

На правах рукописи

Бивол Григорий Юрьевич

**Влияние геометрии канала и покрытия стенок на распространение  
детонационных волн**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук

Москва 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

**Научный руководитель:** д.ф.-м.н., проф., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), зав. отделом **Голуб Виктор Владимирович**

**Официальные оппоненты:** д.ф.-м.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук, в.н.с. **Марков Владимир Васильевич**

к.ф.-м.н., Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», доцент **Аксенов Виктор Серафимович**

**Ведущая организация:** Государственное научно-учебное учреждение Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Защита состоится «26» декабря 2018 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 Объединенного института высоких температур РАН, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Объединенного института высоких температур РАН, <https://jiht.ru/>. Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, ОИВТ РАН.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.110.02,  
к.ф.-м.н.



М.М. Васильев

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы исследования**

Водород считается одним из наиболее перспективных видов экологически чистого топлива. Однако физические и химические свойства водорода делают его чрезвычайно взрывоопасным. Актуальность исследования детонации смесей водорода с воздухом объясняется необходимостью прогнозирования поведения водородно-воздушных облаков и динамики горения на промышленных объектах, транспортных и газовых станциях. С одной стороны, водород - это легкий газ, который может покинуть открытое пространство за короткое время. С другой стороны, его молекулярно-кинетические свойства позволяют ему воспламениться в самом широком диапазоне концентраций с минимальной задержкой. Это значительно ограничивает широкое использование водорода и требует наиболее детального изучения динамики горения и разработки универсальных методов подавления детонации.

Одним из способов подавления детонации, рассматриваемым в научной литературе, является нанесение различных пористых или упругих материалов на стенки детонационной трубы. В опубликованных работах, где изучалось подавление газовой детонации, обычно использовались разбавленные инертными газами смеси водорода или углеводородов с кислородом при низком давлении. Это соответствует условиям возможного применения таких структур для предотвращения или, по крайней мере, ослабления детонации в водородо-воздушных смесях лишь при низких концентрациях. Кроме того, влияние толщины поглощающего материала на динамику детонационной волны не изучалось.

Вопросы управления детонацией также актуальны при решении задач повышения эффективности сжигания топлива. Пересжатая детонационная волна – это волна детонации, которая проходит по ударно-сжатой непрореагировавшей смеси. Давление на фронте пересжатой детонационной волны может быть в несколько раз выше давления на фронте стационарной детонации Чепмена–Жуге. Такое превышение параметров за фронтом пересжатых детонационных волн позволяет производить детонационное напыление материалов с высокой температурой плавления, увеличить производительность и качество напыления.

В последнее время особое внимание уделяется бескислородным способам «сжигания» топлива – пиролизу ненасыщенных углеводородов. Наиболее перспективным топливом в подобных концептуальных энергетических установках является газообразный ацетилен. Актуальность исследования процессов горения ацетилена обусловлена не только энергетическим, но и экологическим интересами к данному топливу, способному вследствие ряда

химических преобразований в энергетических установках обеспечивать образование твердых продуктов пиролиза.

При этом существенной проблемой при работе с газообразным ацетиленом, является его способность к взрывному бескислородному саморазложению. Из-за малой ширины детонационной ячейки 0.1-0.2 мм в присутствии кислорода использование подобных смесей в энергетических установках крайне затруднено.

### **Цели и задачи работы**

Основная цель работы заключалась в экспериментальном исследовании механизмов распада детонационных волн в газах, а также в исследовании влияния граничных условий и параметров канала на процесс распада и реинициирования детонационной волны. Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Определение параметров детонационной волны при её распаде и возможном последующем повышении давления выше давления Чепмена-Жуге в канале с переменным сечением в смеси метан-кислород.
2. Определение влияния состава смеси и параметров пористых покрытий на параметры и характер распространения детонационной волны в смеси водород-воздух в канале с пористым покрытием на стенках. Определение условий, при которых происходит повторное возникновение детонации после прохождения пористой секции детонационной трубы.
3. Определение условий возникновения нестационарных режимов распространения детонации и быстрого пламени в каналах субкритического размера в смесях ацетилен-воздух. Определение условий реинициирования детонации в каналах, поперечный размер которых близок к ширине детонационной ячейки.

### **Научная новизна**

1. Установлено, что распад детонационной волны при выходе в более широкий канал (отношение диаметров равно 2.25) может привести к двукратному повышению давления относительно параметров детонации Чепмена-Жуге после распространения через сужение канала, если в данной смеси диаметр канала равен по размеру 4.5-6.0 ячейкам детонации.
2. Установлено, что с помощью пенополиуретана (ППУ) и стальной ваты на стенках канала может происходить или не происходить распад детонационной волны в смеси водород-воздух в зависимости от состава горючей смеси и толщины пористого покрытия. Впервые обнаружено, что восстановление волны детонации после прохождения пористой секции возможно, когда скорость фронта пламени превышает скорость звука детонационных продуктов. Установлено влияние параметров пористых

покрытий на динамику распространения и параметры детонационных/ударных волн.

3. В смеси ацетилен-воздух в зависимости от отношения ширины канала к ширине детонационной ячейки определены условия существования трёх режимов горения в канале субкритического диаметра: стационарная детонация, распад с последующим повторным возникновением, затухающее осциллирующее пламя.

### **Научная и практическая ценность**

Результаты работы могут быть использованы при:

- 1) разработке фундаментальных основ методов безопасного хранения и использования газообразного водорода;
- 2) разработке методов ослабления детонационной волны в газах с помощью пористых покрытий на стенке;
- 3) разработке способов повышения эффективности преобразования химической энергии топлива в полезную работу путем импульсного детонационного горения;
- 4) тестировании схем химической кинетики, описывающих процессы горения.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментальные зависимости режима распространения детонации в смеси метан-кислород в канале с расширением и сужением. Полученные параметры пересжатой детонации выше параметров Чепмена-Жуге в канале переменного сечения.
2. Экспериментальные результаты воздействия пористых покрытий на стенке канала на режим распространения детонации в смеси водород-воздух и зависимости параметров детонационной волны от характеристик и типа пористого материала.
3. Экспериментально определенные режимы распространения детонационной волны в смеси ацетилен-воздух в канале субкритического сечения и зависимости режима распространения от размера канала и состава горючей смеси.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: 36 Международный симпозиум по горению (36th International symposium on combustion, 2016), 11-й Международный симпозиум по опасностям, предотвращению и смягчению последствий промышленных взрывов (11th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial

Explosion, 2016), 31 Международный симпозиум по ударным волнам (31st International Symposium on Shock Waves) (2017 г.), XI Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях, (2016 г.), V Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации (2017), Академические чтения по космонавтике (2015–2017 гг.), конференции ОИВТ РАН по Физике экстремальных состояний вещества (2014-2016 гг.), конференции Московского физико-технического института (государственного университета) (2014-2016 гг.) и другие специализированные конференции.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в создании экспериментальной установки, отладки диагностической аппаратуры для получения необходимых данных, создании алгоритмов обработки данных, доработки методики экспериментального изучения детонационных волн. Все экспериментальные результаты получены при определяющем участии автора. Автором была проведена обработка экспериментальных данных и их сопоставление с существующими в литературе. Формулировка задачи, обсуждение результатов и формулировка выводов проводилась при непосредственном участии автора.

### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 25 печатных изданиях, 10 из которых в журналах, рекомендованных ВАК, 15 – в сборниках тезисов и трудах конференций.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Диссертация содержит 106 страниц, 7 таблиц и 60 рисунков. Список цитируемой литературы включает 88 наименований.

### **Содержание работы**

Литературный обзор посвящен распаду и повторному инициированию детонации в каналах переменного диаметра, влиянию пористых покрытий на распространение детонации, формированию нестационарных режимов детонации в каналах субкритического размера.

Представлены работы, посвященные режиму многоступенчатого формирования детонации, влиянию сужающегося конуса на распространение ударной волны [1]. Указаны основные применения детонационных волн в газовых средах. Приведены работы, описывающие процесс распада детонационной волны и реинициирования.

Приведены работы, описывающие подавление детонационной волны пористым покрытием на стенках канала. Показано влияние шероховатости канала на пределы распространения детонации в канале [2]. Представлены работы, посвященные нормальному ударному воздействию ударной волны на пористые материалы. Приведены параметры распространения фронта пламени в канале, заполненном стальными шариками [3]. Представлено сравнение влияния различных материалов на стенках канала на подавление взрывных волн и горения [4]. Указаны наиболее вероятные причины, приводящие к затуханию горения в пористых материалах.

Нестационарные режимы распространения горения, включая галопирующую детонацию, подробно описаны для смесей этилен-кислород. Было показано, что при определенных условиях скорость пламени может принимать колебательный режим. Приведены параметры галопирующей детонации, такие как период и шаг вдоль оси [5].

**Глава 1** посвящена экспериментальному исследованию формирования пересжатой волны детонации в метано-кислородных смесях в канале переменного сечения.

В данной главе описан экспериментальный стенд, описана постановка задачи и метод усиления детонационной волны относительно параметров Чепмена-Жуге в сужающейся секции канала.

Схема детонационной камеры сгорания представлена на рисунке 1. Стальная детонационная камера сгорания переменного сечения состояла из нескольких секций: формирующей секции (1 на рисунке 1), U-образной секции (5 на рисунке 1), измерительной секции, (6 на рисунке 1), и конуса сужения (4 на рисунке 1).

Воспламенение газовой смеси осуществлялось с помощью искрового разряда, расположенного у закрытого конца канала. Для создания пересжатой волны детонации осуществлялся распад стационарной детонационной волны при переходе в канал большего сечения. Затем созданный комплекс ударной волны и движущегося за ним фронта пламени распространялся в канале с коническим сужением. Формирование пересжатой детонационной волны с параметрами, в несколько раз превышающими параметры стационарной детонации Чепмена-Жуге, регистрировалось на выходе из конического сужения (4 на рисунке 1). Определены скорость и давление детонационной волны в зависимости от состава смеси. Представлены размеры детонационных ячеек в зависимости от состава смеси.

Определялись параметры пересжатой волны детонации в канале переменного сечения как в покоящейся предварительно перемешанной смеси метана с кислородом, так и при отдельной подаче метана и кислорода в режиме потока.

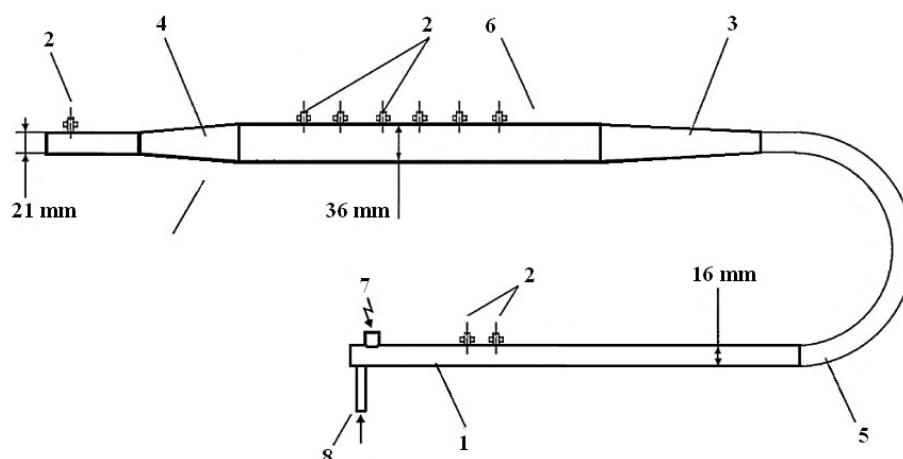


Рисунок 1 – Схема детонационной камеры сгорания. 1 – формирующая секция, 2 – датчики давления и фотодиоды, 3 – конус расширения, 4 – конус сужения, 5 – U-образная секция, 6 – измерительная секция, 7 – свеча зажигания, 8 – магистрали с топливом и окислителем.

В главе представлены экспериментальные пространственно-временные диаграммы распада детонационной волны на ударную волну и фронт пламени в расширяющейся секции канала. Пример такой диаграммы показан на рисунке 2.

Варьируемой величиной в эксперименте было соотношение между топливом и окислителем в смеси метан-кислород в диапазоне ER (equivalence ratio, коэффициент избытка горючего) от 0.8 до 1.5.

Также было использовано два типа смешения компонентов топлива: заранее перемешанная смесь в емкости высокого давления (покоящаяся смесь) и смешение компонентов горючей смеси непосредственно в детонационной камере под поджиганием (режим потока).

Были определены размеры детонационных ячеек с помощью закопченной фольги, установленной внутри канала. Ширина детонационных ячеек  $\lambda$  составляла для различных смесей от 4 мм (ER = 1) до 8 мм (ER = 0.85).

Были определены условия, при которых в режиме потока наблюдался распад детонационной волны с последующим её усилением выше параметров Чепмена-Жуге. Было высказано предположение, что основным критерием, определяющим режим распространения детонации в расширяющемся канале, является количество детонационных ячеек, приходящихся на ширину канала.



