Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 544.45

Бивол Григорий Юрьевич

Влияние геометрии канала и покрытия стенок на распространение детонационных волн

01.04.14 –теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
Доктор физико-математических наук
В.В. Голуб

Москва – 2018

Введение ... 3
Обзор литературы ... 10
Общая теория детонации ... 10
Распад и повторное инициирование газовой детонации в расширяющемся канале ... 14
Влияние пористых покрытий на динамику детонационной волны в канале ... 17
Нестационарные режимы детонации в субкритических каналах ... 26
Глава 1. Формирование пересжатой волны детонации в канале переменного сечения ... 30
1.1 Экспериментальная установка ... 30
1.2 Результаты экспериментов и обсуждение ... 33
1.3 Выводы ... 40
Глава 2. Влияние пористого покрытия на распространение детонационной волны ... 41
2.1 Экспериментальная установка ... 41
2.2 Результаты и обсуждение ... 43
2.3 Выводы ... 49
Глава 3. Влияние типа пористого материала на распад детонации в газах ... 51
3.1 Экспериментальная установка ... 51
3.2 Результаты и обсуждение ... 53
3.3 Выводы ... 85
Глава 4. Режимы распространения детонации в канале субкритического диаметра. ... 87
4.1 Экспериментальная установка ... 87
4.2 Экспериментальные результаты ... 89
4.3 Выводы ... 95
Заключение ... 97
Благодарность ... 98
Список литературы ... 98

Введение

Актуальность темы исследования

Водород считается одним из наиболее перспективных видов экологически чистого топлива. Однако некоторые 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 молекулярные кинетические свойства позволяют ему воспламеняться 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. Несмотря на то, что механические и кинетические особенности детонационного горения ацетилена с кислородом изучены довольно подробно, детонационные характеристики ацетилено-воздушных смесей требуют тщательного изучения.

Цели и задачи работы

Основная цель работы заключалась в экспериментальном исследовании различных механизмов распада детонационных волн в газах, а так же 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 параметров выше параметров Чепмена-Жуге в канале с переменным сечением в смеси метан-кислород.

2. Определение влияния состава смеси и характеристик 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 её двукратному усилению относительно параметров детонации Чепмена-Жуге при дальнейшем распространении 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 начальных условий. 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 различных 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 новых 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.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальные зависимости режима распространения детонации в смеси метан-кислород в канале с расширением и сужением. Пределы существования режима с повышением давления 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 необходимвых 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 издании, 10 из которых в журналах, рекомендованных ВАК, 15 – в сборниках тезисов и трудах конференций.

Публикации 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.

Избранные публикации, не входящие в список ВАК

1. Bivol G. Y., Golovastov S. V. Decaying modes of spinning detonation in narrow channel // XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, book of abstracts. – 2017. – P. 181.
2. Головастов С.В., Бивол Г.Ю. Затухающие формы распространения галопирующей детонации в узких каналах // Материалы XII Международной конференции по Прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ’2018). – 2018. – С. 118-120.

Структура и содержание глав диссертации

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

Обзор литературы

Общая теория детонации

Детонация была открыта в 1881 двумя парами французских ученых Бертело и Вьей [1] и Малляром и Ле Шателье [2]. Детонация представляет собой самоподдерживающийся режим распространения горения, который характеризуется комплексом из ударной волны и следующей за ней зоны экзотермических химических реакций. В отличие от медленного горения, при котором происходит понижение давления, для детонации характерно сильное повышение давления. Выражение для скорости детонационной волны было получено Михельсоном [3] на основе работ Гюгонио [4]. Чепмен [5] и Жуге [6] продолжили работу над теорией, которая была названа детонацией Чепмена-Жуге.

Простейшая теория детонации, предложенная Чепменом и Жуге, предполагает, что превращение горючей смеси в продукты реакции происходит через бесконечно тонкую поверхность и химические реакции происходят мгновенно. В результате продукты детонации за фронтом ударной волны находятся в термодинамическом равновесии и их свойства могут быть рассчитаны с использованием термодинамики. Соответствующая кривая Гюгонио для детонации, следовательно, соответствует полному химическому равновесию.

Согласно теории Чепмена-Жуге, устойчивая детонация возникает, когда линия Рэлея касается кривой Гюгонио, как показано на рисунке 1. В касательной точке скорость потока относительно фронта ударной волны равна локальной скорости звука. Так как любые другие пересечения линии Рэлея с кривой Гюгонио выше касательной линии, то детонационная волна Чепмена-Жуге является самой медленной волной, которая превращает горючую смесь в продукты реакции. Классическая теория Чепмена-Жуге не требует знания структуры самой волны и, по сути, ищет единственное решение одномерных уравнений сохранения на фронте детонации, в котором поток за волной является звуковым.

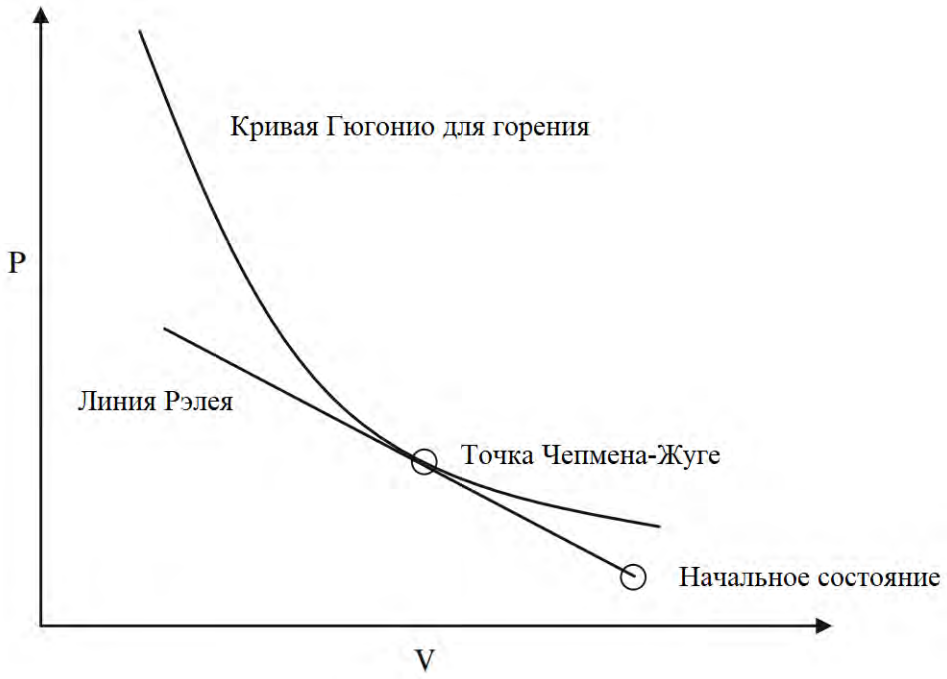


Рисунок 1 – Расположение точки Чепмена-Жуге на кривой Гюгонио допустимых термодинамических состояний [7].

Дальнейшее развитие теория детонации получила благодаря работам Зельдовича [8], фон Неймана [9] и Дёринга [10]. В данной теории, названной впоследствии ZND теорией — по именам открывших её ученых, учитывалось конечное время протекание химической реакции.

ZND теория утверждает, что детонационная структура состоит из фронта ударной волны, который адиабатически сжимает и нагревает горючую смесь до температуры воспламенения. За ним следует зона индукции, где активные радикалы генерируются тепловой диссоциацией ударно-нагретых молекул. Предположение о том, что реакции не происходят в ударной волне, подтверждается тем фактом, что ударные волны характеризуются малой толщиной, не более нескольких длин свободного пробега, в то время как химические реакции возникают лишь после достаточного числа столкновений молекул. Быстрое высвобождение химической энергии в зоне реакции приводит к дополнительному повышению температуры и падению давления. Именно это расширение ускоряет газы назад от фронта, что приводит к движению ведущей ударной волны. Схемы детонационной волны согласно ZND теории показаны на рисунках 2 и 3.

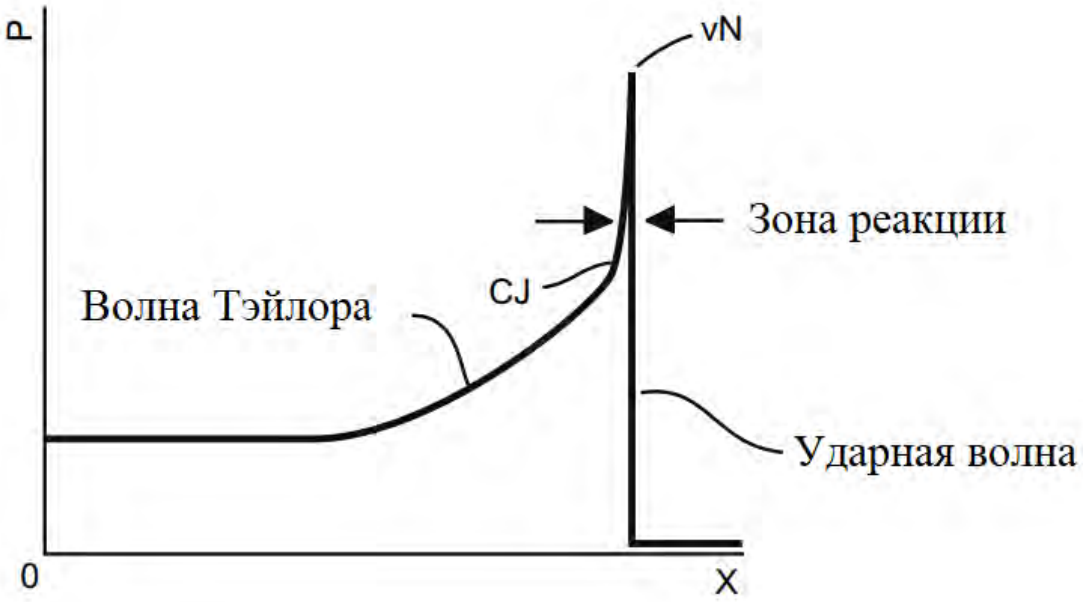


Рисунок 2 – Профиль давления в детонационной волне согласно ZND теории [11].

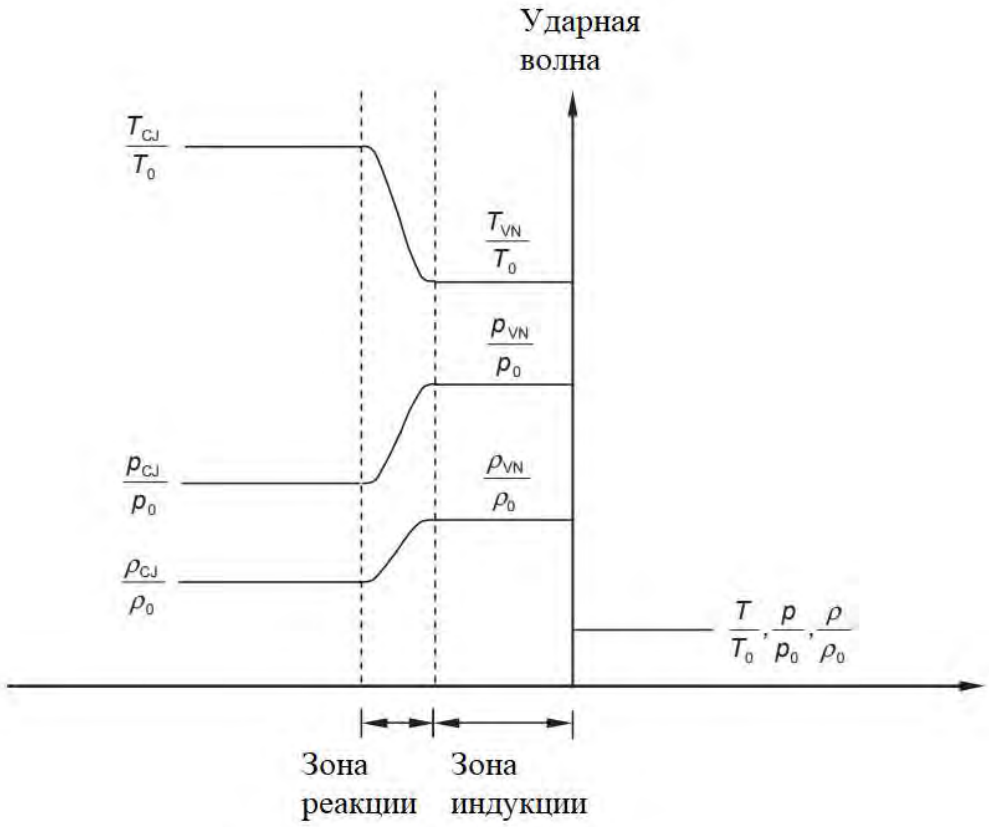


Рисунок 3 – Схема модели ZND. CJ – параметры в точке Чепмена-Жуге, vN – параметры на пике фон Неймана, начальные параметры обозначены как 0 [12].

Несмотря на то, что ZND модель является одномерной, она дает хорошее совпадение с экспериментальными данными вдали от пределов распространения детонации.

В конце 50х годов был обнаружен и начал активно изучаться тот факт, что детонационный фронт не является плоским, а состоит из большого количества поперечных волн, отражающихся от стенок канала [13-15]. Данные поперечные волны оставляли следы на фольге, покрытой сажей, а так же были видны при использовании съемки с открытым затвором. Характерная ромбическая структура была названа ячейкой детонации и является характеристикой данной горючей смеси при определенных начальных условиях. Снимки детонационных ячеек и неустойчивости фронта детонации показаны на рисунках 4 и 5.

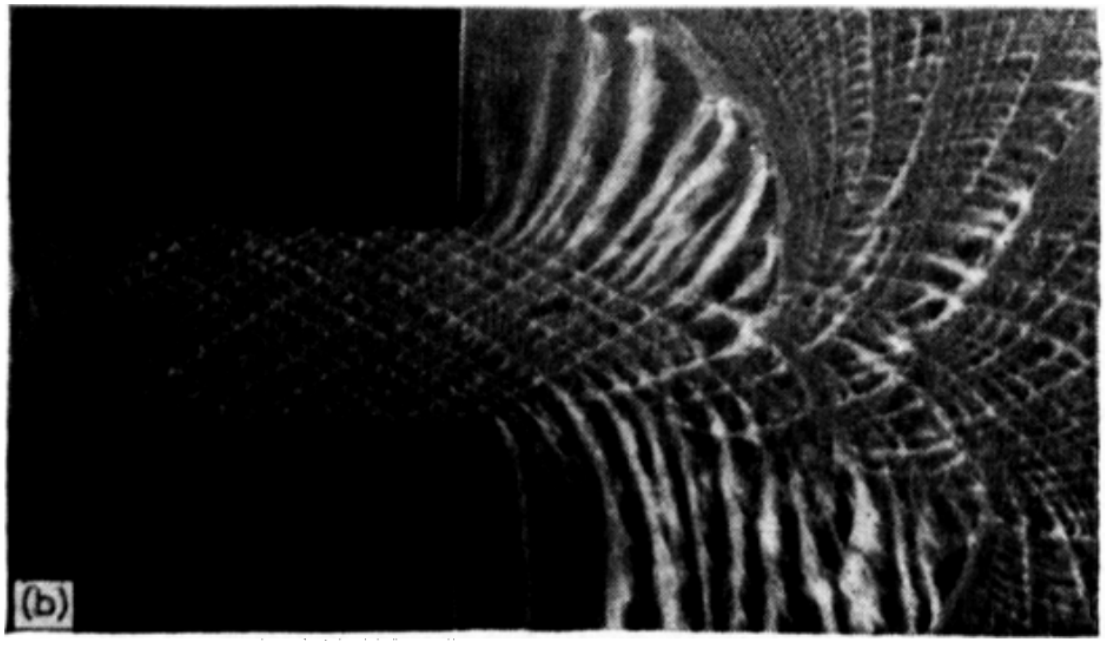


Рисунок 4 – Снимок с открытым затвором детонации, переходящей из узкого канала в широкий в смеси ацетилен-кислород [15].

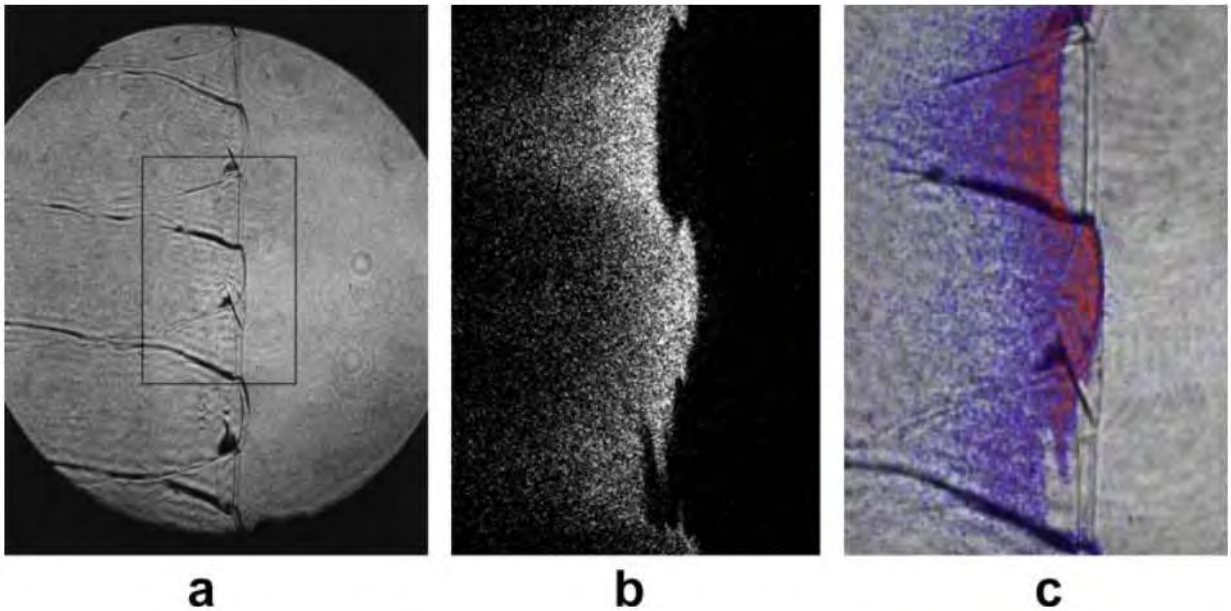


Рисунок 5 – Современная визуализация фронта детонационной волны, полученная с помощью теневой съемки (a), лазерно-индуцированной флюоресценции (b) и наложения двух снимков друг на друга (c) [11].

Распад и повторное инициирование газовой детонации в расширяющемся канале

Пересжатая детонационная волна – это волна детонации, которая имеет параметры значительно выше параметров детонации Чепмена-Жуге [16]. Такое превышение параметров за фронтом пересжатых детонационных волн позволяет производить детонационное напыление материалов с высокой температурой плавления [17], увеличить производительность и качество напыления. Режим многоступенчатого формирования детонации исследован в работе [18,19] в движущейся и неподвижной газовых смесях. Влияние конуса на переотражение ударной волны и формирование детонации было исследовано в работе [20].

