rybnikov, E. V. Simonov, A. M. Gurin, A. V. Trilis, A. N. Samsonov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1404. – Article number 012065.

78. Быковский, Ф. А. Самоподдерживающаяся пульсирующая детонация потока газовой смеси / Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 4. – С. 99–106.

79. 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. – V. 30, No. 3. – P. 235–243.

80. Bykovskii, F. A. Detonation combustion of a hydrogen–oxygen gas mixture in a plane-radial chamber with exhaustion toward the periphery / F. A. Bykovskii, S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. N. Samsonov, E. L. Popov // 27th ICDERS Conference. – Beijing, 28 July–2 August, 2019. – P. 1–6.

81. Bykovskii, F. A. Continuous detonation of a hydrogen–oxygen gas mixture in a plane-radial combustor with exhaustion toward the periphery / F. A. Bykovskii, S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. E. Tarnaikin, A. N. Samsonov // *Advances in Pulsed and Continuous Detonation*. – M.: Torus Press. – 2019. – P. 309–324.

82. Быковский, Ф. А. Инициирование детонации в потоках водородно-воздушных смесей / Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников, С. В. Полозов, Ю. В. Голубев; под общ. ред. С. М. Фролова // *Импульсные детонационные двигатели*. – М.: Торус Пресс, 2006. – С. 521–540.

83. Быковский, Ф. А. Инициирование детонации в потоках топливно-воздушных смесей / Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников, С. В. Полозов, Ю. В. Голубев // *Физика горения и взрыва*. – 2007. – Т. 43, № 3. – С. 110–120.

84. Льюис, Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе // М.: Мир, 1968. – 592 с.

85. Николаев, Ю. А. Расчёт равновесных течений в детонационных волнах в газах / Ю. А. Николаев, М. Е. Топчян // *Физика горения и взрыва*. – 1977. – Т. 13, № 3. – С. 393–404.

86. Митрофанов, В. В. Некоторые критические явления в детонации, связанные с потерями импульса / В. В. Митрофанов // *Физика горения и взрыва*. – 1983. – Т. 19, №4. – С. 169–174.

87. Дейч, М. Е. Техническая газодинамика / М. Е. Дейч – 3-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.

88. Быковский, Ф. А. Непрерывная детонация в режиме нестационарной эжекции окислителя / Ф. А. Быковский, С. А. Ждан, Е. Ф. Ведерников // Доклады Академии Наук. – 2009. – Т. 424, № 1. – С. 40–42.

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

90. Bykovskii, F. A. Detonation of a hydrogen-oxygen gas mixture in a plane-radial combustor with exhaustion toward the periphery in the regime of oxygen ejection / F. A. Bykovskii, S. A. Zhdan, E. F. Vedernikov, A. N. Samsonov, E. L. Popov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1128. – Article number 012075.

91. Абрамович, Г. М. Прикладная газовая динамика / Г. М. Абрамович – М.: Наука, 1976. – 888 с.

92. Быковский, Ф. А. Коэффициенты расхода насадков и их комбинаций при прямом и обратном течении / Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников // Прикладная механика и техническая физика. – 1996. – Т. 37, № 4. – С. 98–104.

93. 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.

94. Фролов, С. М. Экспериментальные исследования стендовых образцов малоразмерных ракетных двигателей с непрерывно-детонационными камерами сгорания / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, П. А. Гусев, В. С. Иванов, С. Н. Медведев, И. О. Шамшин // Горение и взрыв. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 151–163.

95. 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.

96. 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.

97. 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.