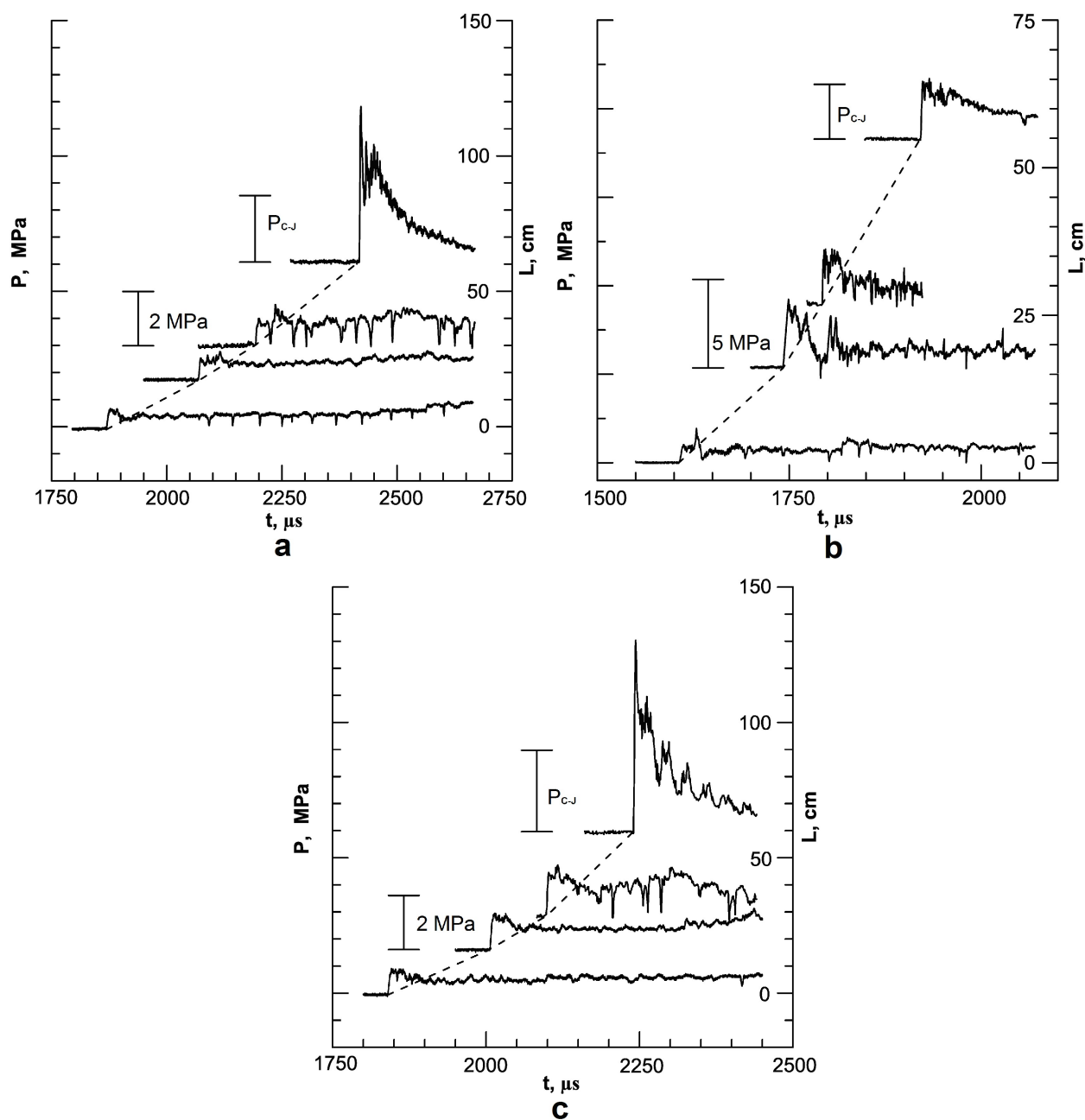


Рисунок 2 – Показания датчиков давления в измерительной секции камеры сгорания. Режим потока без использования расширяющегося конуса. ER = 0.85 (a), 1 (b), 1.5 (c).

В главе было показано, что в случае режима потока детонация сохраняла параметры близкие к детонации Чепмена-Жуге в диапазоне ER от 0.5 до 2.5, в то время как для покоящейся смеси данный диапазон ER был от 0.75 до 1.75. Было сделано предположение, что более высокая стабильность детонации связана с возникновением турбулентности при перемешивании компонентов смеси в канале. В главе показано отставание фронта горения от ударной волны при её распаде в измерительной секции. Диагностика фронта горения проводилась с помощью фотодиодов, расположенных в одном сечении с датчиками давления.

В главе приведено сравнение параметров полученной пересжатой детонационной волны с параметрами детонационной волны Чепмена-Жуге. Было выяснено, что давление может повышаться вдвое относительно стационарной детонации. Приведен критерий возникновения пересжатой детонации, основанный на количестве детонационных ячеек, приходящихся на диаметр канала.

**Глава 2** посвящена экспериментальному исследованию распространения детонационной волны в смеси водород-воздух в каналах круглого сечения с пористыми покрытиями на стенках. Определялось влияние толщины пористого покрытия на параметры детонационной волны после прохождения пористой секции. В главе описан стенд, на котором проводились эксперименты по ослаблению детонации, постановка задачи и результаты экспериментов.

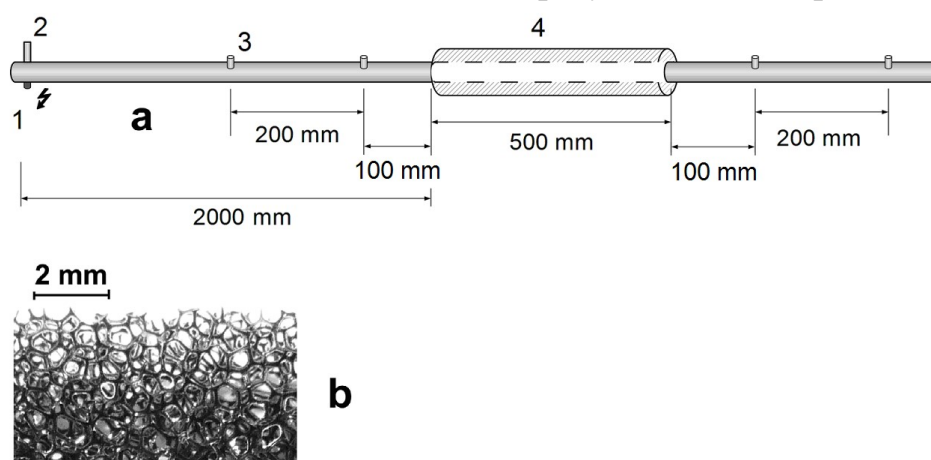


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки (а), фото пористого материала. (b). 1 – свеча зажигания, 2 – подача горючей смеси, 3 – датчики давления, 4 – пористая секция.

Эксперименты проводились в стальной трубе круглого сечения. На рисунке 3 показана схема установки. Смесь водорода и воздуха подавалась с закрытого конца детонационной трубы. Искровой промежуток также находился на закрытом конце детонационной трубы, а второй конец детонационной трубы был открыт на атмосферу.

На расстоянии 2000 мм от закрытого конца детонационной трубки была размещена стальная секция с пористым слоем на стенках. Использовался набор стальных секций с различными внутренними диаметрами: 20, 26, 30, 40 мм. Вся внутренняя поверхность секции была покрыта пористым материалом. В качестве поглощающего материала использовали пенополиуретан (ППУ) с 40 порами на дюйм (40 PPI) и плотностью  $30 \text{ кг/м}^3$ . Толщина покрытия составляла 3 мм, 5 мм и 10 мм, внутренний диаметр канала при этом оставался равным составлял 20 мм.

В главе представлены пространственно-временные диаграммы детонационной или ударной волны после прохождения секции с пористым покрытием на стенке (рисунок 4).

Были определены условия, при которых наступает распад детонационной волны на ударную волну и фронт пламени. Было обнаружено три различных режима распространения детонации в канале с пористыми стенками в зависимости от толщины покрытия и состава смеси: режим стабильной детонации, режим восстановления и распад детонации. Было показано, что повторное возникновение детонации после пористой секции происходит в случае, когда скорость волны выше скорости звука Чепмена-Жуге.