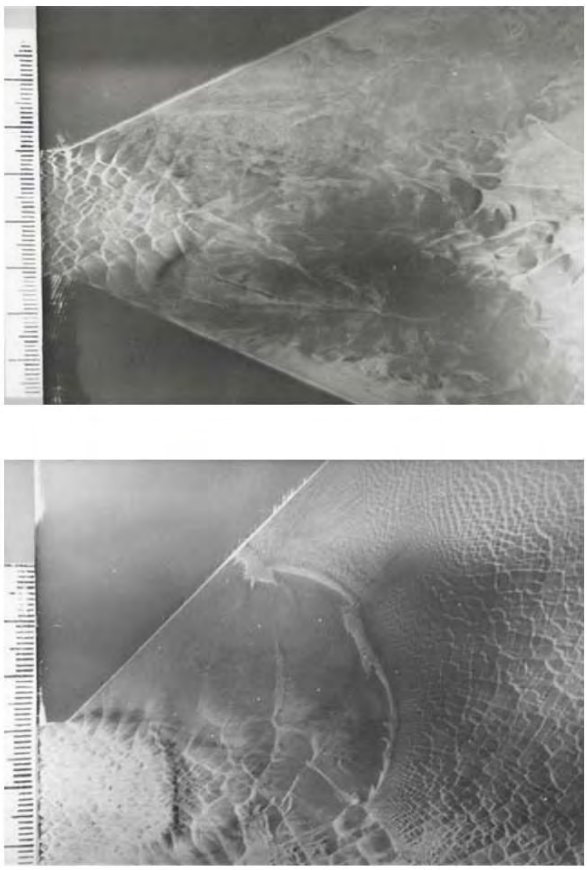


Рисунок 6 – Следы на саже при выходе детонации из круглого канала в конус: распад детонации (вверху) и восстановление детонации (внизу). Была использована стехиометрическая смесь ацетилена с воздухом [20].

На рисунке 6 изображены развертки пленки, покрытой сажей, на которых изображен переход детонации в расширяющемся конусе. В первом случае наблюдается исчезновение ячеистой структуры, что говорит о распаде детонации, во втором случае наблюдается переход детонации в широкий канал.

Результаты исследования дифракции приведены в работе [21,22]. Примеры использования детонации для напыления приведены в работе [23].

Однако добиться распада детонации в стехиометрической метано-кислородной смеси крайне сложно из-за малого размера детонационной ячейки (3 мм). Для получения нестационарного разрыва необходимо добиться того, чтобы размер детонационной ячейки соответствовал диаметру камеры сгорания. Таким образом, для каналов переменного сечения необходимо подбирать топливную смесь таким

образом, чтобы размер детонационной ячейки смеси был немного меньше диаметра канала. Оптимальное отношение диаметра канала к размеру ячейки составляет 2-5.

В работе [24] процесс распада детонационной волны и реинициирования детонации был изучен с помощью теневого метода и компьютерного моделирования. На рисунке 7 изображено два возможных сценария перехода детонации в широкий канал: повторное инициирование детонации и её распад. Сценарий распространения детонации определяется количеством детонационных ячеек, приходящихся на ширину канала.

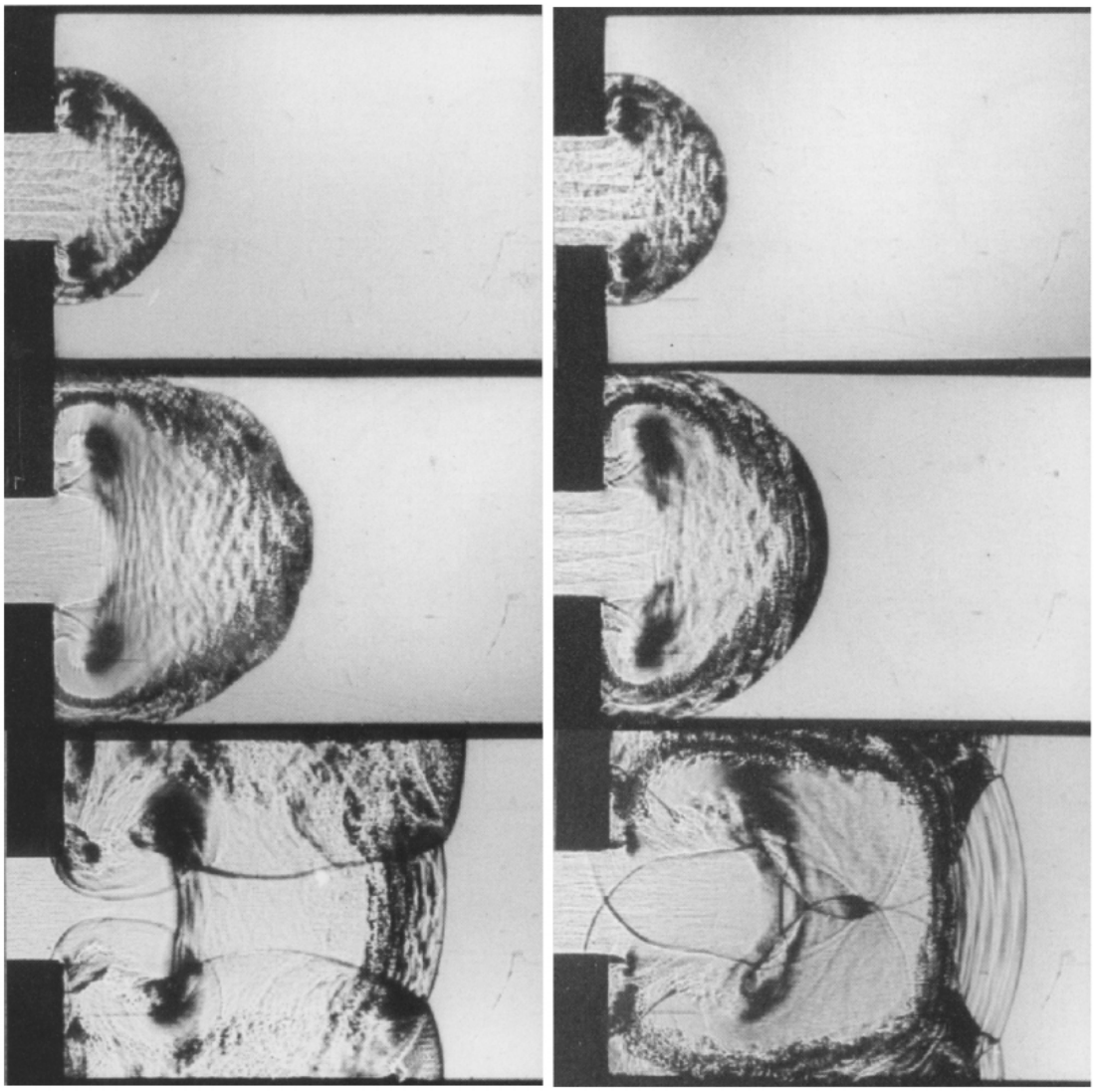


Рисунок 7 – Теневые изображения повторного возникновения (слева) и распада (справа) детонации после выхода из узкого канала в широкий. Смесь водорода с кислородом [24].

Повторное инициирование детонации при выходе из канала в свободное пространство наблюдалось в [25]. После распада детонационной волны на ударную волну и фронт горения наблюдались локальные центры воспламенения во время дифракции ударной волны. Детонация возникла снова при всех углах расширения. Интересным фактом является возникновение поперечной волны при углах стенки более 45 градусов. Работа [26] показывает, что переход детонационной волны через расширяющийся канал может проходить двумя способами: с распадом структуры детонационной волны и непрерывный переход без распада волны. Во втором случае падение скорости волны в конусе составляет не более 15%. В первом случае падение скорости значительно выше. Результаты [27] показывают, что возможность повторного инициирования зависит как от геометрии камеры, так и от отношения диаметра канала к размеру детонационной ячейки. Зависимость условий распространения детонации от угла расширения получена в работе [28].

Детонация может быть использована для создания реактивной тяги в пульсирующих детонационных двигателях [29-32]. Влияние сужения канала, турбулизации потока газа за счет преград и профилированного центрального тела на параметры перехода горения в детонацию представлены в работах [33,34].

Влияние пористых покрытий на динамику детонационной волны в канале

Обеспечение безопасности хранения и использования водорода на промышленных объектах является одной из важнейших задач в области водородной энергетики. При анализе взрыва необходимо учитывать все особенности сжигания водорода в замкнутых объемах. Наиболее важным методом предотвращения или ослабления детонации являются химически активные ингибиторы [35] или специальные элементы, которые могут ослабить интенсивность ударной волны или детонации, такие как инертные частицы [36,37] или препятствия в канале [38]. Поскольку волна детонации имеет ячеистую структуру, одним из способов предотвращения детонации может быть использование особых покрытий для уменьшения интенсивности поперечных возмущений. Эффект пористого покрытия

при детонации впервые рассматривался в [39] Из-за пористого материала, покрывающего стены, расстояние перехода горения в детонацию удваивалось. Заметно позже влияние стенок на уже сформировавшуюся детонационную волну было исследовано с помощью высокоскоростной камеры и было показано, что распад детонации был обусловлен подавлением поперечных волн в фронте волны детонации [40]. Этот факт был подтвержден в работе [41], где анализировались теневые изображения. На рисунке 8 показана схема взаимодействия ударной волны и поперечных волн с пористой стенкой канала. Видно, что благодаря меньшей скорости распространения волн в пористом материале, отраженные волны попадают в канал заметно позже, чем в случае жесткой стенки. На рисунке 9 показаны последовательные теневые снимки распада детонационной волны при наличии пористого покрытия на стенке. Видно искривление фронта детонационной волны.

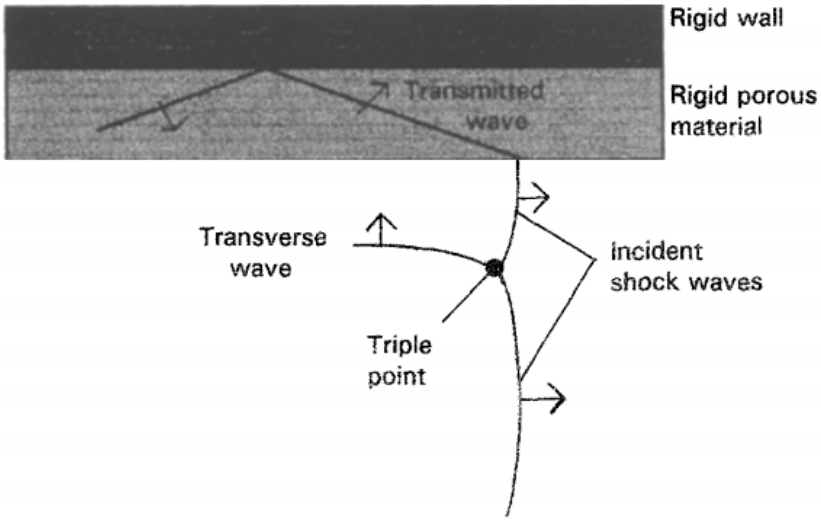


Рисунок 8 – Модель взаимодействия детонации с пористым покрытием [41].

Влияние пористых покрытий на распространение детонации особенно велико в околопредельных режимах детонации [42].

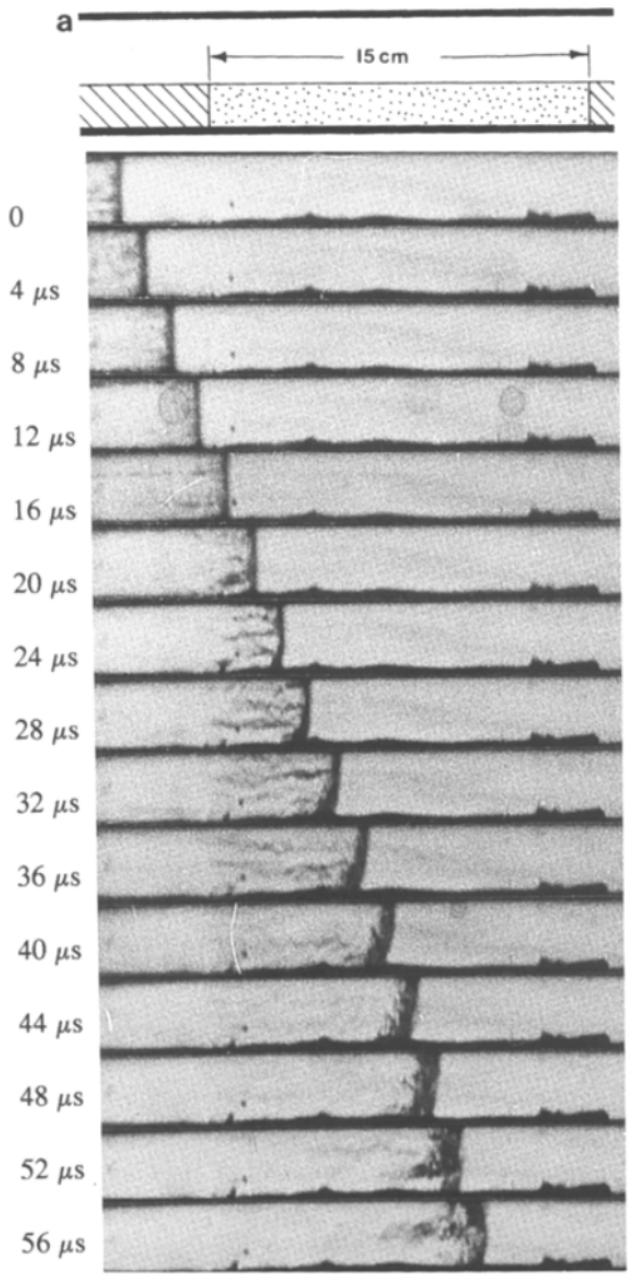


Рисунок 9 – Теневые снимки распада детонации в смеси водород кислород при распространении вдоль пористого покрытия [41].

Впоследствии различные устройства для подавления детонации были сопоставлены в работе [43], и было обнаружено, что стальная вата намного эффективнее подавляет детонационную волну, чем перфорированные пластины. На рисунке 10 показана эволюция скорости детонационной волны в секции с пористым покрытием при различном начальном давлении. Видно, что детонация распадается при уменьшении начального давления (и, соответственно, при увеличении ширины детонационной ячейки).

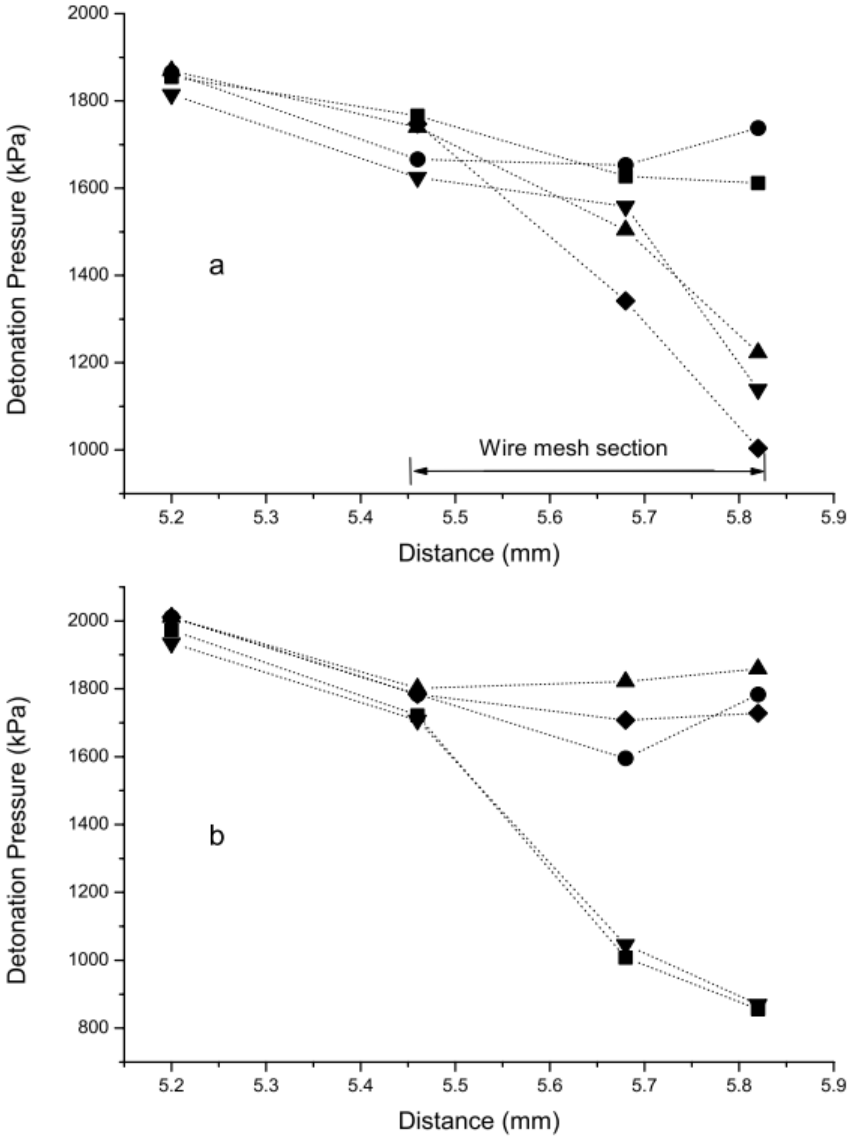


Рисунок 10 – Эволюция скорости детонационной волны при распространении вдоль пористой секции, смеси пропана (a) и этана (b) с кислородом. Начальные давления: ● – 13 кПа, ■ – 10 кПа, ▲ – 9 кПа, ▼ – 8 кПа, ♦ – 7 кПа для пропана и 27 кПа, 24 кПа, 22 кПа, 21 кПа и 17 кПа для этана, соответственно. [43].

Однако в работе [44] авторы предположили, что ослабление детонации из-за исчезновения поперечных волн происходит только для детонационной смеси с нерегулярной структурой. На рисунках 11 и 12 изображены снимки с открытым затвором распространения детонации в канале с пористыми стенками. В

зависимости от начального давления происходит либо увеличение размера детонационной ячейки вследствие ослабления отраженных волн, либо полный распад детонации с исчезновением ячеистой структуры. На рисунке 13 изображены стрик снимки распространения детонации в пористом канале. В случае начального давления 2.2 кПа видно торможение волны горения в пористой секции. Интенсивность горения падает настолько, что практически не видна на стрик снимках. Ослабление детонации в смесях с регулярной ячеистой структурой происходит по другим причинам, главным образом из-за ухода массы в пористый материал. Этот вопрос был изучен более подробно в работе [45], где авторы исследовали детонационный переход из трубки в открытое пространство. Повторное инициирование детонации возможно после прохождения пористого канала [46].

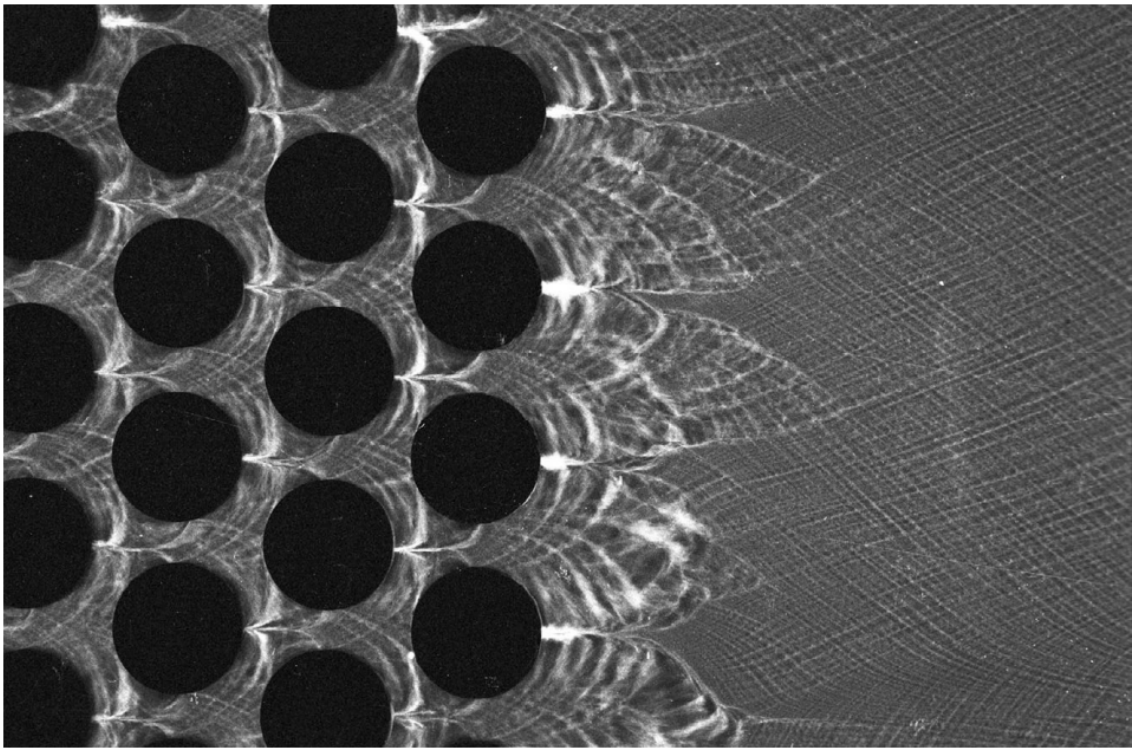


Рисунок 11 – Фотография с открытым затвором восстановления детонации в смеси ацетилен-кислород после пористой секции [46].

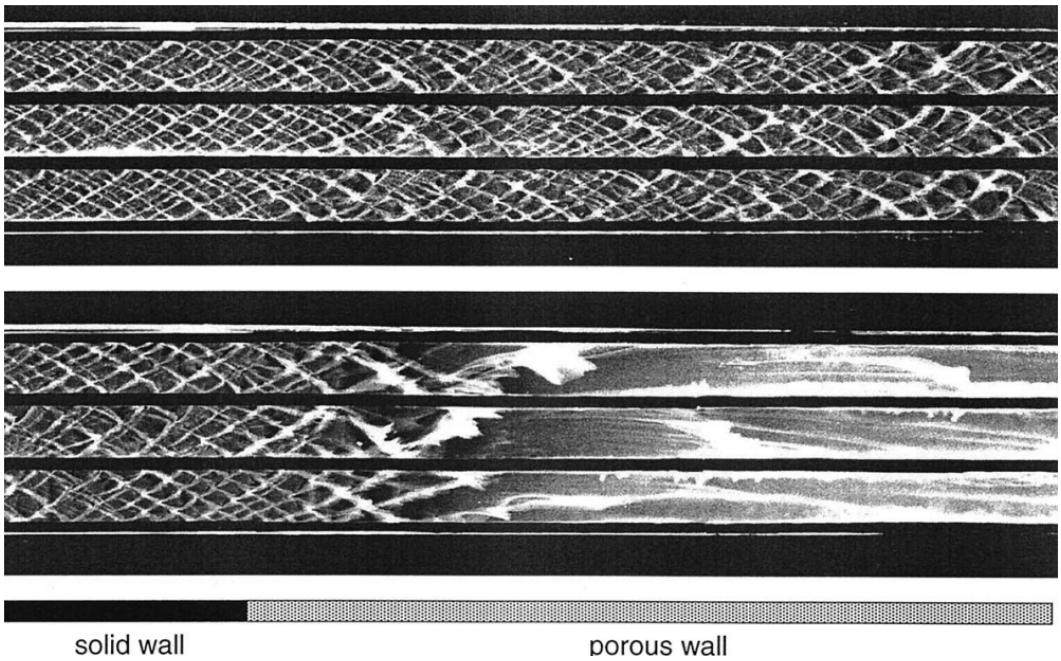


Рисунок 12 – Снимки с открытым затвором распространения детонации в канале с пористыми стенками, смесь ацетилен-кислород: начальное давление 3.6 кПа (сверху) и 2.6 кПа (снизу) [44].

В опубликованных сравнениях различных материалов, используемых для подавления детонации, обычно использовались разбавленные инертными газами смеси водорода или углеводородов с кислородом при низком давлении. Это не соответствует условиям возможного применения таких структур для предотвращения или, по крайней мере, ослабления детонации в водороде.

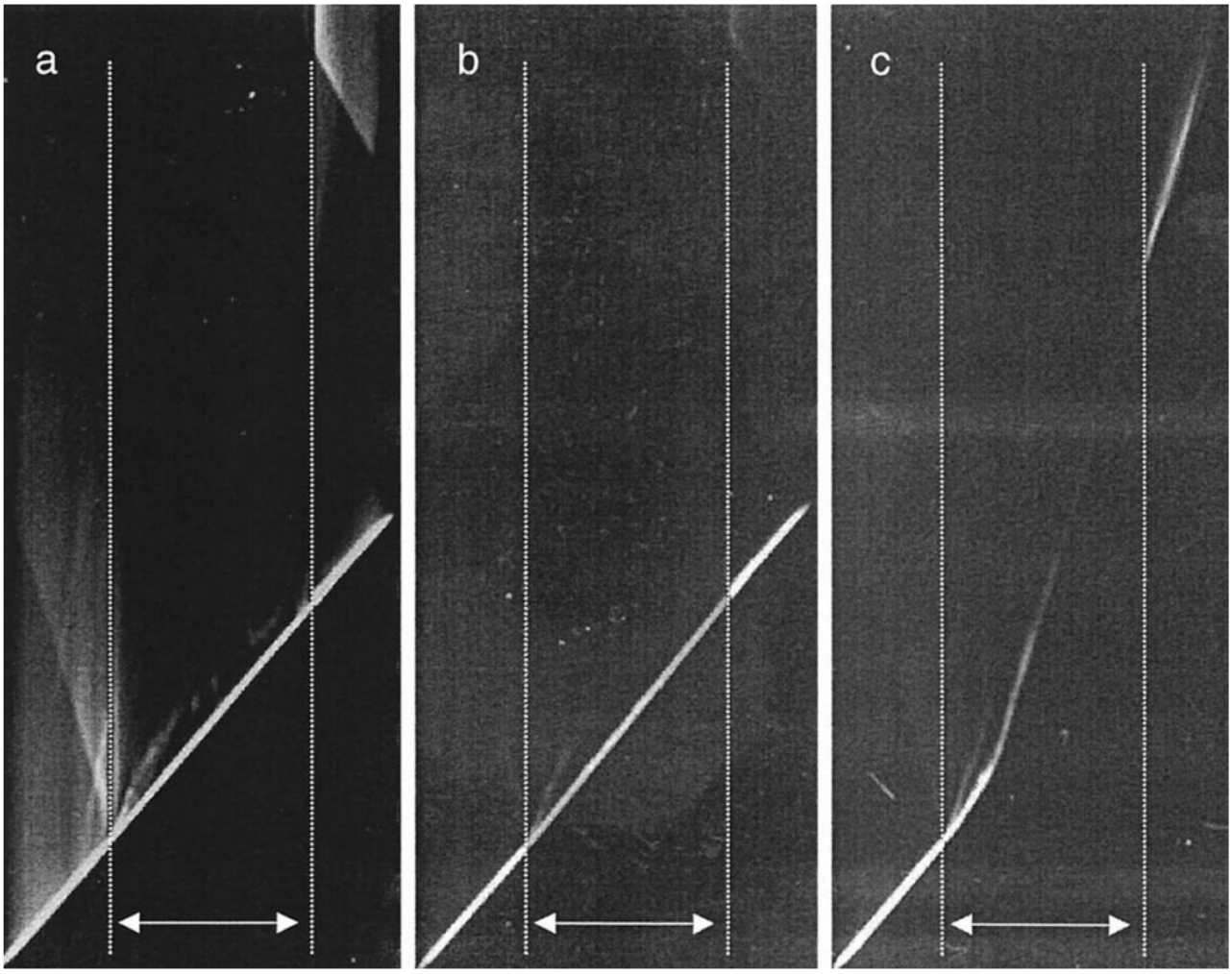
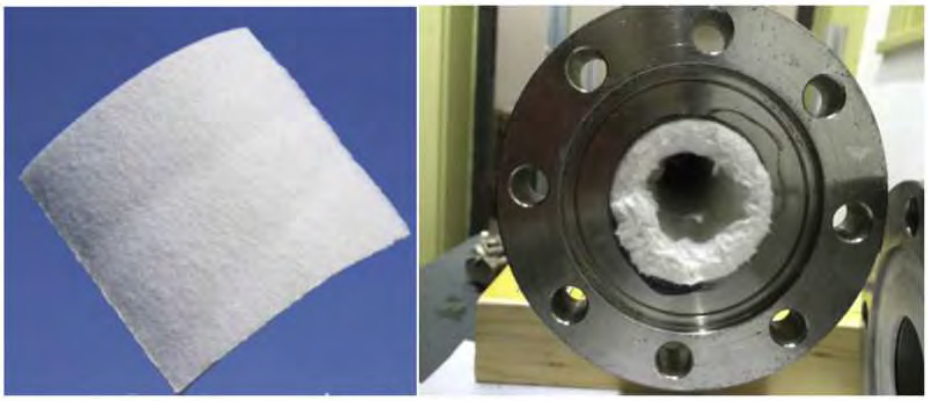


Рисунок 13 – Стрик-снимки свечения детонации ацетилена с кислородом в канале диаметром 41 мм с пористой секцией (пористая секция показана пунктиром): a – P_0 = 4 кПа, b – P_0 = 2.5 кПа, c – P_0 =2.2 кПа [44].

В работах по изучению торможения пламени использовались различные методы, такие как пористые среды [47,48], препятствия [38] или их комбинация [49]. Распространение быстрого пламени через пористую среду изучалось в [50]. Стальная вата использовалась в качестве материала, поглощающего взрыв, поскольку имеет большую площадь поверхности на единицу объема и высокую теплопроводность [51]. На рисунках 14 и 15 приведены фотографии нескольких материалов, используемых для подавления детонации, и их влияние на давление детонационной волны.

(a) silicone rubber



(a) aerogel blanket

Рисунок 14 – Примеры материалов, используемых в исследованиях подавления детонации: резина (сверху) и аэрогель (снизу) [47].

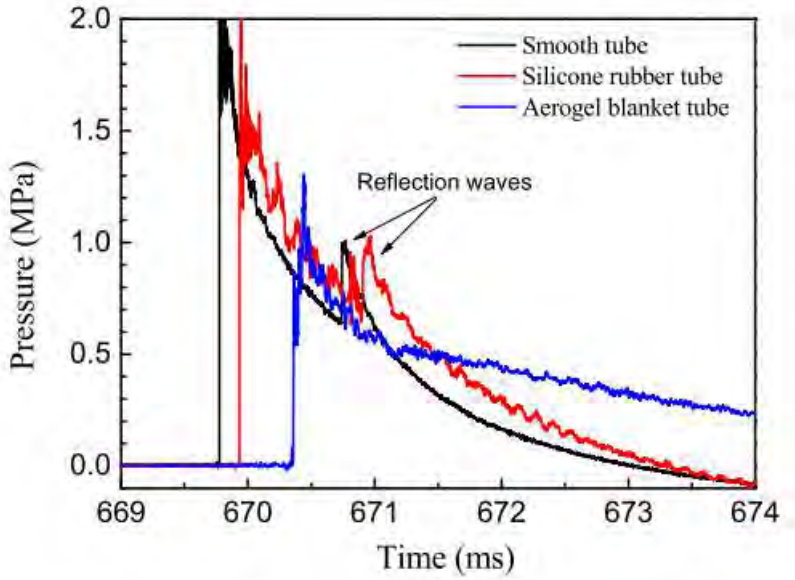


Рисунок 15 – Сравнение давления детонационной волны в жестком канале и при использовании резины и аэрогеля на стенке [47].

В работе [43] показано, что стальная вата более эффективна для ослабления детонации, чем перфорированные пластины, хотя разные типы пористых материалов не сравнивались. Наличие пористого материала также может изменить механизм распространения пламени [52,53]. В канале, заполненном сферическими шариками, пламя ускорялось до скорости звука в продуктах сгорания [54]. На рисунке 16 показаны теневые снимки распространения горения в канале, частично заполненном стальными шариками.

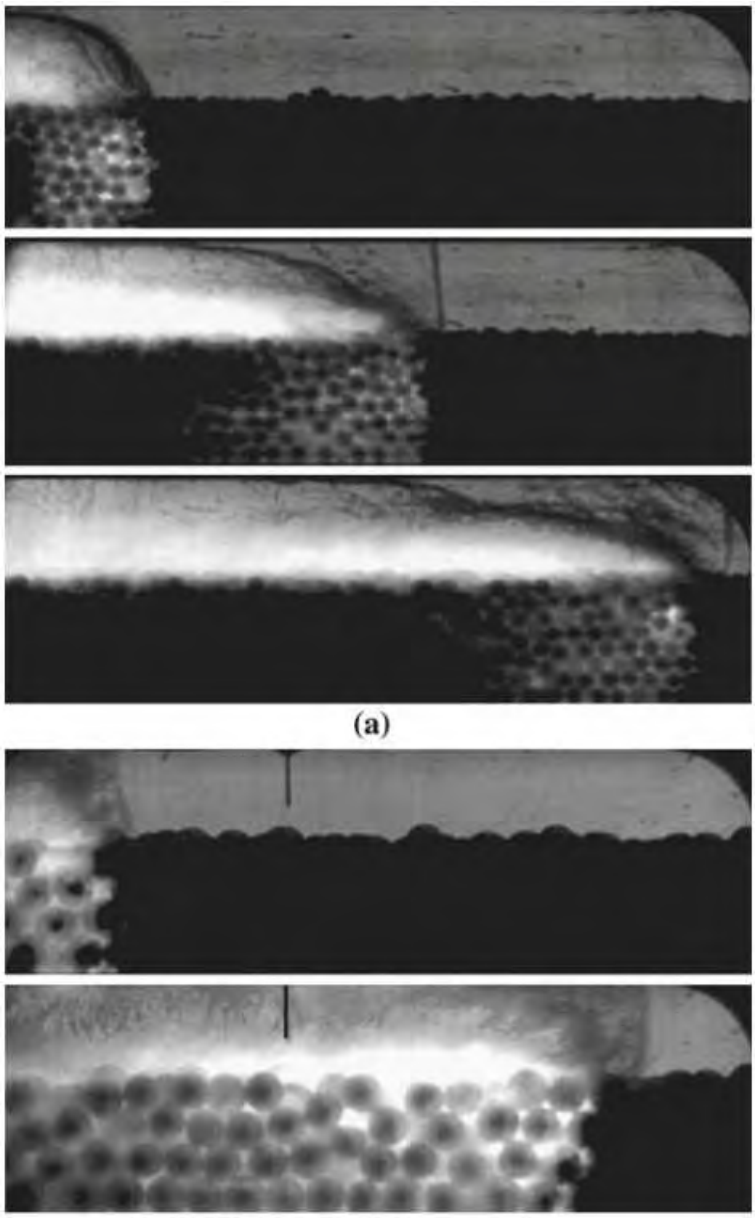


Рисунок 16 – Распространение фронта горения по пористой среде, состоящей из жестких шариков [54].

Было показано, что механизм распространения определяется поперечным волновым взаимодействием с фронтом пламени [55]. Известно, что шероховатость канала (представленная спиралью Щелкина) влияет на пределы распространения детонации в канале [56,57].

Большое значение имеет также влияние динамики пористого материала при взаимодействии с ударными волнами. Несколько работ были посвящены изучению нормального падения ударной волны на пористые материалы [58-60]. Однако динамика пористого материала при слабых касательных ударных волнах не изучалась.

Анализ горения внутри пористого материала может выявить механизм ослабления детонации в пористых материалах, который еще не полностью понят. Основными причинами подавления детонации, по-видимому, являются исчезновение поперечных волн, потери тепла в пористые среды, растяжение и повышенная кривизна фронта пламени [61].

Нестационарные режимы детонации в субкритических каналах

Как правило, распространение детонации в субкритических узких каналах сопровождается спиновым или галопирующим режимами распространения. Эти явления обусловлены интенсивным переносом тепла от зоны реакции к стенкам, а также взаимодействием ударного фронта и зоны реакции с пограничным слоем.

Детальный анализ распространения в спиновом режиме можно найти в [62]. Средняя скорость распространения волны спиновой детонации сравнима со скоростью D детонации Чепмена-Жуге, а мгновенные значения могут меняться в диапазоне 0.6-1.1 D [63]. Особый интерес представляют переход к спиновым режимам детонации в прямоугольных каналах [64-66]. На рисунке 17 изображены распределения давления детонации в каналах различного размера, полученные с помощью моделирования. Зависимость дефицита скорости детонации в узких каналах приведена на рисунке 18.