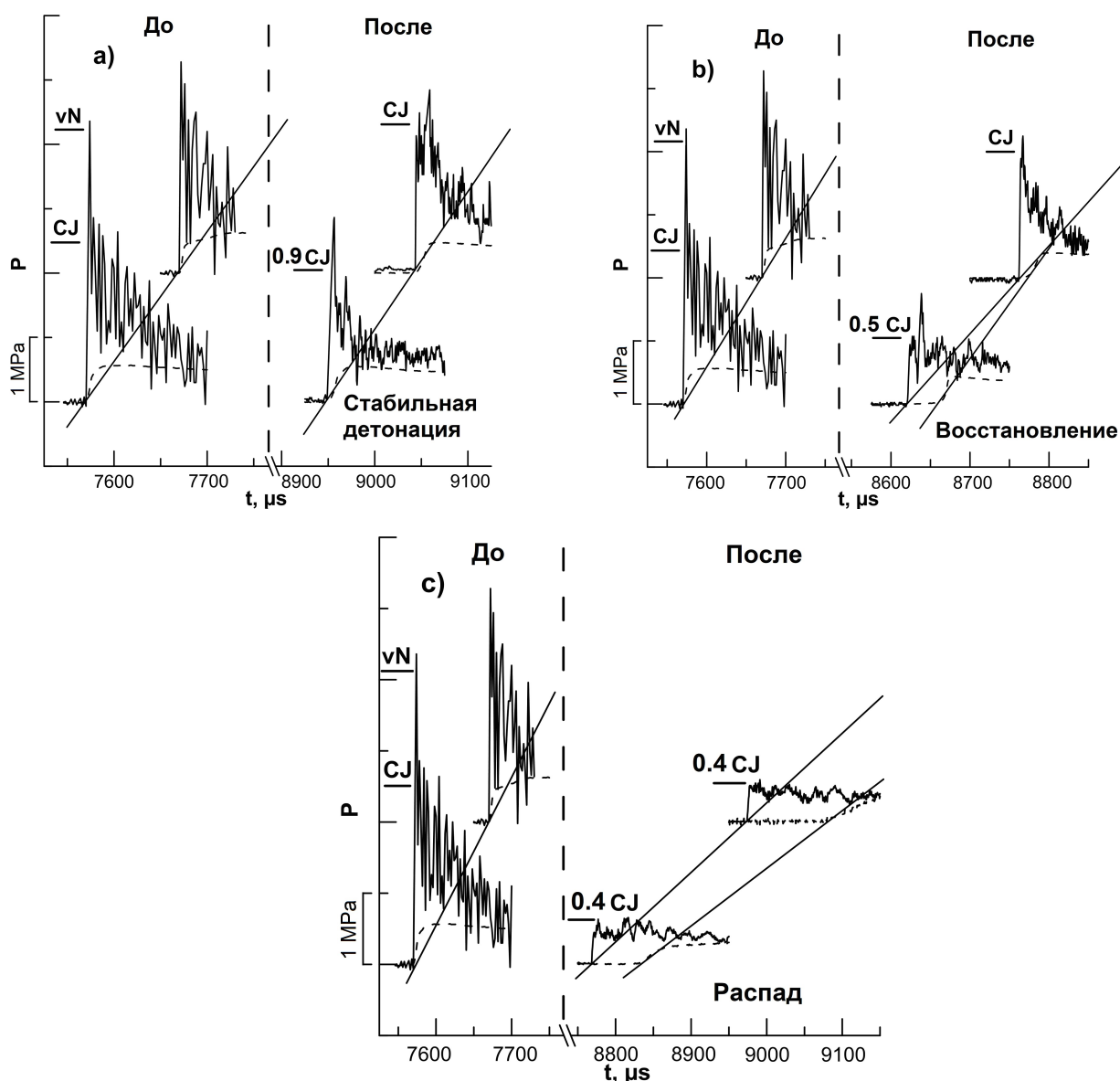


Рисунок 4 – Показания датчиков давления и фотодиодов до и после пористой секции для трёх толщин ППУ: 3 мм (а), 5 мм (б) и 10 мм (в). Стехиометрическая смесь ( $ER = 1$ ) водорода с воздухом. Штриховая линия – показания фотодиодов, сплошная линия – показания датчиков давления.

В главе 3 экспериментально исследовалось влияние типа и параметров пористого покрытия на стенках на параметры детонационной волны, распространяющейся в этом канале. В главе описана специально созданная для данных экспериментов детонационная камера (см. рисунок 5).

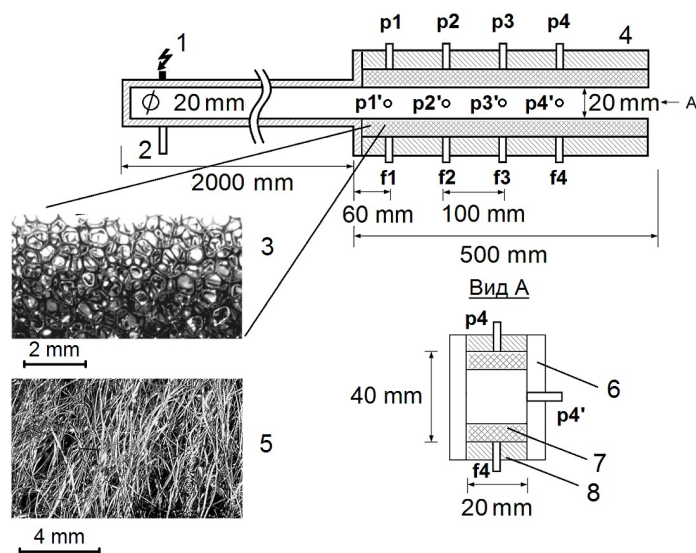


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки: 1 – искровой промежуток, 2 – подача горючей смеси, 3 – фото ППУ, 4 – прозрачная секция с пористым покрытием, p1–p4' – датчики давления, f1–f4 – фотодиоды, 5 – фото стальной ваты, 6 – прозрачная стенка, 7– пористое покрытие или стальная пластина толщиной 10 мм, 8 – твёрдая стенка.

В главе детально рассмотрены механизмы распространения детонационных волн в каналах со следующими покрытиями: ППУ с открытыми порами, стальная вата, ППУ с непроницаемой пленкой на поверхности. Приведено сравнение параметров детонационной волны при распространении в каналах с данными покрытиями и жестком канале, где наблюдалось распространение стационарной детонации Чепмена-Жуге. В главе приведены пространственно-временные диаграммы распространения ударной волны и фронта горения в канале с пористыми стенками. Примеры таких диаграмм приведены на рисунке 6. Эксперименты показали, что ППУ и стальная вата приводят к распаду детонации и снижению давления ударной волны вдвое относительно стационарной детонации. Было показано, что покрытие ППУ непроницаемой пленкой приводило к увеличению давления ударной волны под пористым материалом относительно давления стационарной детонации (рисунок 7).

В главе приведены расчеты импульса давления для всех использованных пористых материалов. Было получено, что по мере увеличения расстояния от начала канала с пористым покрытием увеличивается разность импульсов давления относительно стационарной детонации. Импульс давления под ППУ с

открытыми порами сначала уменьшался на 0.7-2.0 Па\*с в положении 60 мм (датчик №1 на рисунке 7), а в конце секции 360 мм (датчик №4 на рисунке 7), уменьшался на 3.5-4.3 Па\*с. В то же время максимальное снижение регистрировалось для стальной ваты. Эта разница сначала достигала 2.7 Па\*с в положении 60 мм (датчик №1 на рисунке 7), а затем увеличивалась до значения 10.2 Па\*с.