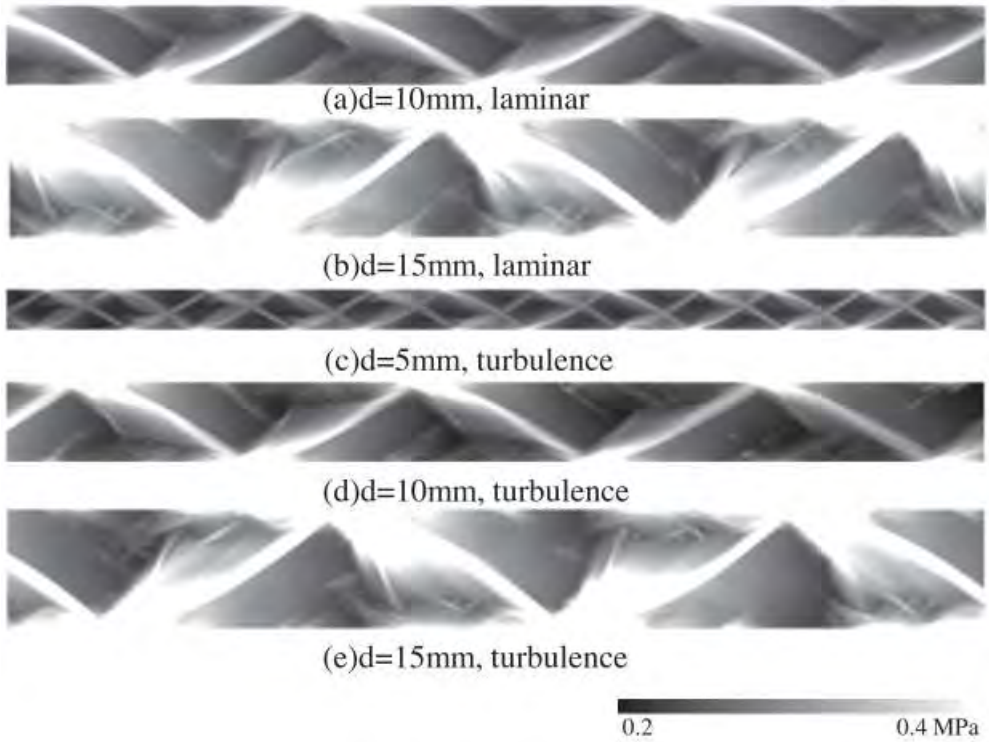


Рисунок 17 – Распределение давления детонации в канале различной ширины [68].

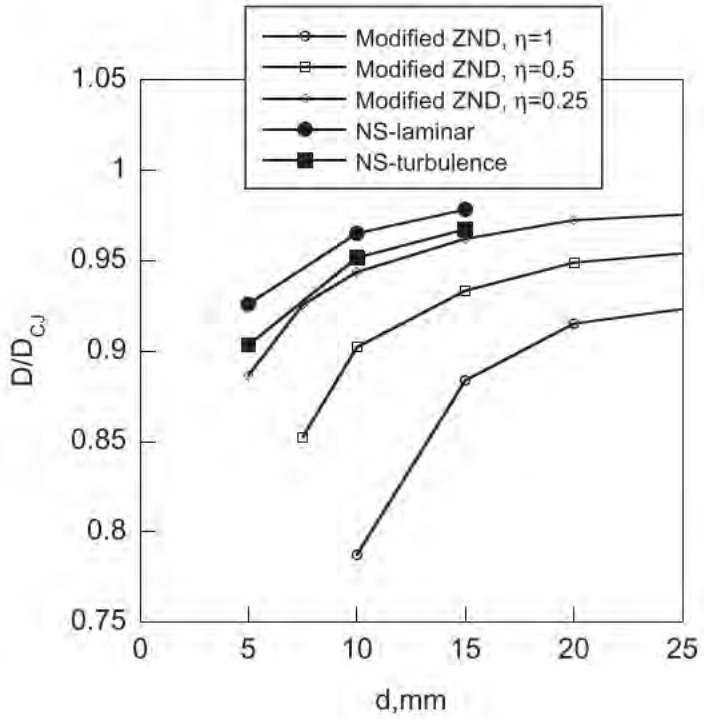


Рисунок 18 – Расчетная зависимость дефицита скорости детонации в различных моделях в зависимости от ширины канала [68].

В отличие от спиновой детонации средняя скорость галопирующей детонации, как правило, составляет около 0.7-0.85 D [67,68]. Параметры галопирующей

детонации, такие как период и шаг вдоль оси, можно найти в [69]. Нестационарные режимы распространения горения, включая галопирующую детонацию, подробно описаны в [70] для смесей этилен-кислород. Было показано, что при определенных условиях скорость пламени может принимать колебательный режим. Стрик снимки с различными режимами распространения пламени в смеси этилен-воздух представлены на рисунке 19. В работе [71] показано, что повторное инициирование детонации возможно в узком канале после распада волны детонации. В этих исследованиях начальный распад детонационной волны проводился в результате детонационного перехода в узкий плоский канал.

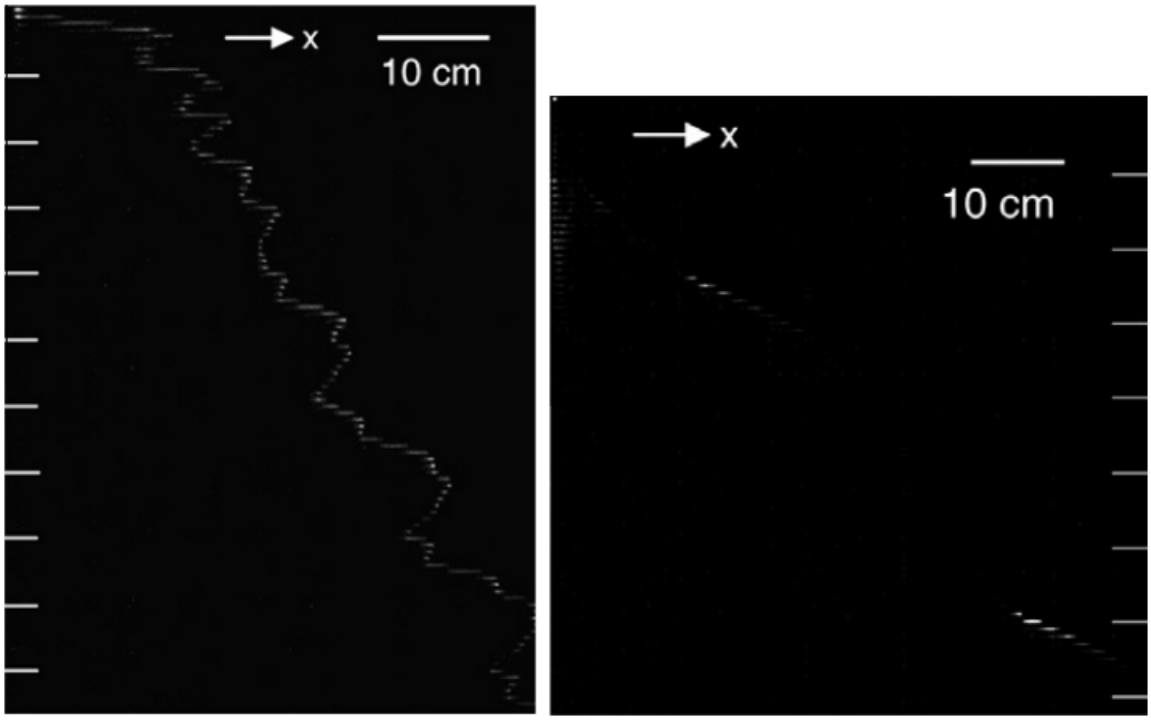


Рисунок 19 – Стрик снимки осциллирующего пламени (слева) и галопирующей детонации (справа). Смесь этилен-кислород, ER= 0.35, ширина канала 2 и 0.5 мм, время между штрихами 5 мс и 85 мкс, соответственно [70].

При работе с ацетиленом в качестве окислителя чаще всего используется кислород [63,69,72,73]. Смеси ацетилена с кислородом имеют наименьшую ширину детонационной ячейки, величина которой в зависимости от соотношения компонентов не превышает 1 мм. Однако из-за сложностей диагностики в каналах субмиллиметрового размера, больший практический интерес может представлять

смесь ацетилена с воздухом. На рисунке 20 приведены различные режимы распространения детонации в такой смеси. Для таких смесей ширина детонационной ячейки будет больше 4-5 мм [74]. Таким образом, в каналах с поперечными размерами около 3 мм можно наблюдать нестационарные режимы распространения детонации.

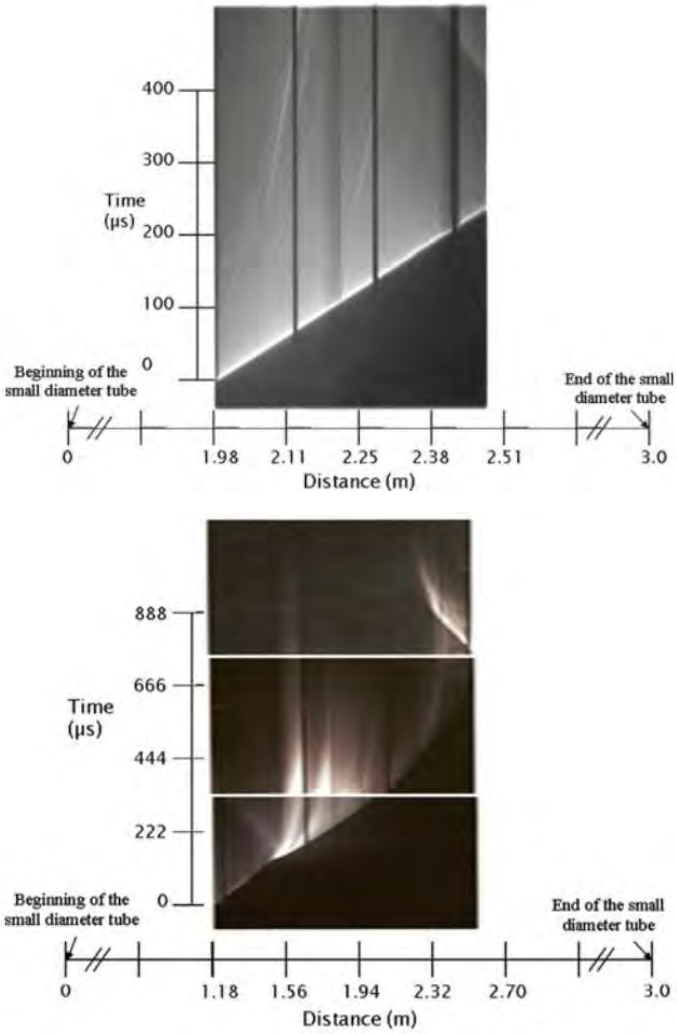


Рисунок 20 – Пространственно-временные развертки распространения стабильной (сверху) и галопирующей (снизу) детонации в смеси ацетилен-воздух [57].

Таким образом, на основании обзора можно сделать вывод, что не существует критериев распространения детонации и детонационноподобных режимов распространения пламени в смесях ацетилен-воздух.

Глава 1. Формирование пересжатой волны детонации в канале переменного сечения

В данной главе экспериментально исследовано формирование пересжатой волны детонации в метано-кислородных смесях в цилиндрическом канале переменного сечения. 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. Определялись скорости и давления на фронте детонационной волны в зависимости от состава смеси. Определялись размеры детонационных ячеек, диаграммы распространения волн сжатия, фронта пламени и детонационной волны в камере сгорания в зависимости от состава смеси.

Целью данной главы было определение параметров пересжатой волны детонации в канале переменного сечения как в покоящейся предварительно перемешанной смеси метана с кислородом, так и при раздельной подаче метана и кислорода в потоке.

1.1 Экспериментальная установка

Детонационная камера сгорания переменного сечения состояла из нескольких секций: секции формирования детонационной волны (ФС), U-образной секции (УС), секции реинициирования детонации (РС) и выходной секции (ВС), которая была открыта в атмосферу. Схема установки представлена на рисунке 21. В секции формирования детонационной волны (формирующая секция ФС) осуществлялась раздельная подача компонентов газовой смеси, и происходило воспламенение горючей смеси. После этого фронт пламени ускорялся до формирования детонации. Датчики давления, расположенные на выходе из ФС, регистрировали профиль детонационной волны и ее скорость. Расстояние между датчиками давления составляло 100 мм. Длина ФС составляла 1200 мм, диаметр 16 мм.

Таблица 1 – Используемые газовые смеси на основе метана и их параметры. *ER* – коэффициент мольного избытка горючего; γ – показатель адиабаты, a_0 – скорость звука, λ – измеренная ширина детонационной ячейки

ER	γ	a_0, м/с	λ, мм
1	1.37	343	3
0.85	1.38	338	8
0.75	1.39	336	—
1.5	1.37	352	6
2.35	1.36	365	—

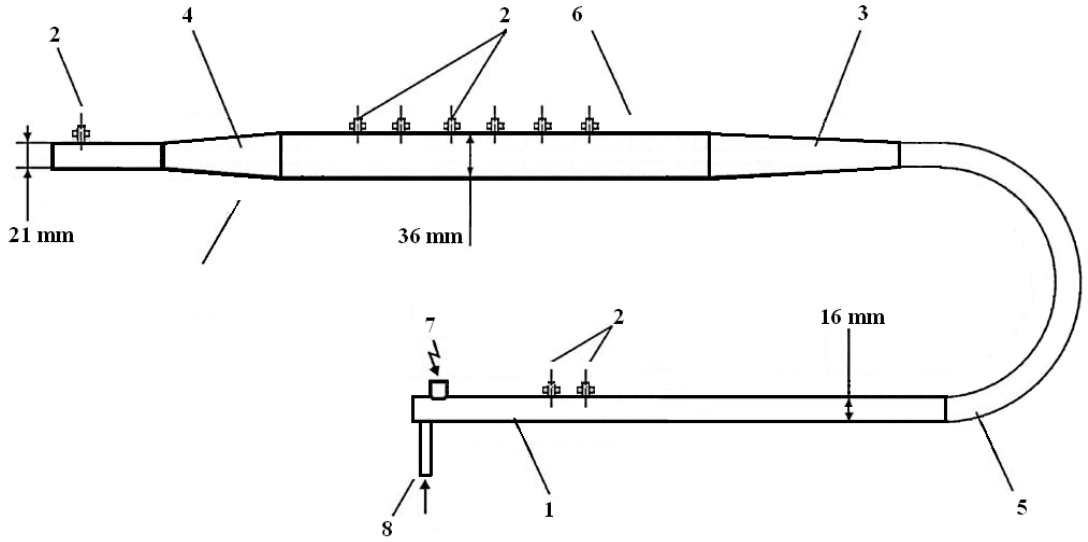


Рисунок 21 – Схема детонационной камеры сгорания. 1 – формирующая секция, 2 – датчики давления и светимости, 3 – конус расширения, 4 – конус сужения, 5 – U-образная секция, 6 – измерительная секция, 7 – свеча зажигания, 8 – магистрали с топливом и окислителем.

После формирования детонационная волна переходила в U-образную секцию (УС). Эта секция предназначалась для создания стационарной волны детонации с

параметрами детонации Чепмена-Жуге. Длина УС составляла 400 мм, диаметр 16 мм. Радиус кривизны секции составлял 125 мм.

После U-образной секции детонационная волна переходила в расширяющийся конус с углом расширения 10°. Начальный диаметр канала составлял 16 мм, конечный – 36 мм (отношение диаметров 2.25). В тех случаях, когда проводилась серия экспериментов по распространению детонационной волны в канале с внезапным расширением, расширяющийся конус не устанавливался. Нестационарный двойной распад осуществлялся в измерительной секции (ИС) большего диаметра. Датчики давления PCB113A, расположенные вдоль оси ИС, и фотодиоды ФД-256, соединенные с ИС оптическим проводом, регистрировали движение детонации либо комплекса волны сжатия и фронта пламени. Расстояние между датчиками давления составляло 60 мм. Расстояние от начала измерительной секции до первого датчика также равно 60 мм. Оптопровод находился в одном сечении с датчиками давления. Длина ИС составляла 400 мм, диаметр 36 мм.

Конструкция детонационной трубы позволяла проводить эксперименты без расширяющегося конуса между U-секцией и измерительной секцией. При этом происходило внезапное расширение канала с углом расширения 90°. Такой угол мог приводить к более быстрому распаду детонационной волны при переходе волны из U-секции в измерительную секцию.

На выходе из ИС располагалась выходная секция с коническим сужением (выходная секция ВС). В проводимых экспериментах угол схождения равнялся 8°. Длина ВС составляла 300 мм, выходной диаметр 21 мм. ВС имела открытый конец. Так что начальное давление внутри камеры сгорания перед каждым экспериментом равнялось атмосферному давлению. Начальная температура равнялась температуре окружающего воздуха 300 К.

Для определения размера детонационной ячейки использовалась медная фольга, покрытая сажей. Размер ячейки измерялся только в покоящейся горючей смеси, в потоке размер детонационных ячеек не измерялся.

Эксперименты проводились в двух горючих смесях: предварительно смешанной неподвижной, и движущейся без предварительного смешивания. Параметры

горючих смесей приведены в таблице 1. Для проведения одного эксперимента в неподвижной смеси камера сгорания была заполнена предварительно перемешанной смесью метана и кислорода с помощью одной из магистралей. Вторая магистраль была закрыта. Смесь приготовлялась в цилиндре емкостью 40 литров. Смесь выдерживали в цилиндре, по крайней мере, 24 часа. Инициирование проводилось через 1-2 секунды после заполнения детонационной камеры.

Для проведения экспериментов в движущейся смеси, необходимо отдельно подавать компоненты смеси в камеру сгорания. Подача компонентов смеси осуществлялась через поплавковые расходомеры РМ-4-ГУЗ. Через 5-20 сек. после начала подачи компонентов и после того, как скорости потоков метана и кислорода выходили на постоянные величины, производилось инициирование детонации. В начальном участке проводили воспламенение горючей смеси. После прохождения детонационной волны и волны разрежения компоненты смеси снова заполняли камеру и процесс повторялся. Система диагностики и инициирования позволили проводить эксперименты с частотой 0.5 Гц.

Воспламенение горючей смеси производилось при помощи искрового разряда в начале ФС с помощью автомобильной катушки зажигания. Энергия искрового разряда не превышала 0.1 Дж. Коэффициент мольного избытка горючего (equivalence ratio, ER) изменялся от 0.6 до 2.5.

1.2 Результаты экспериментов и обсуждение

Рисунок 22 показывает диаграммы и профили давления от трех датчиков давления в измерительной секции (0 мм, 180 мм, 300 мм от первого датчика, который был на расстоянии 60 мм от начала измерительного участка) и один датчик давления, установленный непосредственно после сужающейся секции в 300 мм от последнего датчика измерительной секции, перед открытым концом детонационной трубы. Эксперименты проводились в камере с резким расширением с использованием режима с потоком без предварительного смешивания. Приведены три случая для бедной (a), стехиометрический (b) и богатых смесей (c). Скорость потока непрореагировавшей смеси в измерительной секции была равна 5 м/с.

Во всех трех случаях (ER = 0.85, 1 и 1.5) детонационная волна формируется на начальном участке. Тем не менее, после прохождения внезапного расширения, был зафиксирован распад детонационной волны. Датчик давления фиксировал ударную волну с амплитудой 1 МПа. Во время перемещения по измерительной секции амплитуда ударной волны быстро увеличивалась до 3 МПа для стехиометрической смеси и медленно увеличивалась до 2 МПа и 1.5 МПа для ER = 1.5 и 0.85 соответственно. Скорость ударной волны в измерительной секции была 1500 м/с для ER=1.5 и 0.85, 2000 м/с для стехиометрической смеси. Фотодиоды, расположенные в одном сечении с датчиками давления, записывали отставание в 30-50 мкс между пламенем и ударной волной. Амплитуда ударной волны давления меньше, чем соответствующее значение детонационной волны Чепмена-Жуге. Это приводит к выводу об отсутствии детонации после перехода из узкой части камеры в широкую.

После прохождения через сходящийся конус, датчик давления фиксирует пересжатую детонационной волны с амплитудой 7 МПа и скоростью 2500 м/с как для ER = 0.85, так и для ER = 1.5. Давление Чепмена-Жуге для этих смесей 2.5 МПа и 2.7 МПа соответственно. Для стехиометрической смеси пересжатой детонации зафиксировано не было.

При использовании расширяющегося конуса в однократном режиме с перемешанной смесью при аналогичных значениях ER (0.85, 1 и 1.5) распада детонационной волны не наблюдалось. После прохождения расширения детонационная волна имела параметры, близкие к параметрам Чепмена-Жуге. В случае ER= 0.85 средняя скорость волны в измерительной секции составляла 2000 м/с, давление в ней 2.5 МПа, для стехиометрической смеси скорость составляла 2400 м/с, давление так же 2.5 МПа. Для богатой смеси с ER =1.5 скорость составляла 2500 м/с, а давление волны 2.7 МПа. Профили давления для этих случаев показаны на рисунке 23. Таким образом, комплекс ударная волна-фронт пламени представлял собой устойчивую детонационную волну вдоль всей измерительной секции. Распада детонационной волны не происходило. В случае с ER=0.75 распад уже наблюдается, амплитуда ударной волны составляет 1 МПа, скорость её 1000 м/с (рисунок 24.)

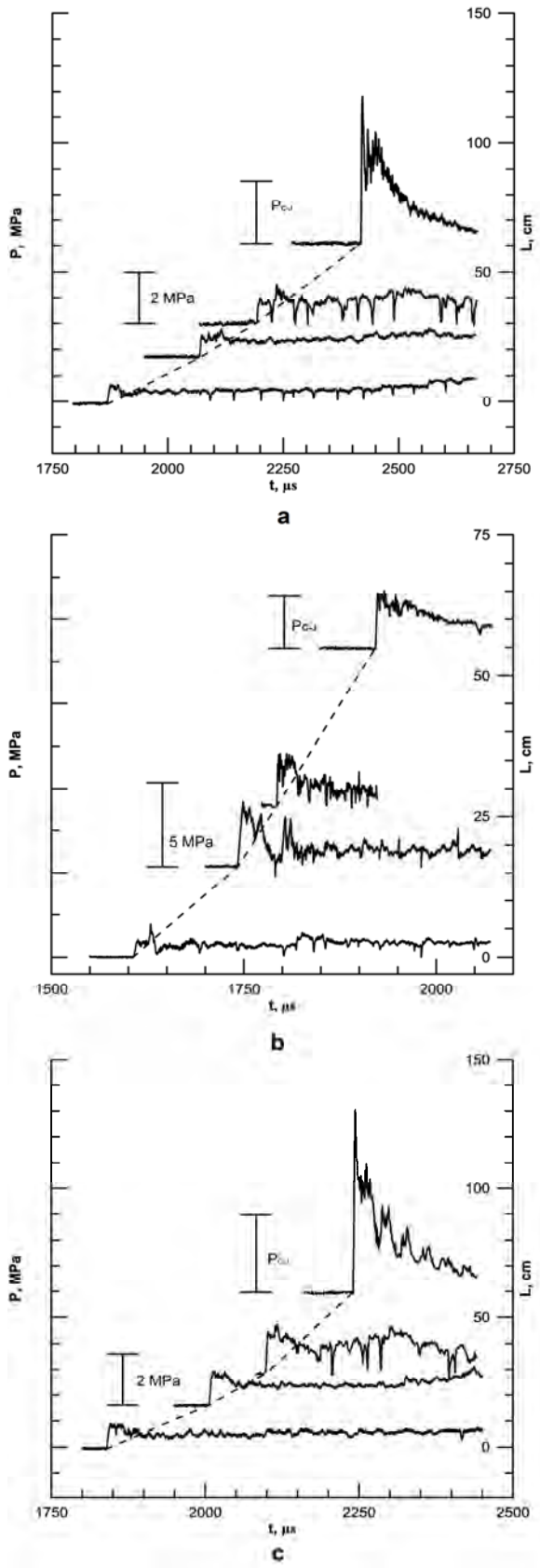


Рисунок 22 – Осциллограммы давления в ИС камеры сгорания. Режим с потоком без использования расширяющегося конуса. ER = 0.85, 1, 1.5 (a,b,c)

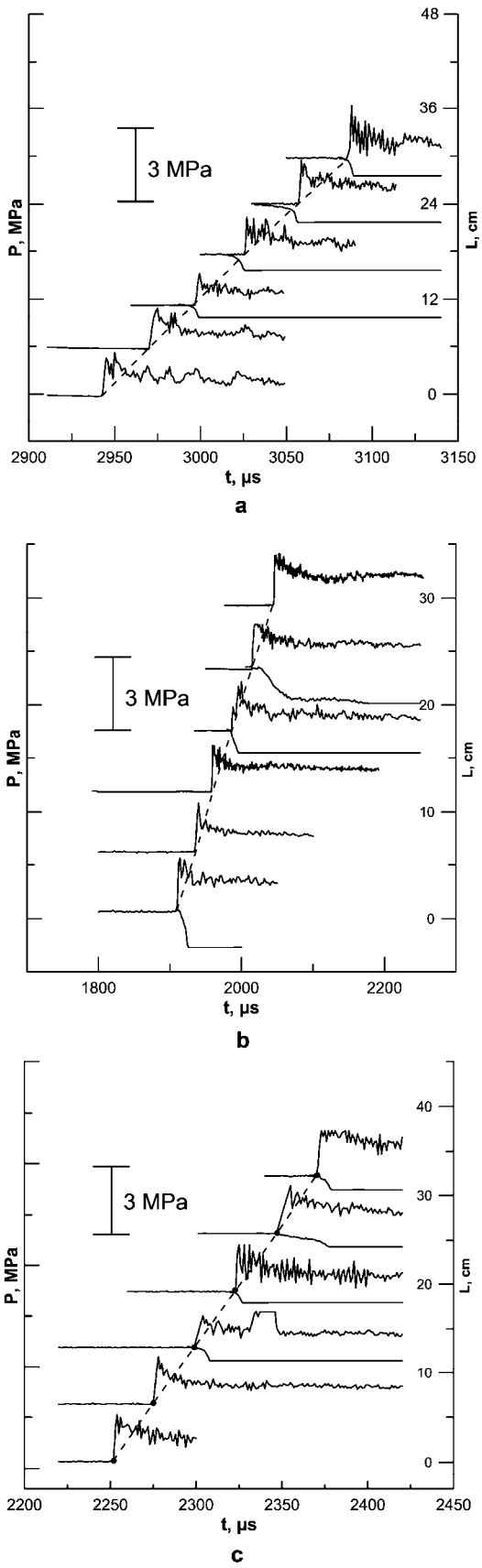


Рисунок 23 – Осциллограммы давления (направлены вверх) и свечения (направлены вниз) в ИС камеры сгорания. Однократный режим с использованием расширяющегося конуса. ER = 0.85, 1, 1.5 (a,b,c)

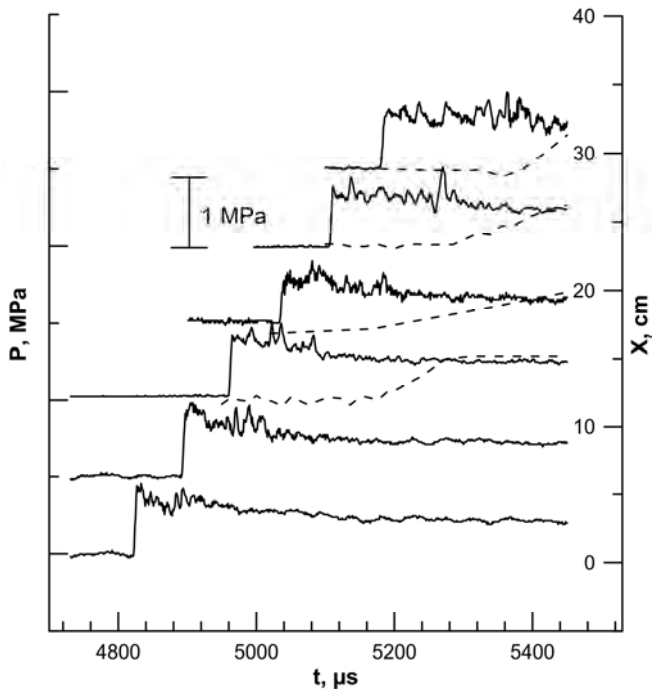


Рисунок 24 – Осциллограммы давления и свечения в ИС камеры сгорания. ER = 0.7, камера с конусом в однократном режиме.

Была изучена ячеистая структура детонационной волны с помощью закопченной фольги. Измерения показали, что ширина детонационной ячейки составила 4 мм для ER=1, 8 мм для ER=0.85 и 6 мм для ER=1.5 (рис. 25).

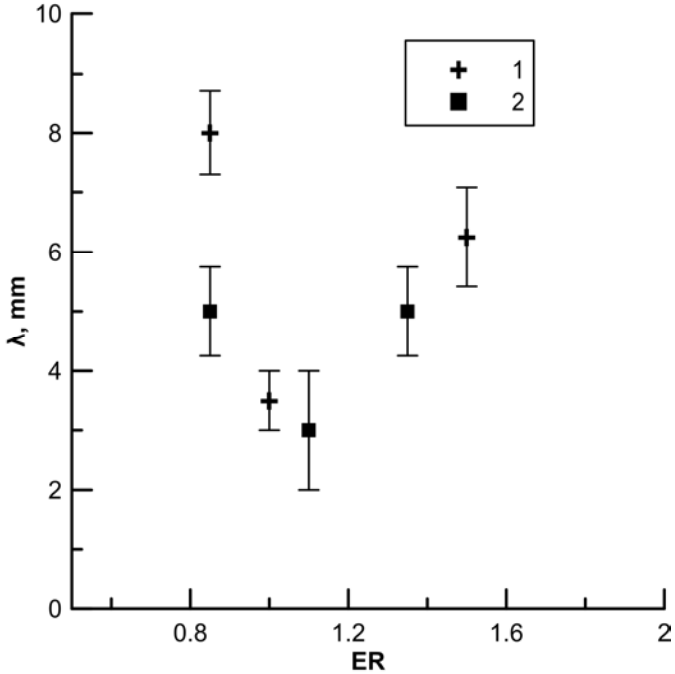


Рисунок 25 – Зависимость ширины детонационной ячейки от ER. 1 – экспериментальные данные, полученные в данной работе, 2 – данные [76].

На основе рисунков 23 и 25 можно сделать вывод о том, что при D/λ = 12 давление за волной остается равным давлению Чепмена-Жуге (где D – диаметр канала, λ – ширина детонационной ячейки), при D/λ=4.5-6.0 происходит распад детонационной волны в расширяющейся секции и наблюдается последующее увеличение давления на фронте детонационной волны в 2 раза по сравнению с давлением Чепмена-Жуге.

На основе полученных экспериментальных данных можно проанализировать влияние соотношения компонентов смеси и наличия потока на характеристики детонационной волны и на процесс распада детонации.

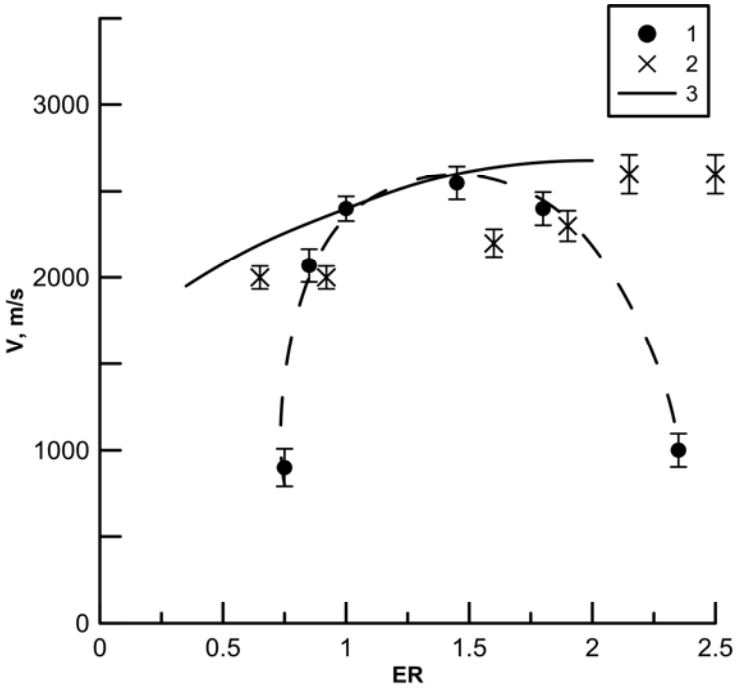


Рисунок 26 – Зависимость скорости детонационной/ударной волны от ER. 1 – скорость волны при использовании заранее приготовленной смеси. 2 – скорость волны при раздельной подаче компонентов смеси в камеру сгорания. 3 – расчетная скорость Чепмена-Жуге [75].

Средняя скорость детонации/ударной волны вдоль измерительной секции в зависимости от ER показана на рисунке 26. Приведены данные для измерительной секции с расходящимся конусом (*3* на рисунке 21). Детонация при раздельной подаче горючего и окислителя в режиме с потоком оказалась более стабильной и существовала в диапазоне ER от 0.6 до 2.5. Детонация в покоящейся предварительно

перемешанной смеси существовала только для ER от 0.85 до 1.75. Сплошная линия показывает расчетную скорость детонации Чепмена-Жуге [75]. Скорость детонации в покоящейся предварительно перемешанной смеси соответствует расчетной скорости (*3* на рисунке 26) для ER = 1 и ER = 1.5.

В неподвижной смеси увеличение размера детонационной ячейки при отклонении ER от единицы приводило к снижению скорости волны детонации или ударной волны, если происходил распад детонационной волны. Таким образом, отклонение ER от 1 приводило к тому, что происходит распад детонационной волны, после чего скорость волны снижается.

Однако при наличии потока смеси скоростью 5 м/с распада детонационной волны не происходит. В потоке смеси детонация регистрируется вплоть до предельных ER 0.6-2.5. Максимум скорости наблюдается в богатых топливом смесях для ER более 2.

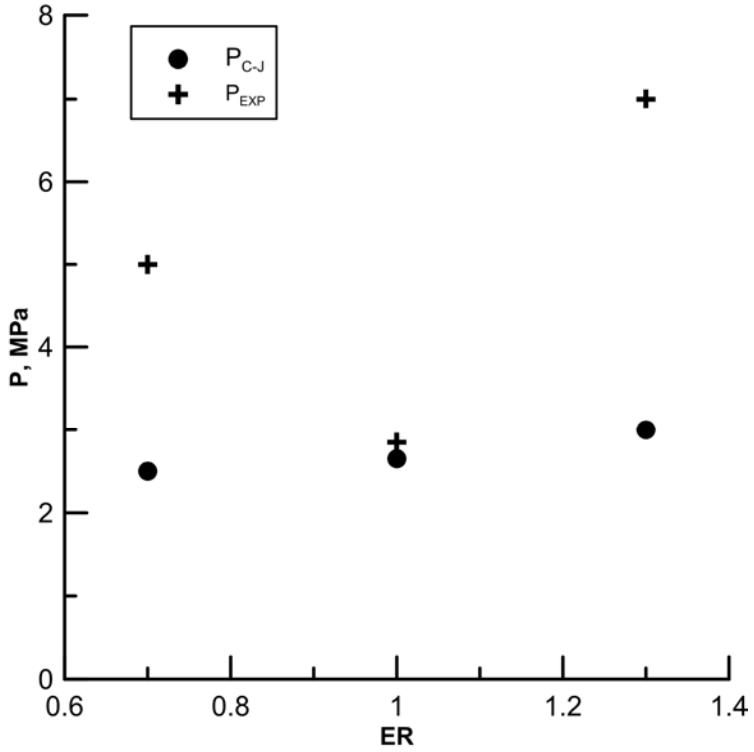


Рисунок 27 – Зависимость давления на фронте пересжатой детонационной волны и степени повышения давления относительно давления Чепмена-Жуге.

После прохождения ударной волной конического сужения при некоторых начальных условиях происходит повышение давления на фронте пересжатой волны

детонации. На рисунке 27 представлена зависимость величины давления на фронте пересжатой волны детонации от ER и степень повышения давления относительно параметров детонации Чепмена-Жуге.

Максимальная степень повышения давления достигается при коэффициенте ER равном 1.5. Таким образом, на данной конфигурации установки для получения высоких давлений на выходе из камеры сгорания оптимально использовать смеси с избытком горючего.

1.3 Выводы

В данной главе экспериментально изучено распространение детонации в каналах переменного сечения как в покоящейся предварительно перемешанной смеси метана с кислородом, так и при раздельной подаче метана и кислорода в потоке.

Показано, что детонация при раздельной подаче метана и кислорода в режимес потоком имела более широкие пределы существования по сравнению с детонацией в покоящейся предварительно перемешанной смеси. В случае частотного режима 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. При этом давление в пересжатой детонационной волны оказалось вдвое выше давления волны Чепмена-Жуге.

Определены размеры детонационных ячеек. Ширина детонационных ячеек составляла для различных смесей от 4 мм (ER =1) до 8 мм (ER =0.85). Определены условия формирования пересжатой детонации в безразмерных величинах: при D/λ=4.5-6.0 происходит распад детонационной волны в расширяющейся секции и наблюдается последующее увеличение давления на фронте детонационной волны в 2 раза по сравнению с давлением Чепмена-Жуге.

Глава 2. Влияние пористого покрытия на распространение детонационной волны

Глава посвящена экспериментальному исследованию торможения и затухания волны детонации в водородно-воздушной смеси в цилиндрическом канале. Для этого были проведены эксперименты в детонационной трубе, одна из секций которой было изнутри покрыта пористым материалом. Перед входом в секцию с пористым материалом была сформирована детонационная волна. Определялась зависимость скорости и давления на фронте детонации/ударной волны от толщины пористого материала и состава смеси (мольного избытка горючего).