Положительное значение  $\Delta J$  указывало на увеличение импульса давления, создаваемого ударной волной/детонации при использовании ППУ, покрытого плёнкой. В то же время максимальное увеличение импульса давления 5.3 Па\*с регистрировалось не в начале канала (датчик №1 на рисунке 7), а на расстоянии 160 мм (датчик №2 на рисунке 7). После этого импульс давления уменьшался, и на расстоянии 360 мм (датчик №4 на рисунке 7) указанная разница принимала отрицательное значение 2.2 Па\*с.

Представлены численные оценки давления под пористым материалом для случая косых ударных волн. Были представлены скорости ударной волны в случае использования пористых покрытий. Наибольшая скорость ударной волны характерна для пористого покрытия с пленкой. Анализируя все эксперименты, было установлено, что среднее относительное падение скорости достигает 25-30%.

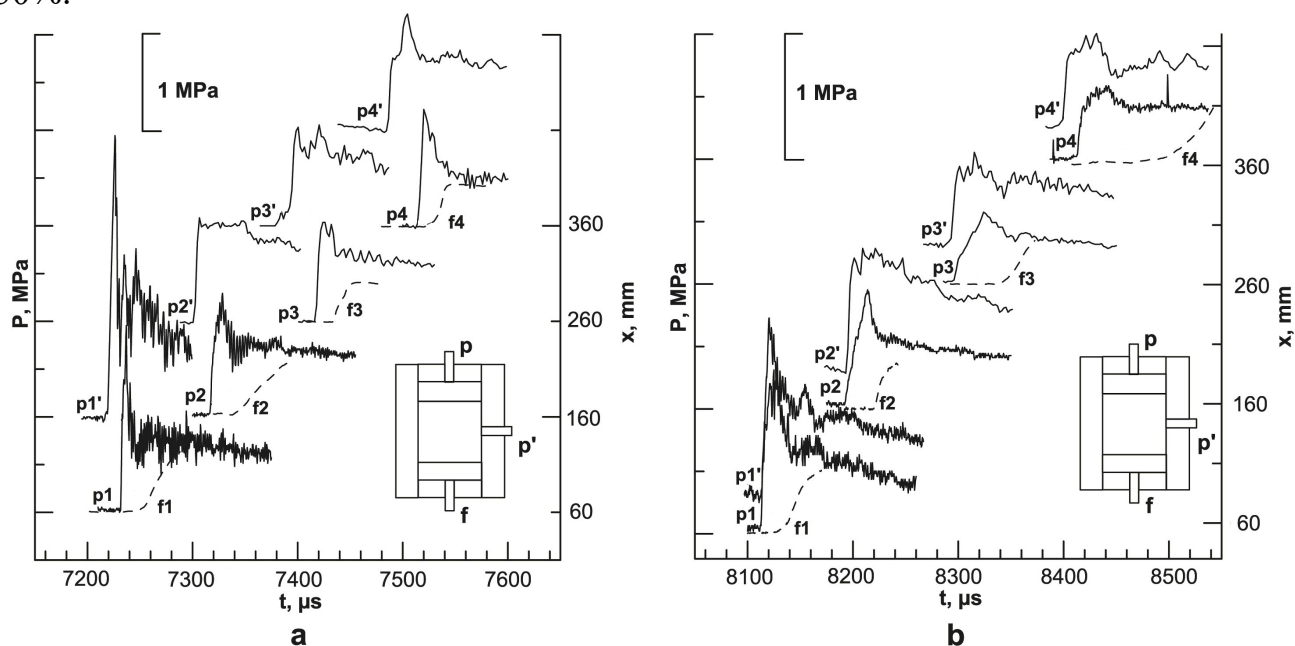


Рисунок 6 – Эволюция давления (сплошная линия) и фронта пламени (штриховая линия) под пористой секцией и на боковой стенке с разными пористыми материалами: а – ППУ, б – стальная вата. Правая ось показывает расстояние от начала пористой секции.

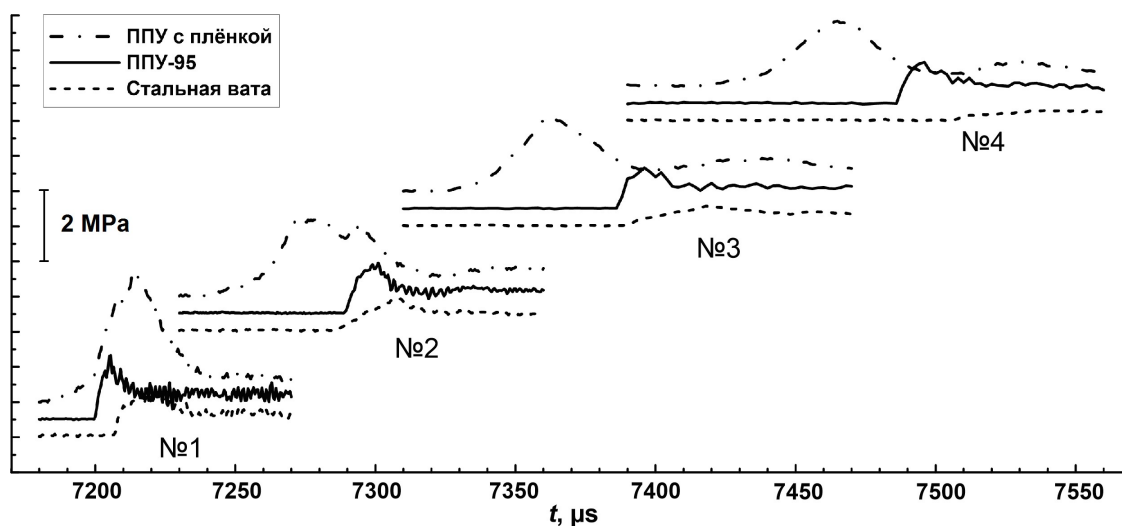


Рисунок 7 – Показания датчиков давления в канале с ППУ, ППУ с пленкой, стальной ватой на стенке для четырех позиций.

В главе представлены теньевые снимки распространения детонации в пористых каналах, полученные с помощью теневого прибора ИАБ-451 с импульсной подсветкой. Примеры таких снимков представлены на рисунке 8.

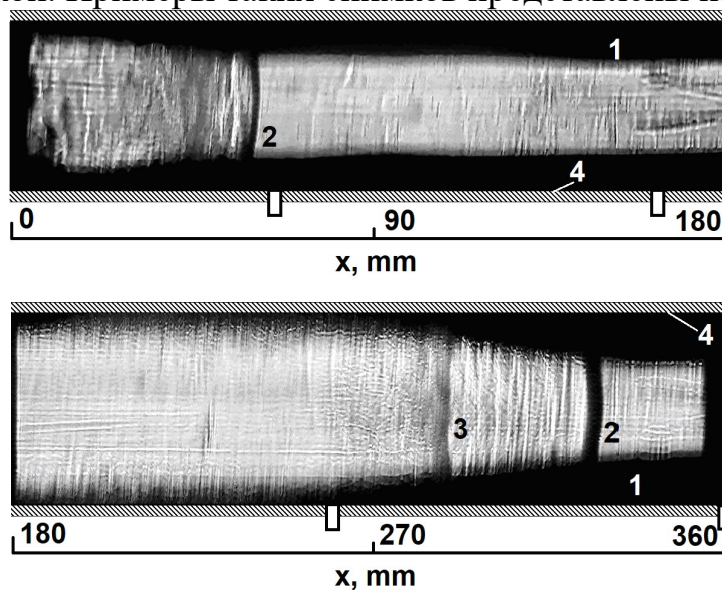


Рисунок 8 – Теньевые изображения распада детонационной волны в канале с ППУ на стенке: 40 мкс после входа волны в пористую секцию (вверху) и 200 мкс после входа волны (внизу). 1 – ППУ, 2 – ударная волна, 3 – фронт пламени, 4 – твёрдая стенка. Волна двигалась слева направо.

На снимках был запечатлен процесс распада детонационной волны на ударную волну и фронт горения. Было зафиксировано сжатие пористого материала после прохождения ударной волны вдоль его поверхности.

В главе представлены экспериментальные пространственно-временные диаграммы распространения фронта горения, полученные на основе кадров,



полученных скоростной камерой в режиме пространственно-временной развертки. Образцы таких диаграмм приведены на рисунке 9.

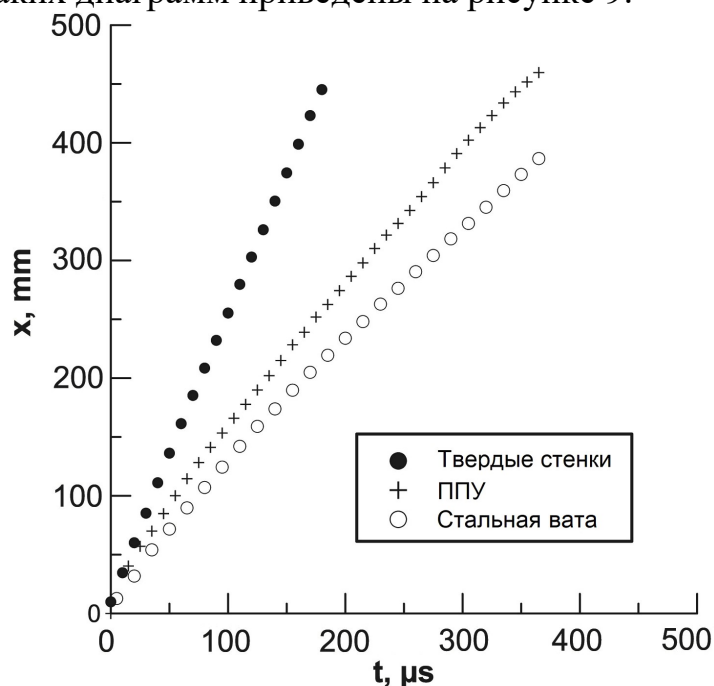


Рисунок 9 – Пространственно-временная диаграмма торможения фронта пламени вдоль оси канала и траектория фронта пламени в твёрдом канале. ППУ и стальная вата в качестве пористого материала,  $ER = 1.5$ .

Было показано, что торможение фронта пламени начинается сразу в начале пористой секции. Падение скорости фронта пламени происходило на расстоянии 3-4 диаметров трубы. Резкое падение скорости фронта детонационного пламени внутри пористого канала регистрировалось на расстоянии нескольких диаметров трубы и определялось отношением скорости стационарной детонационной волны  $D_{C-J}$  к скорости распространения поперечной волны.

На основе данных экспериментально полученных скоростей ударной волны был рассчитан поток газа за ударной волной с использованием классических уравнений ударной волны. Скорости потока газа за волной были рассчитаны для двух типов пористых покрытий, приведено сравнение скорости потока газа со скоростью фронта горения.

Кроме того, в главе рассмотрена зависимость параметров детонационной волны при распространении в канале с ППУ, имеющим различный размер пор. Приведены параметры данных пористых материалов. Приведены показания датчиков давления для четырех позиций внутри пористого канала. Образцы подобных показаний приведены на рисунке 10. На основе показаний датчиков давления было показано, что давление на первом датчике находилось в диапазоне 1.0-1.4 МПа для всех пористых материалов с самым высоким давлением в пористом материале с большими порами. Конечное давление показало прямую

зависимость давления от размера пор: самое низкое давление наблюдалось при использовании ППУ с  $PP1 = 40$  и  $PP1 = 80$  (около 0.6 МПа), наибольший при использовании ППУ с  $PP1 = 10$  (1.3 МПа). Было отмечено, что в случае ППУ с  $PP1 = 40$  и  $PP1 = 80$  наблюдался монотонный спад давления, в то время как в более крупных типах ППУ минимальное давление наблюдалось на расстоянии 160 мм от начала пористого участка, после спада следует увеличение давления.

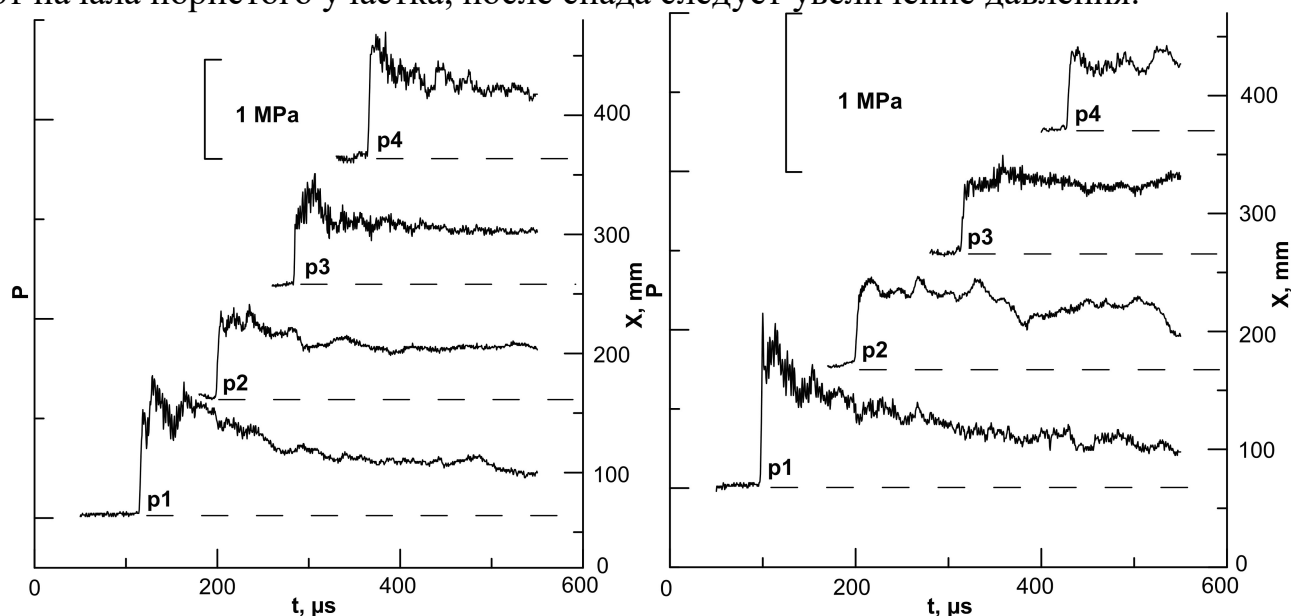


Рисунок 10 – Показания датчиков давления при движении детонации вдоль канала с ППУ с  $PP1 = 10$  (слева) и  $PP1 = 80$  (справа) на стенке. Водородно-воздушная смесь,  $ER = 1$ .