Целью этой главы было определение параметров водородно-воздушной детонации в каналах с пористыми покрытиями с открытыми порами. Параметры определялись в зависимости от концентрации водорода и толщины пористого слоя. Кроме того, целью исследования было определение условий для восстановления детонации после прохождения поглощающей секции.

2.1 Экспериментальная установка

Эксперименты проводились в стальной трубе круглого сечения. На рисунке 28 показана схема установки. Внутренний диаметр трубы 20 мм, длина – 2900 мм. 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 в атмосферу. Переход от медленного горения к детонации происходил в детонационной трубке.

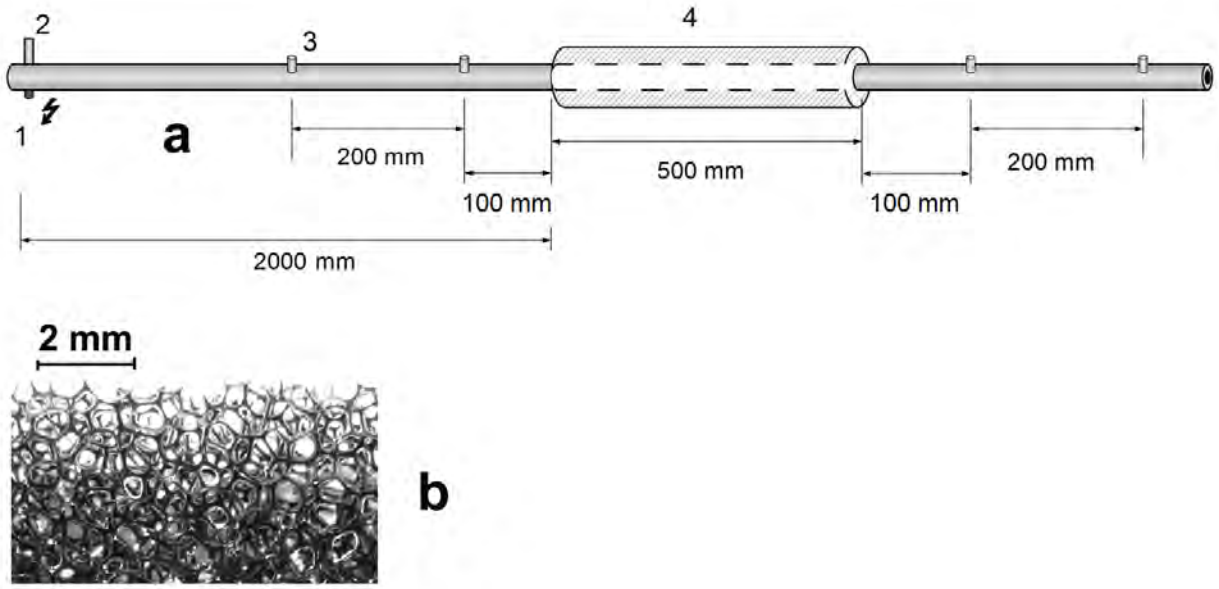


Рисунок 28 – Схема экспериментальной установки (a) и фото пористого материала (b).

На расстоянии 2000 мм от закрытого конца детонационной трубки была размещена стальная секция с пористым слоем на стенках. Длина поглощающей секции составляла 500 мм. Использовался набор стальных секций с различными внутренними диаметрами (20, 26, 30, 40 мм). Вся внутренняя поверхность секции была покрыта пористым материалом. В качестве пористого материала использовали пенополиуретан с 40 порами на дюйм и плотностью 30 кг/м^3. Толщина покрытия выбиралась таким образом, чтобы внутренний диаметр канала составлял 20 мм (без поролона, 3 мм, 5 мм и 10 мм соответственно).

Для определения ослабления волны детонации использовались две пары пьезоэлектрических датчиков давления PCB (111A, 113B), установленных до и после поглощающей секции. Диапазоны датчиков составляли 20 МПа и 7 МПа, соответственно. Время нарастания фронта обоих датчиков составляло менее 1 мкс. Расположение датчиков давления показано на рисунке 28. Для регистрации фронта пламени были установлены фотодиоды FD-256 вместе с датчиками давления. Время нарастания для фотодиодов составляло менее 1 мкс, а диапазон спектра составлял 400-1100 нм. Скорость волны измерялась между двумя датчиками.

Водородно-воздушную смесь выдерживали в сосуде объемом 3 литра при максимальном давлении 0.5 МПа. Перед каждым экспериментом детонационная труба была заполнена тремя объемами водородно-воздушной смеси при атмосферном давлении и температурой 295 К. Сразу же после заполнения детонационной трубы смесь воспламенили с образованием детонации. Энергия, выделяемая в искре, не превышала 0.1 Дж, что значительно меньше энергии прямого инициирования детонации [77].

2.2 Результаты и обсуждение

Эксперименты проводились для бедных (ER = 0.8), стехиометрических (ER = 1) и богатых (ER = 1.5) смесей водорода и воздуха для трех толщин поглощающего материала: 3 мм, 5 мм и 10 мм. Во всех трех случаях на входе в пористую секцию датчики обнаруживали детонационную волну. Скорость волны составляла 2000-2200 м/с, пиковое давление фон Неймана составляло 2.5-4.0 МПа (сплошная линия), а давление Чепмена-Жуге было примерно 1.5-2 МПа. Фронт пламени (пунктирная линия) регистрировался одновременно (временная погрешность менее 1 мкс) с ударной волной. На рисунке 29 показаны формы сигналов датчиков давления и фотодиодов, установленных перед секцией с пористым материалом, и после секции для различных смесей.

В случае стехиометрической смеси детонация распадалась на ударную волну и фронт пламени только с использованием пористого слоя толщиной 10 мм. Когда толщина пористого материала составляла 3 мм, интенсивность ударной волны составляла около 0.9 давления Чапмена-Жуге, как показано на рис. 29а. Скорость ударной волны составляла 2000 м/с. Фронт реакции был обнаружен одновременно с ударным фронтом.

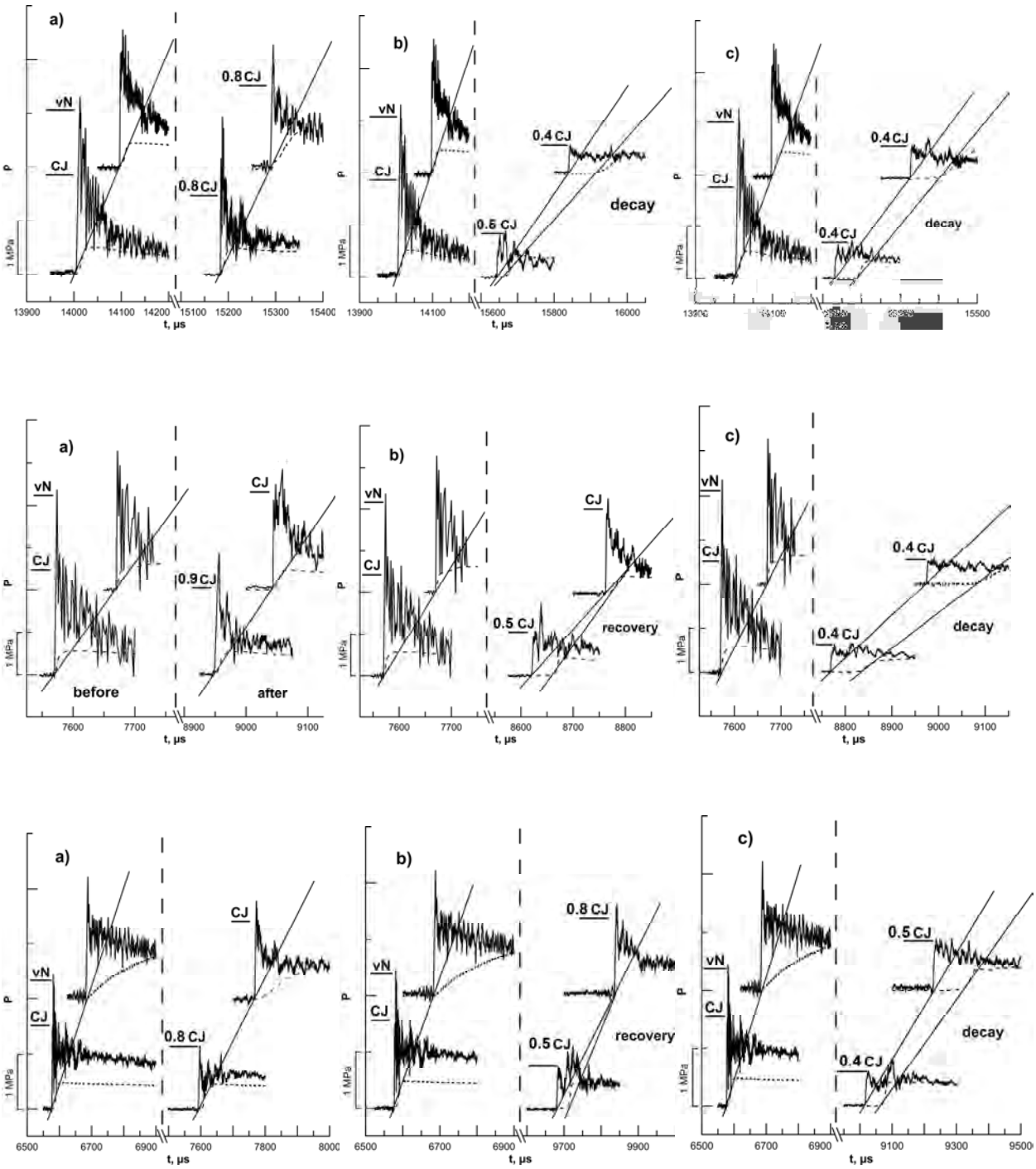


Рисунок 29 – Осциллограммы давления и показания фотодиодов до и после поглощающей секции для трёх толщин пористого материала: 3 мм (a), 5 мм (b) и 10 мм (c). Бедная смесь (ER = 0.8) водорода с воздухом (сверху), стехиометрическая смесь (ER = 1) водорода с воздухом (в центре) и богатая смесь (ER = 1.5) водорода с воздухом (снизу). *Штриховая линия* – показания фотодиодов, *сплошная линия* – показания датчиков давления.

Когда толщина поистого материала составляла 5 мм, интенсивность ударной волны составляла около 0.5 от давления Чепмена-Жуге, как показано на рисунке 29b. Скорость ударной волны составляла 1450 м/с. На расстоянии 100 мм от поглощающей секции фотодиод регистрировал задержку в 50 мкс между ударной волной и фронтом пламени. Однако в последнем положении датчика давления и фотодиода (на расстоянии 300 мм от поглощающей секции) задержка была уменьшена до 10 мкс. Кроме того, интенсивность ударной волны увеличилась до 0.8 давления Чепмена-Жуге. Это может привести к восстановлению волны детонации.

Когда толщина пористого материала составляла 10 мм, интенсивность ударной волны составляла 0.4 от давления Чепмена-Жуге, как показано на рисунке 29в. Средняя скорость ударной волны составляла 1000 м/с. На расстоянии 100 мм от конца пористой секции осциллограф регистрирует задержку 75 мкс между приходом ударной волны и фронтом реакции. Кроме того, на расстоянии 300 мм от конца пористой секции задержка увеличивалась до 120 мкс. Задержка между ударной волной и фронтом пламени достигает таких значений, что восстановление волны детонации не происходит.

Параметры ударной волны после прохождения пористой секции представлены в таблице 2. В обедненной водородно-воздушной смеси пористый слой 3 мм практически не ослабляет детонационную волну. Когда толщина поглощающего материала составляла 5 мм, интенсивность ударной волны составляла около 0.5 от давления Чепмена-Жуге, а скорость ударной волны составляла 1000 м/с. Кроме того, значительная задержка между ударной волной и фронтом пламени наблюдалась на расстоянии 100 мм от пористой секции. На расстоянии 300 мм от конца пористой секции задержка была увеличена до 100 мкс, что означает, что произошел распад детонационной волны. В обедненной смеси детонационная волна может быть значительно ослаблена с использованием пористого слоя толщиной 5 мм.

В смеси, богатой водородом, значительная задержка между ударной волной и фронтом происходит с использованием 5 мм, но детонационная волна восстанавливается к тому времени, когда она достигает второго датчика давления.

Полный детонационный распад происходит только при использовании поглощающего слоя толщиной 10 мм.

Таблица 2 – Параметры ударной волны после прохождения пористой секции. ER – коэффициент избытка горючего, h – толщина пористого материала, V – скорость ударной волны между третьим и четверым датчиками давления, a_{CJ} –скорость звука Чепмена-Жуге.

Горючая смесь	V_{CJ}, м/с	h, мм	V, м/с	V/a_{CJ}	Режим
H_2+Воздух, ER = 0.8	1866	0	2170±60	2.08	Стабильная
		3	1820±50	1.74	Стабильная
		5	1025±25	0.98	Распад
		10	1020±25	0.98	Распад
H_2+Воздух, ER = 1	1971	0	2220±60	2.03	Стабильная
		3	2100±60	1.92	Стабильная
		5	1430±35	1.31	Восстановление
		10	970±20	0.89	Распад
H_2+Воздух, ER = 1.5	2085	0	2150±60	1.84	Стабильная
		3	1180±30	1	Стабильная
		5	1210±30	1.03	Восстановление
		10	950±20	0.81	Распад

Таблица 3 – Параметры ослабленной детонационной волны после прохождения пористой секции, полученные в других работах.

Смесь	V/V_{C-J}, (V_{C-J}, м/с)	V/a_{CJ}	V/a_{vN}	Работа
$C_3H_8+O_2$, стальная сетка	0.35 (2360)	0.65	1.12	[44]
H_2+O_2, 50% аргона, стальная вата	0.53 (1700)	0.85	0.94	[43]
H_2+O_2, 70% аргона, круглая труба и стальная вата	0.38 (1600)	0.63	0.67	[43]
$C_3H_8+O_2$, 50% аргона стальная сетка	0.53 (1900)	0.93	1.3	[43]
H_2+O_2, стальная сетка	0.43 (2700)	0.75	0.9	[40]
$C_2H_4+O_2$, стальная сетка	0.5 (2200)	0.86	1.38	[40]

В таблице 2 показаны регистрируемые режимы горения, полученные в экспериментах в цилиндрическом канале. Детонационная волна считалась распадающейся, если задержка между ударной волной и фронтом пламени возрастала от первого фотодиода до второго. Как правило, эта задержка заведомо превышала 50 мкс, что достаточно для распада детонационной волны. Детонационная волна считалась восстанавливающейся, когда задержка между ударной волной и фронтом пламени наблюдалась на первом фотодиоде, но становилась менее погрешности прибора и не превышала 1 мкс. Наконец, детонационная волна считалась стабильной, если между ударной волной и фронтом пламени не наблюдалась задержка.

Видно, что покрытие толщиной 3 мм не приводит к распаду детонации для любого ER. Пористый слой толщиной 5 мм приводит только к распаду в обедненной смеси с ER = 0.8, но в стехиометрических (ER=1) и богатых смесях (ER=1.5) детонация восстанавливается. Пористый слой толщиной 10 мм приводит к распаду детонации во всем диапазоне ER. В случае обедненной смеси увеличение пористого слоя от 5 до 10 мм не приводит к дальнейшему затуханию.

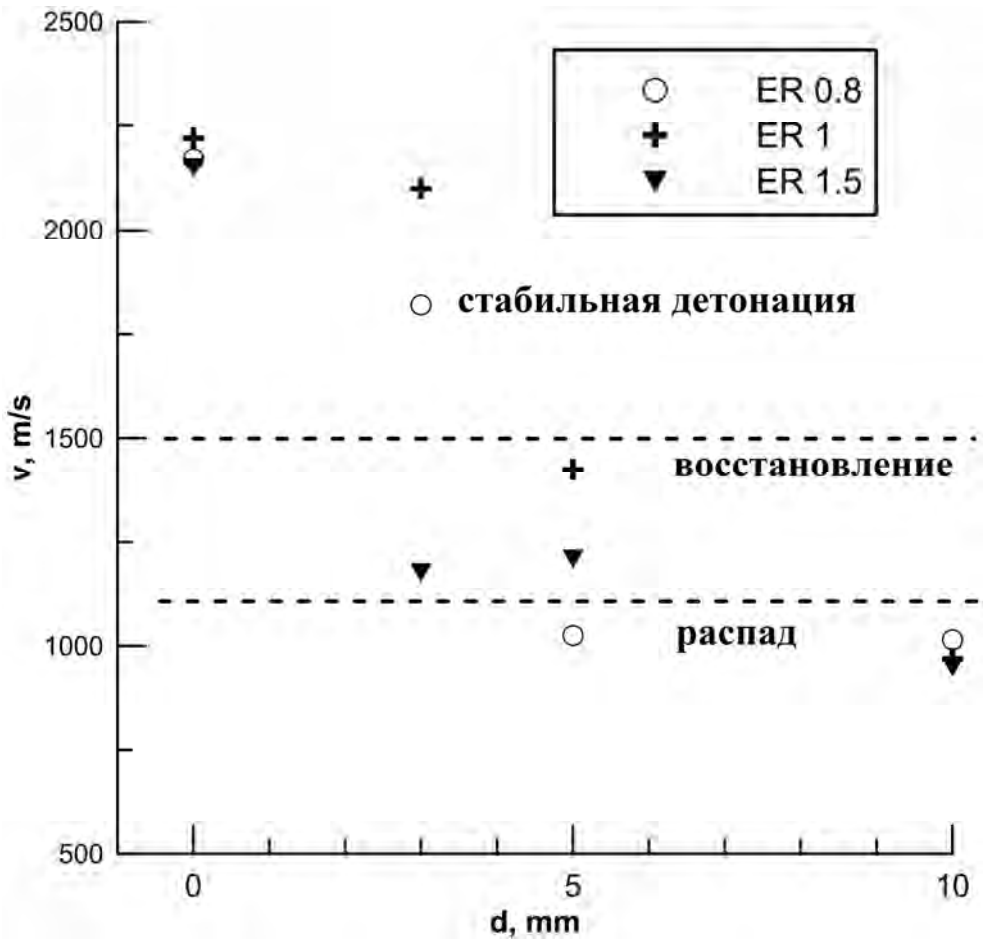


Рисунок 30 – Зависимость скорости ударной волны от толщины пористого слоя для различного состава горючей смеси.

В таблице 3 показаны параметры детонационных волн после прохождения пористых секций с различными материалами, полученные в других работах. Из таблицы видно, что, несмотря на различные горючие смеси, отношение скорости волны к скорости звука в неразбавленных смесях составляет около единицы. Также видно, что стальная вата эффективнее ослабляет детонационную волну, чем стальная сетка. В данной работе отношение скорости волны к скорости звука так же составляло около единицы при использовании ППУ толщиной 5 и 10 мм.