В главе приведены графики динамики давления ударной волны в канале с пористым покрытием. Пример такого графика показан на рисунке 11. Было обнаружено немонотонное влияние размера пор на распространение детонационной волны в пористом канале. В главе приведено объяснение затухания детонации в случае пористого покрытия  $PP1 = 80$  и повторного возникновения детонации в случае  $PP1 = 10$ . В случае использования пористого материала с  $PP1 = 10$  поперечные волны проходят через пористый материал без затухания и отражаются от твердой стенки, что позволяет повторно инициировать детонационную волну. Размер пор влияет на длину беспрепятственного светового пути, то есть расстояние, которое может пройти свет (и, следовательно, волна), не сталкиваясь с препятствиями на пути. Для ППУ с  $PP1 = 20$  и  $40$  это расстояние составляет 5 и 2.5 мм, соответственно. Для ППУ с  $PP1 = 80$  это расстояние меньше 1 мм, для ППУ с  $PP1 = 10$  это расстояние более 10 мм, что соответствует толщине пористого материала в этом эксперименте. В пористом материале с наименьшими порами поперечные волны испытывают множественные отражения и тем самым замедляются и ослабевают. Ослабленная отраженная волна покидает пористый материал с задержкой и больше не может поддерживать детонационное горение.



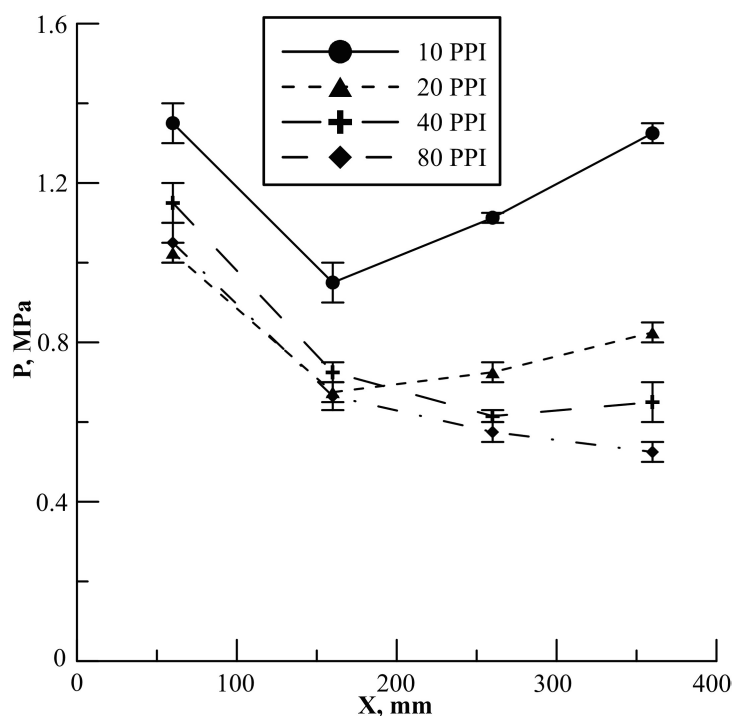


Рисунок 11 – Пик давления при распространении волны детонации вдоль ППУ с различным количеством пор на дюйм (PPI). Водородно-воздушная смесь, ER = 1.

В главе 4 экспериментально исследовалось нестационарное распространение детонации смеси ацетилена с воздухом в узких каналах. Эксперименты проводились с использованием двух детонационных каналов квадратного сечения. Поперечные размеры каналов были 3x3 мм и 5x5 мм, длина каналов составляла 1200 мм. Они были соединены с детонационной трубкой диаметра 20 мм и длиной 3000 мм (рисунок 12). Правый конец узкого канала был открыт, так что давление внутри канала и детонационной трубки было равно атмосферному давлению. Отсутствие закрытого конца в узком канале позволяет избежать распространения отраженных волновых возмущений внутри канала.

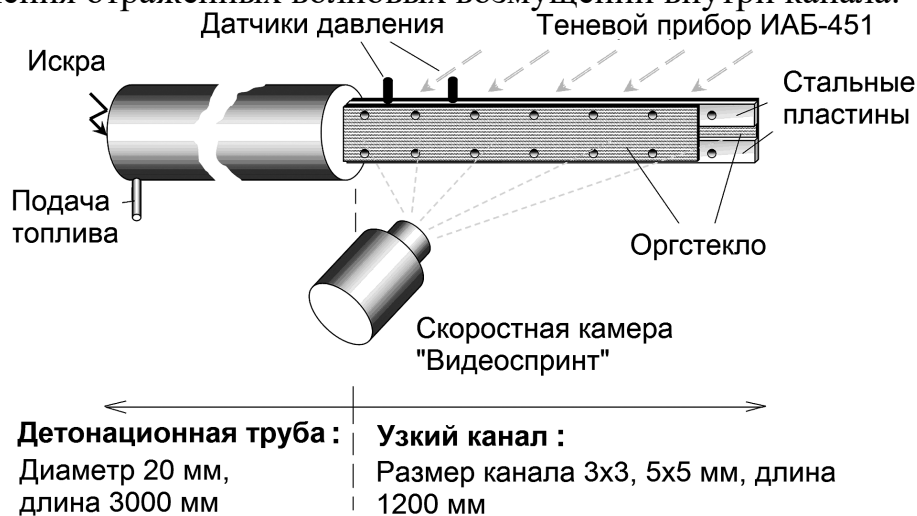


Рисунок 12 – Схема экспериментальной установки.

Были описаны следующие режимы горения, полученные в экспериментах в узких каналах: стационарная детонация, затухание детонации с последующим переходом горения в детонацию, затухающее осциллирующее пламя. Приведены графики зависимости скорости пламени от времени и расстояния для нестационарных режимов распространения детонации, построенные на основе экспериментально полученных пространственно-временных разверток движения фронта пламени. Примеры таких графиков приведены на рисунке 13.