На рисунке 30 приведены данные о скорости для разных ER и различных толщин поглощающего слоя. Вычисленные параметры Чепмена-Жуге были взяты из [78]. Восстановление волны детонации возможно, когда скорость ударной волны превышает 1100 м/с. Существуют три отдельные области: стабильная детонация (со скоростью более 1500 м/с), восстановление детонации и распад детонации (со

скоростями 1500 м/с и ниже). Распад детонационной волны наблюдается только при скоростях ниже акустической скорости Чепмена-Жуге, так как скорость ударной волны, превышающая скорость звука в продуктах сгорания, обычно обеспечивает возможность повторного возникновения детонации. Отсутствие детонации в богатой смеси при использовании пористого слоя толщиной 3 мм объясняется тем, что детонационная ячейка в богатой смеси становится больше, чем диаметр канала [77], и детонационная волна становится нестабильной и её легче ослабить. Результаты показывают, что пористый материал на стенке канала может ослабить давление детонации до 0.4 давления детонации, а скорость до скорости звука Чепмена-Жуге.

При вхождении в пористую секцию поток за ударной волной расходует энергию на расширение канала из-за сжимаемости пористого покрытия на стенках и ухода массы в пористый материал. Таким образом, снижается давление ударной волны и температура в ней. Поскольку скорость реакции зависит от температуры, даже небольшое ослабление ударной волны приводит к замедлению реакции и фронта пламени, соответственно. Замедление фронта реакции, в свою очередь, приводит к дальнейшему ослаблению ударной волны. Увеличение толщины пористого слоя на стенке приводит к большему расширению и большему уходу массы в пористый материал. Поэтому можно наблюдать падение скорости и амплитуды ударной волны за счет увеличения толщины пористого слоя.

2.3 Выводы

Экспериментально исследовано распространение детонации в неразбавленной водородно-воздушной смеси в пористом канале при атмосферном давлении и комнатной температуре. Скорости и давление ударной волны определялись после прохождения через пористую секцию. Исследовано влияние толщины пористого покрытия на распространение детонационной волны. Было показано, что пористое покрытие толщиной 5 мм может уменьшить давление детонационной волну до половины амплитуды давления Чепмена-Жуге. Результаты показывают, что увеличение толщины пористого материала на стенках канала приводит к дальнейшему затуханию волны детонации до такой степени, что она не

восстанавливается на расстоянии 15 диаметров канала от конца пористой секции. Кроме того, показано, что в случае максимального затухания в водородно-воздушной смеси давление ударной волны составляет 0.4 от давления Чепмена-Жуге, а скорость ударной волны падает ниже скорости звука Чепмена-Жуге. Было обнаружено, что восстановление волны детонации возможно, когда скорость ударной волны выше, чем скорость звука в точке Чепмена-Жуге.

Глава 3. Влияние типа пористого материала на распад детонации в газах

Глава посвящена экспериментальному исследованию распада детонации и распространению пламени в водородно-воздушной смеси в прямоугольных каналах с твердыми стенками и двумя типами пористых покрытий: стальной ватой и пенополиуретаном (ППУ). Для определения динамики давления ударной волны внутри секции с пористым покрытием использовались датчики давления. Распространение фронта пламени изучалось с использованием фотодиодов и высокоскоростной камеры. Для всех смесей детонационная волна была сформирована перед входом в секцию с пористым покрытием.

Целью этой работы было изучение динамики фронта пламени и избыточного давления ударной волны в канале с пористыми стенками, динамика пористого материала при тангенциальных ударных волнах, изучение распространения пламени в пористом материале и сравнение детонации параметры в каналах с твердыми стенками и двумя типами пористых материалов на стенках.

3.1 Экспериментальная установка

На рисунке 31 показана схема установки. Эксперименты проводились в канале, состоящем из двух секций: круглого сечения длиной 2000 мм с внутренним диаметром 20 мм и прямоугольного сечения длиной 500 мм. Верхняя и нижняя противоположные стенки прямоугольной секции были покрыты пористым материалом или стальными пластинами, а боковые стенки были сделаны из стекла для визуальной регистрации. Водородно-воздушную смесь подавали на закрытый конец цилиндрической детонационной трубки. Искровой промежуток также находился на закрытом конце детонационной трубки. Другой конец детонационной трубки был открыт. Стационарная детонационная волна была сформирована перед секцией прямоугольного сечения.

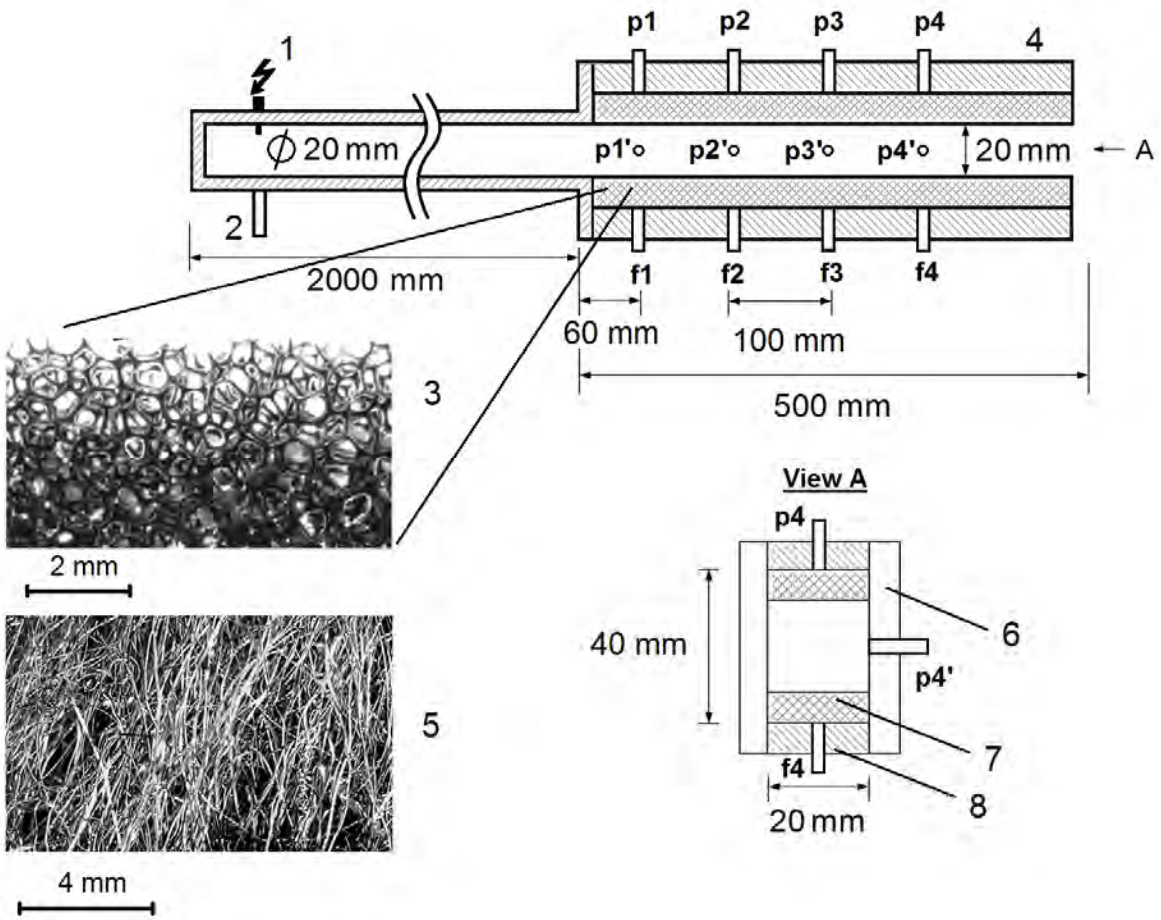


Рисунок 31 – Схема экспериментальной установки: 1 – искровой промежуток, 2 – подача горючей смеси, 3 – фото ППУ, 4 – прозрачная секция с пористым покрытием, p1–p8 – датчики давления, f1–f4 – фотодиоды, 5 – фото стальной ваты, 6 – прозрачная стенка, 7 – пористое покрытие или стальная пластина толщиной 10 мм, 8 – твёрдая стенка.

Ширина прозрачного стеклянного окна составляла 40 мм, а ширина стальной стороны составляла 20 мм. Для изучения распространения детонации в канале с твердыми стенками в канал были вставлены две стальные пластины, так что размеры поперечного сечения были равны 20×20 мм. Для изучения распространения детонации в канале с пористыми стенками в канал были вставлены два типа пористых покрытий, так что размеры поперечного сечения были также 20×20 мм. Таким образом, толщина пористой поверхности составляла 10 мм. Использовались два вида поглощающих материалов: ППУ, который характеризуется плотностью 0.03 г/см3, пористостью 95% либо 98%, средним размером пор 0.8 мм и стальной ваты,

которая характеризуется плотностью 0.075 г/см^3 , пористостью 99%, средним размером волокна 0.03 мм.

Для определения ослабления волны детонации в секцию под поглощающим слоем были вставлены четыре датчика давления, изготовленные PCB (111A, 113B) и четыре фотодиода FD-256. Еще четыре датчика давления были помещены в одно и то же поперечное сечение в прозрачной стеклянной стенке. Расстояние между датчиками составляло 100 мм. Первые датчики были размещены на расстоянии 60 мм от входа в пористую секцию. Ошибка измерения времени датчиков была меньше 1 мкс.

Процесс распада детонационной волны наблюдался также с использованием теневого прибора ИАБ-451. В качестве источника света использовался искровой разрядник высокого напряжения.

Для наблюдения за фронтом детонационной волны использовалась высокоскоростная видеокамера «Видеоспринт».. Проводилась одиночная съемка для детальных снимков фронта пламени и стрик-съемка для получения динамики фронта пламени. В стрик-режиме частота кадров была равна 170000 кадрам в секунду, экспозиция составляла 1 мкс, а разрешение составляло 1280*3 пикселя. Камера регистрирует излучение в диапазоне 400-1000 нм.

Водно-воздушную смесь выдерживали в сосуде объемом 3 литра при максимальном давлении 0.5 МПа. Перед каждым экспериментом детонационная трубка заполнялась водородно-воздушной смесью при атмосферном давлении и температурой 295 К. Коэффициент эквивалентности варьировался от 0.8 до 1.5. Сразу же после заполнения детонационной трубы смесь воспламенялась с последующим переходом горения в детонацию. Для всех смесей перед входом в прозрачную секцию была сформирована детонационная волна.

3.2 Результаты и обсуждение

3.2.1 Распад детонации на ударную волну и фронт пламени

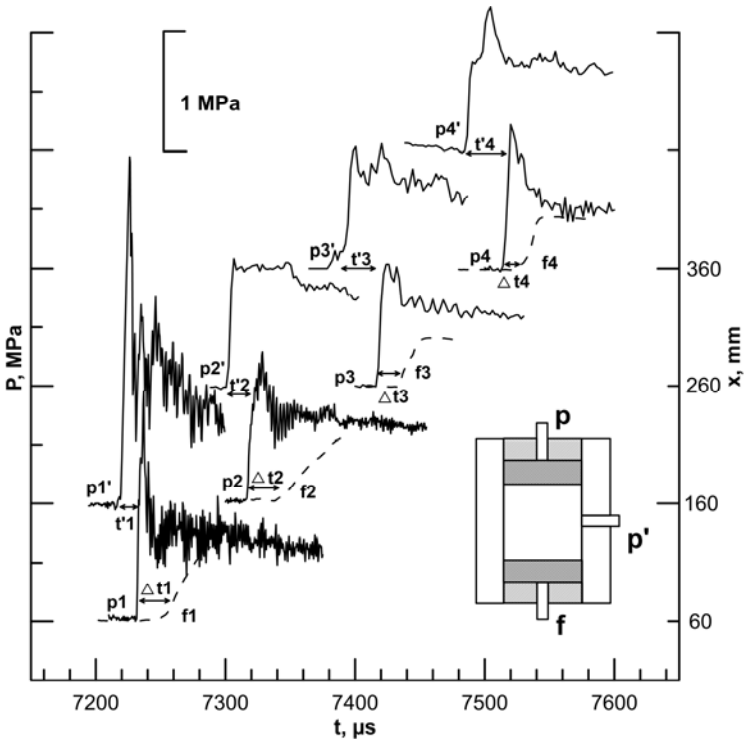
Скорость волны составляла 2150-2200 м/с, а пиковое давление фон Неймана составляло 2.5-4.0 МПа для смесей с ER = 0.8, 1 и 1.5. В канале с твердыми

стенками регистрировалось стационарное распространение детонации Чепмена-Жуге.

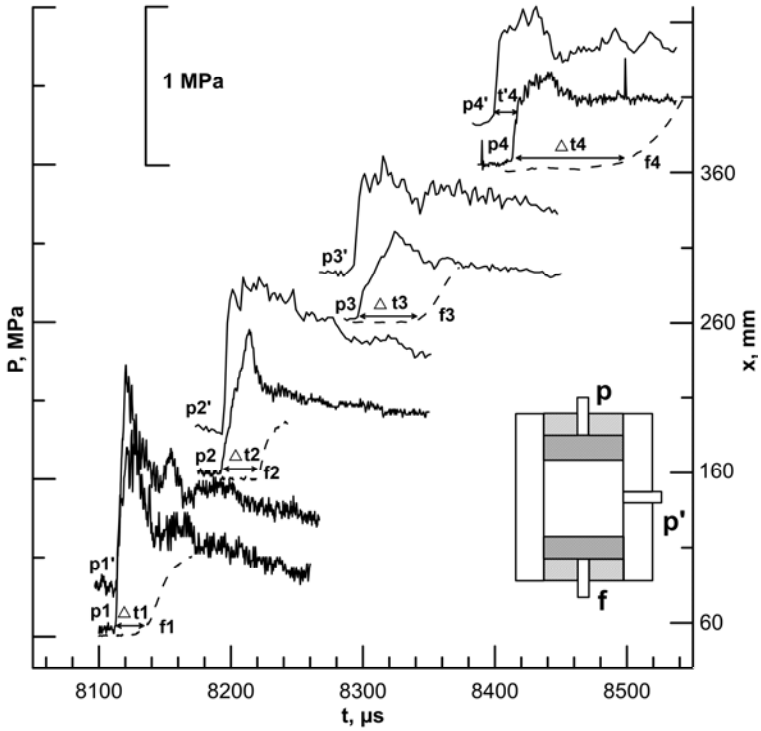
На рисунке 32 показана эволюция фронта давления и пламени вдоль поглощающей секции с ППУ (а) и стальной ватой (б) для стехиометрической смеси. Датчики давления были расположены на нижней стенке и на боковой стенке в том же поперечном сечении.

Первые датчики давления (p1’ и p1) показывают, что в случае ППУ на стенках волна по-прежнему сохраняет форму детонации; её амплитуда составляет 2 МПа под пористым материалом и почти 4 МПа на боковой стенке. На следующих парах датчиков (p2 - p4’) амплитуда ударной волны значительно падает примерно до 1 МПа и остается неизменной до конца пористой секции.

В случае стальной ваты первая пара датчиков давления регистрировала волну с амплитудой 1.3 МПа под пористым материалом и 1.5 МПа на боковой стенке. Амплитуда волны продолжает падать, пока она не достигнет 0.6 МПа к концу пористой секции.



a



b

Рисунок 32 – Эволюция давления (сплошная линия) и фронта пламени (штриховая линия) под пористой секцией и на боковой стенке с разными пористыми материалами: a – ППУ, b – стальная вата. Датчики давления p1-p4 находились под пористым материалом, датчики давления p1’-p4’ находились на боковой стенке. Правая ось показывает расстояние от начала пористой секции.

Результаты показали, что конечное давление ударной волны составило около 0.6 МПа в случае стальной ваты, и около 1.2 МПа в случае ППУ. Датчики давления под пористым материалом и на твердой стенке позволили нам сравнить времена прихода ударных волн. Эти времена прихода представлены в таблице 4. Показания давления на рисунке 27 показывают, что ударная волна под ППУ приходит позднее ударной волны на твердой стенке (t'1 = 12 мкс, t'2 = 16 мкс, t'3 = 27 мкс, t'4 = 30 мкс соответственно). Это означает, что ударная волна в случае ППУ распространяется медленнее в пористом слое. При использовании стальной ваты в качестве пористого материала разница момента прихода между ударными волнами на боковой стенке и под пористым материалом все еще присутствует, но только на четвертой паре датчиков давления (t'4 = 14 мкс).

Поскольку датчик давления и фотодиод расположены в одном и том же поперечном сечении, то можно наблюдать распад детонационной волны на ударную волну и фронт пламени. Различие во времени между приходом ударной волны и фронтом пламени возрастает по мере распространения пламени вдоль пористого материала. Первая пара датчиков находилась на расстоянии 60 мм от входа в пористую секцию. Разница во времени: Δt1 = 18 мкс, Δt2 = 21 мкс, Δt3 = 18 мкс, Δt4 = 16 мкс для пенополиуретана и Δt1 = 20 мкс, Δt2 = 28 мкс, Δt3 = 45 мкс, Δt4 = 82 мкс для стальной ваты.

Таблица 4 – Разница во времени между приходом ударной волны и фронта пламени (Δt) и между ударной волной на боковой стенке и под пористым материалом (t’). Данные основаны на осциллограммах рисунка 32.

	ППУ		Стальная вата	
Датчик №	t’, мкс	Δt, мкс	t’, мкс	Δt, мкс
1	12	18	0	20
2	16	21	0	28
3	27	18	0	45
4	30	16	14	82

На рисунке 33 показано сравнение пикового давления в сплошном канале и для двух типов пористого материала на стенках. К концу секции со стальной ватой давление под стальной ватой и на боковой стенке примерно в шесть раз ниже, чем в канале с твердыми стенками и по меньшей мере в 10 раз ниже, чем в канале с твердыми стенками. К концу секции с ППУ давление под пористым материалом и на боковой стенке примерно в три раза ниже, чем в канале с твердыми стенками.