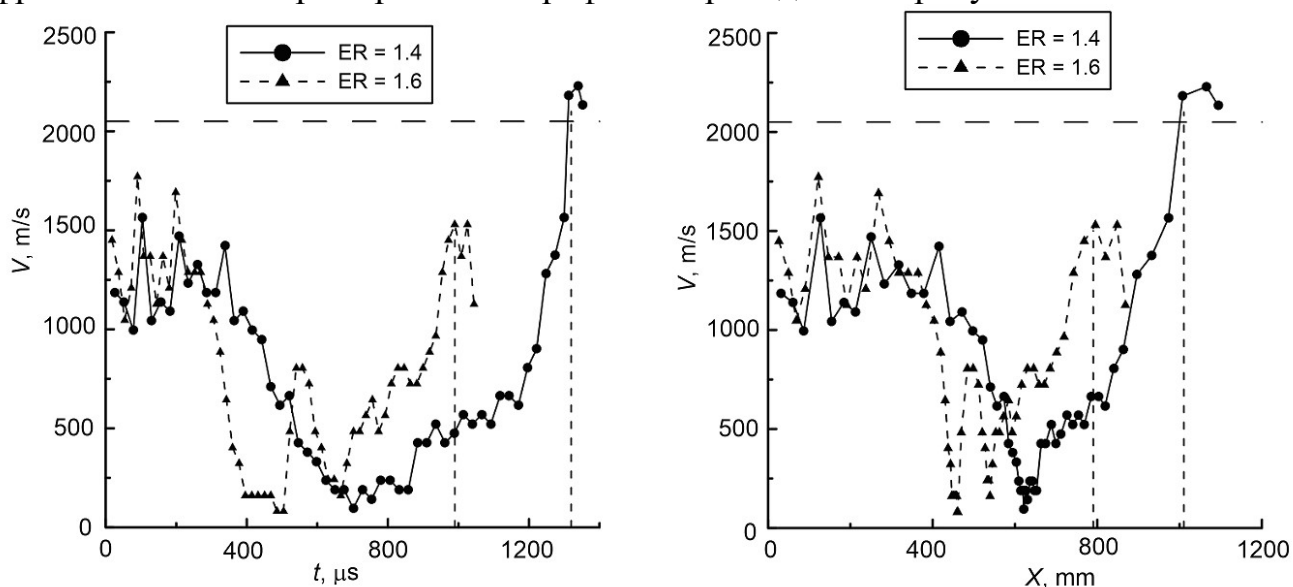


Рисунок 13 – Эволюция скорости фронта пламени от времени (слева) и от расстояния от начала узкого канала (справа) для двух смесей:  $ER=1.4$  ( $D/\lambda = 1$ ) и  $ER=1.6$  ( $D/\lambda = 0.9$ ). Канал шириной 5 мм.

Приведены расстояния повторного возникновения детонации, периоды осцилляций скорости пламени. В главе приведен безразмерный критерий, определяющий режим распространения фронта пламени, который представляет собой отношение поперечного размера канала к ширине детонационной ячейки.

## Заключение

1. Экспериментально изучено распространение детонации в каналах переменного сечения как в покоящейся предварительно перемешанной смеси метана с кислородом, так и при отдельной подаче метана и кислорода в режиме потока. Стационарная детонационная волна с параметрами Чепмена-Жуге в этой смеси сохраняет свои параметры на выходе из канала, если в данной смеси на диаметре канала располагается более десяти ячеек детонации. Увеличение давления на фронте детонационной волны в 2 раза по сравнению с давлением Чепмена-Жуге в этой смеси достигается, если в данной смеси на диаметре канала располагается 4.5-6.0 ячеек детонации.

2. Экспериментально исследован распад детонации при прохождении через пористый канал. Давление к концу пористой секции со стальной ватой и ППУ было в 6 и 4 раза ниже, чем в канале с твердыми стенками. Скорость пламени упала ниже скорости звука Чепмена-Жуге в обоих случаях. Использование ППУ, покрытого непроницаемой пленкой, приводило к увеличению амплитуды ударной волны выше значений амплитуды детонации Чепмена-Жуге.

3. Изучен процесс распространения фронта пламени в канале субкритического поперечного размера для смеси ацетилен-воздух. Полученные данные позволили обнаружить три режима распространения пламени: стационарную детонацию, затухающую осциллирующую форму распространения горения и режим с распадом и последующим восстановлением детонации в узком канале. В случае режима реиницирования повторное возникновение детонации происходило на расстоянии 200 поперечных размеров от начала узкой секции.

Безразмерный критерий, определяющий режим распространения фронта пламени, представляет собой отношение поперечного размера канала к ширине детонационной ячейки. Интервал  $D/\lambda = 1.0-1.1$  является предельным интервалом бифуркации между стационарной детонацией, распадом и повторным иницированием детонации. Для  $D/\lambda = 0.5-1.0$  в канале 5x5 мм и для  $D/\lambda = 0.5-0.6$  в канале 3x3 мм было зарегистрировано затухающее осциллирующее горение.

## **Литература**

1. Khasainov B. et al. Detonation diffraction from circular tubes to cones //Shock Waves. – 2005. – V. 14. – №. 3. – P. 187-192.
2. Zhang B. The influence of wall roughness on detonation limits in hydrogen–oxygen mixture //Combustion and Flame. – 2016. – V. 169. – P. 333-339.
3. Ciccarelli G., Johansen C., Parravani M. Transition in the propagation mechanism during flame acceleration in porous media //Proceedings of the Combustion Institute. – 2011. – V. 33. – №. 2. – P. 2273-2278.
4. Guo C. et al. Experimental study of gaseous detonation propagation over acoustically absorbing walls //Shock Waves. – 2002. – V. 11. – №. 5. – P. 353-359.
5. Vasil'Ev A. A. Quasi-steady regimes of wave propagation in active mixtures //Shock Waves. – 2008. – V. 18. – №. 4. – P. 245-253.

## **Публикации автора по теме диссертации в журналах из перечня ВАК**

1. Golovastov S. V., Bivol G. Y., Alexandrova D. Evolution of detonation wave and parameters of its attenuation when passing along a porous coating // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – V. 100. – P. 124-134.
2. Bivol G. Y., Golovastov S. V., Golub V. V. Attenuation and recovery of detonation wave after passing through acoustically absorbing section in hydrogen-air mixture at

- atmospheric pressure // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2016. – V 43. – P. 311-314.
3. Bivol G. Y., Golovastov S. V., Golub V. V. Detonation suppression in hydrogen–air mixtures using porous coatings on the walls // Shock Waves. – 2018. – V. 28. – № 5. – P. 1011-1018.
  4. Bivol G. Y., Golovastov S. V., Golub V. V. Prechamber initiation of gaseous detonation in a channel // Combustion Science and Technology. – 2016. – V. 188. – №. 7. – P. 1165-1179.
  5. Bivol G. Y., Golovastov S. V., Golub V. V. Propagation of detonation wave in hydrogen–air mixture in channels with sound-absorbing surfaces // Technical Physics Letters. – 2015. – V. 41. – №. 12. – P. 1167-1169.
  6. Бивол Г. Ю., Головастов С. В., Голуб В. В. Формирование пересжатой волны детонации в потоке метано-кислородных смесей в канале переменного сечения // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55. – №. 4. – С. 576-581.
  7. Ленкевич Д. А. и др. Параметрическое исследование распространения детонации в узких каналах, заполненных смесью пропан–бутан–кислород // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52. – №. 6. – С. 916-920.
  8. Bivol G. Y. et al. Attenuation of a hydrogen-air detonation by acoustic absorbing covering // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. – 2015. – V. 653. – №. 1. – P. 012067.
  9. Golovastov S. V., Bivol G. Y. Flame front propagation in a channel with porous walls // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, – 2016. – V. 774. – №. 1. – P. 012089.
  10. Bivol G. Y., Golovastov S. V., Golub V. V. Attenuation of the detonation wave in hydrogen–air mixture // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. – 2016. – V. 774. – №. 1. – P. 012086.

Бивол Григорий Юрьевич

**Влияние геометрии канала и покрытия стенок на распространение детонационных волн**

Автореферат

Подписано в печать		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Ус.-печ.л.
Тираж 100 экз.	Заказ N	Бесплатно
ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр.2		