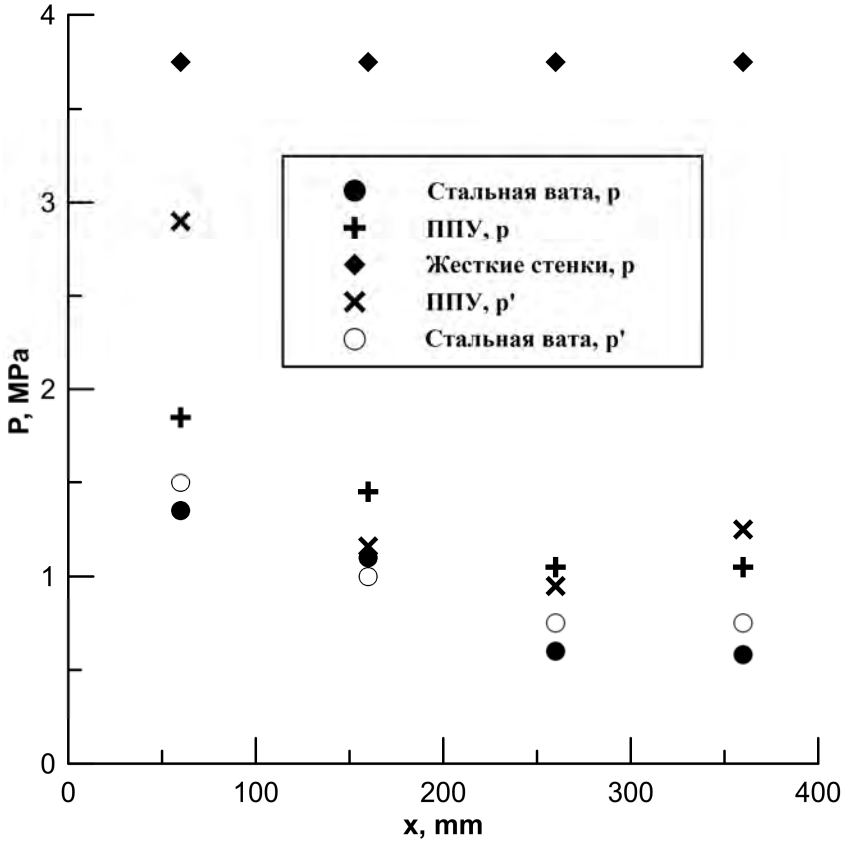
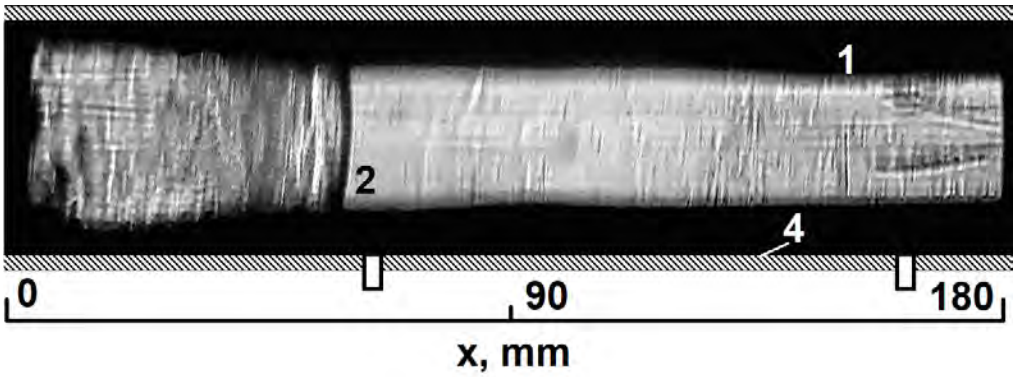


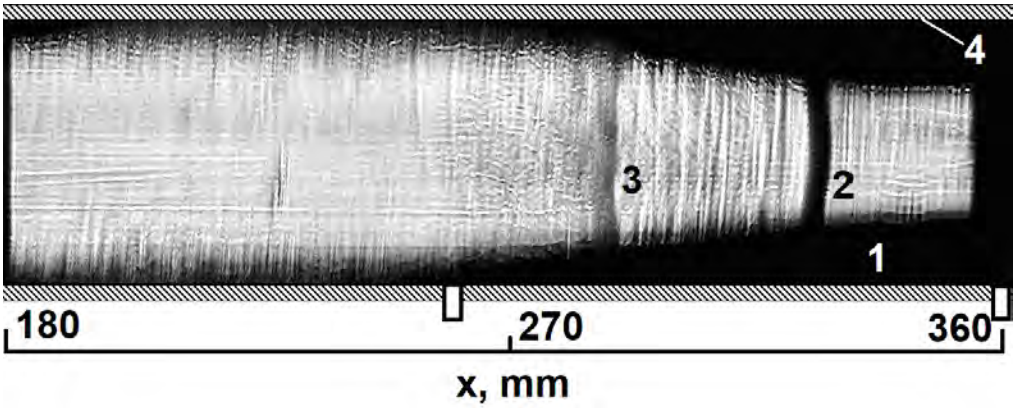
Рисунок 33 – Эволюция пикового давления под пористым материалом для различных пористых материалов и твёрдой стенки для ER=1.

Данные этой работы показывают, что давление ударной волны оказывается вдвое ниже при использовании стальной ваты, чем при использовании ППУ. Наблюдается аналогичное затухание ударной волны на боковой стенке и под пористым материалом.

На рисунках 34-35 показаны теневые снимки детонационной волны в канале с ППУ и стальной ватой на стенках. Так как поле зрения теневого прибора меньше длины стеклянной секции, то при наблюдении распада детонационной волны пористая секция визуализировалась частями.

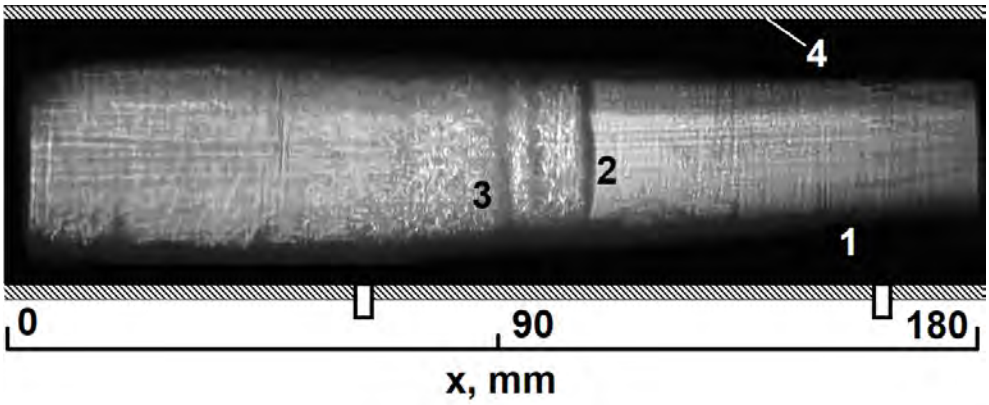


a

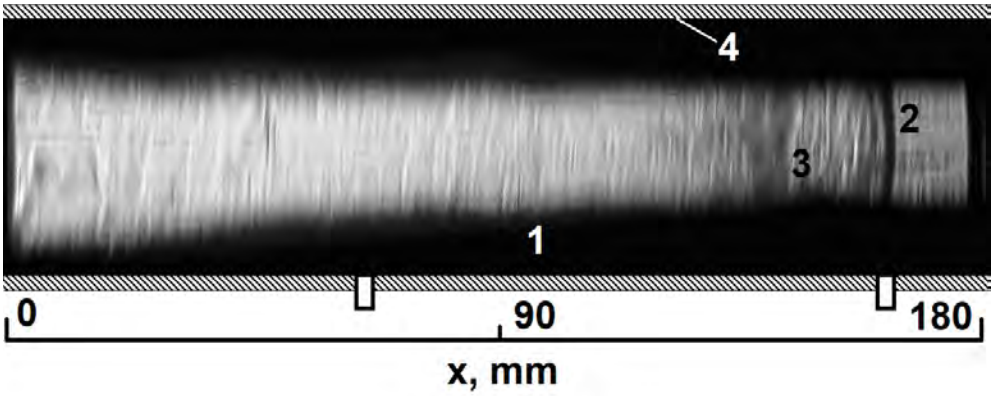


b

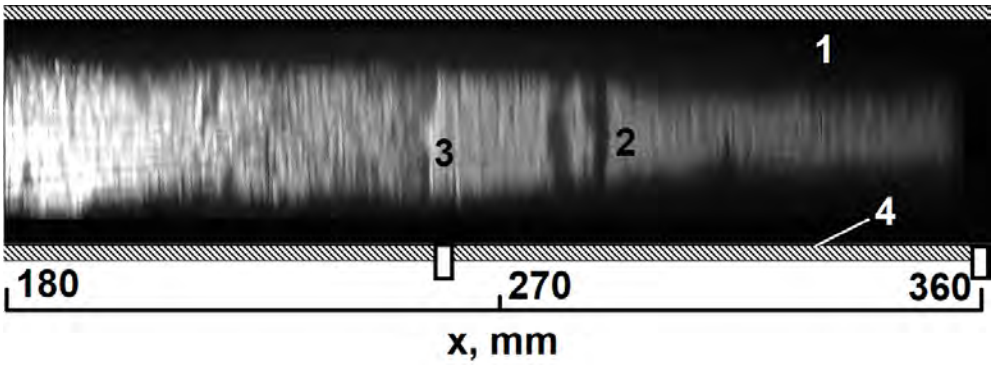
Рисунок 34 – Типичные теневые изображения распада детонационной волны в канале с ППУ на стенке: первая половина пористой секции, 40 мкс после входа волны в пористую секцию (a) и вторая половина пористой секции, 200 мкс после входа волны (b). Расстояние от начала пористой секции показано снизу кадров. 1 – ППУ, 2 – ударная волна, 3 – фронт пламени, 4 – твёрдая стенка. Волна двигалась слева направо.



a



b



c

Рисунок 35 – Типичные теневые изображения распада детонационной волны в канале со стальной ватой на стенке: первая половина пористой секции, 100 мкс и 200 мкс после входа волны в пористую секцию (a,b) и вторая половина пористой секции, 300 мкс после входа волны (c). Расстояние от начала пористой секции показано снизу кадров. 1 – стальная вата, 2 – ударная волна, 3 – фронт пламени, 4 – твёрдая стенка. Волна двигалась слева направо.

На рисунках 34 и 35 показаны теневые изображения детонационного распада в пористой секции с ППУ (рисунок 34) и стальной ватой (рисунок 35). Видно, что полный распад детонации на рисунке 34b, так как ударная волна и фронт пламени отделены друг от друга на 15-20 мм. Разница в левой части рисунков 34a и 34b является следствием значительного сжатия ППУ после прохождения ударной волны. Максимальное сжатие ППУ составляет около трёх раз на расстоянии около 100-150 мм от ударной волны. На рисунке 35 показано увеличение расстояния между ударной волной и фронтом пламени более 20 мм, когда волна распространяется вдоль стальной ваты. Сравнение между рисунком 34b и рисунками 35a, b, c показывает, что сжатие пористого материала в конце наблюдаемого участка значительно выше в случае ППУ (масштаб изображений одинаковый). Это можно объяснить тем, что стальная вата имеет более высокую пористость (99% против 95% в ППУ) и, следовательно, меньшее сопротивление потоку газа.

Таблица 5 – Расстояние до ударной волны от начала пористой секции (x), разница во времени прихода (dt) и расстояние (dx) между ударной волной и фронтом пламени из рисунков 4 и 5.

	X, мм	dx, мм	dt, мкс
Рис. 4a	60	16	14
Рис. 4b	330	40	35
Рис. 5a	90	17	15
Рис. 5b	170	21	20
Рис. 5c	280	35	35

В таблице 5 показано расстояние между ударной волной и фронтом пламени, полученное в виде из теневых изображений.

В отличие от ППУ, стальная вата демонстрирует более низкое сжатие ударной волной из-за гораздо более высокой пористости стальной ваты.

3.2.2 Механизмы распространения детонации в канале с различными материалами на стенке

В первом случае пористое покрытие было заменено двумя стальными пластинами, установленными на верхней и нижней стенках канала прямоугольного сечения. Датчики давления и фотодиоды были прикреплены к этим пластинам (см. рисунок 36).

Как и ожидалось, в канале с твердыми стенками регистрировалось устойчивое распространение детонации Чепмена-Жуге. Осциллограммы давления показаны на рисунке 36 для четырех положений датчиков давления. Давление на фронте детонации принимает устойчивое значение 2 МПа и не изменяется при распространении вдоль канала. Временная задержка между фронтом давления и фронтом пламени не превышает 1 мкс, что подтверждает устойчивое распространение детонации.

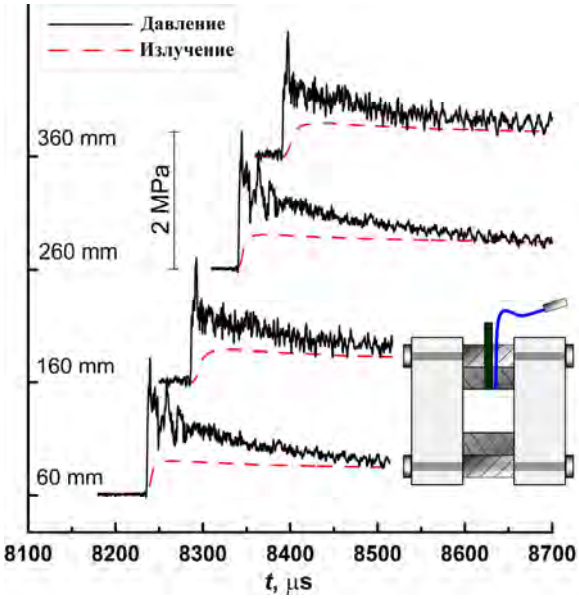


Рисунок 36 – Показания датчиков давления и фотодиодов для четырех позиций в канале с жесткими стенками.

Несмотря на то, что фронт детонационной волны имеет ячеистую структуру, запись интегрально вдоль ширины прямоугольного канала дает почти плоскую структуру фронта (рисунок 37). Детонация (*3*) распространяется слева направо.

b)

a)

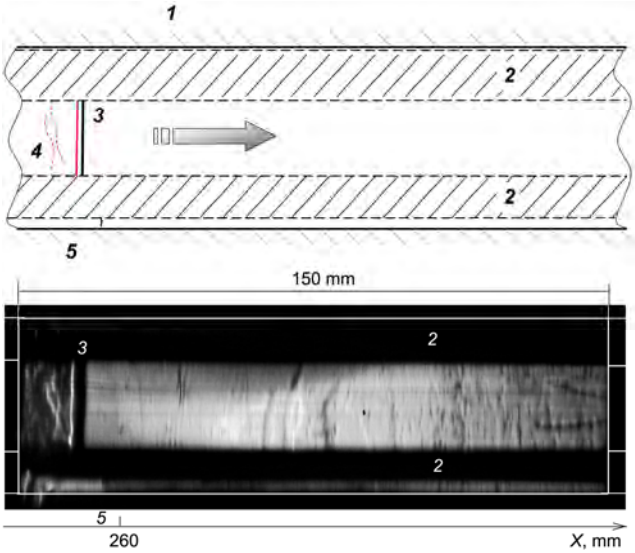
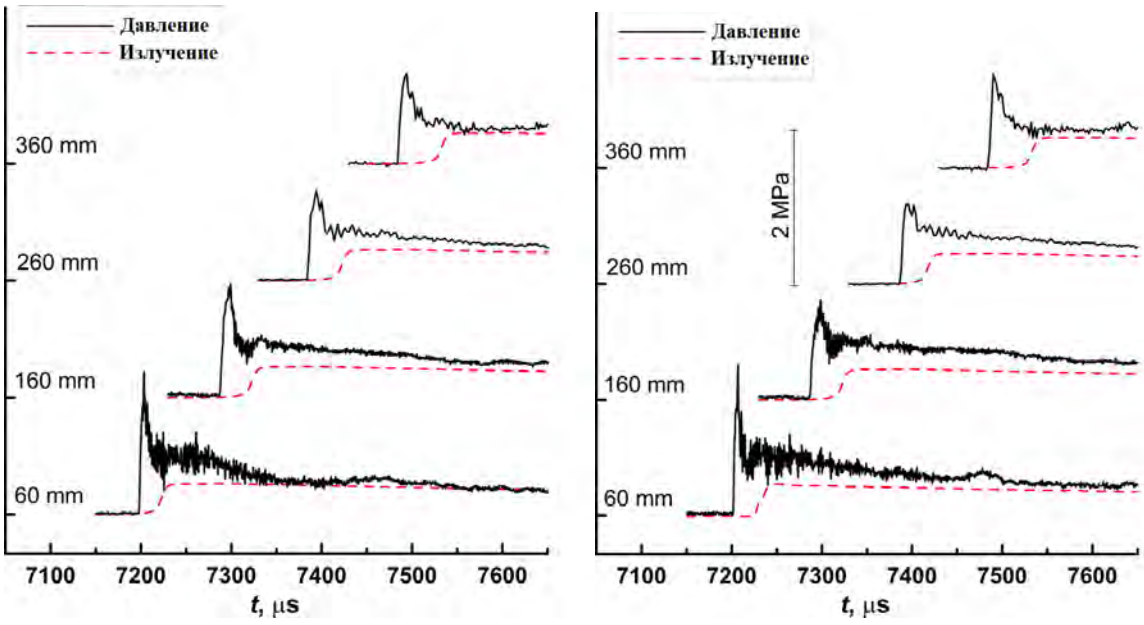


Рисунок 37 – Тененной снимок (a) и схематическое изображение (b) детонационной волны в прямоугольном канале с жесткими стенками. 1: прямоугольный канал; 2: стальные пластины; 3: детонационная волна; 4: продукты детонации; 5: ударная волна.

В зазоре между стальной пластиной (*2*) и нижней стенкой (*1*) канала обнаружена волна (*5*), распространяющаяся впереди фронта детонации.

Во втором случае был использован ППУ на стенках канала. Осциллограммы давления показаны на рисунке 38 для ППУ-95 и ППУ-98, когда верхняя и нижняя стенки прямоугольного канала покрыты пористым материалом с открытыми порами. В отличие от устойчивого распространения детонации (как показано на рисунке 36), амплитуда давления уменьшается до 1.2-1.3 МПа. Временной интервал между фронтом ударной волны и фронтом пламени увеличивается с расстоянием от входа в пористую секцию от 15 до 20 мкс в положении 60 мм до 50 мкс в положении 360 мм.



a) *b*)

Рисунок 38 – Показания датчиков давления и фотодиодов в канале ППУ-95 (a) и ППУ-98 (b) для четырех позиций.

Несмотря на то, что показания давления имеют почти тот же вид, что и для устойчивой волны детонации (рисунок 36), фронт пламени существенно отстает от фронта ударной волны. Это указывает на распад детонации. Распад детонации в пористом канале происходит на расстоянии ~ 2 поперечных размеров канала, как показано в [44]. Это расстояние оказалось равным 45-50 мм (~ 2.5 поперечных размера) для стехиометрической водородно-воздушной смеси в [79].

В этом случае камера фиксирует кривизну ударной волны (рисунок 39). Передняя часть имеет сферическую форму. Наличие открытых пор на пористой поверхности приводит к тому, что сжатый газ смещается к стенкам канала, приобретая импульс, направленный перпендикулярно оси. В то же время осевая составляющая импульса сжатого газа уменьшается. Уменьшение этой составляющей импульса приводит к замедлению скорости ударной волны и, соответственно, к кривизне фронта ударной волны и к уменьшению её интенсивности.

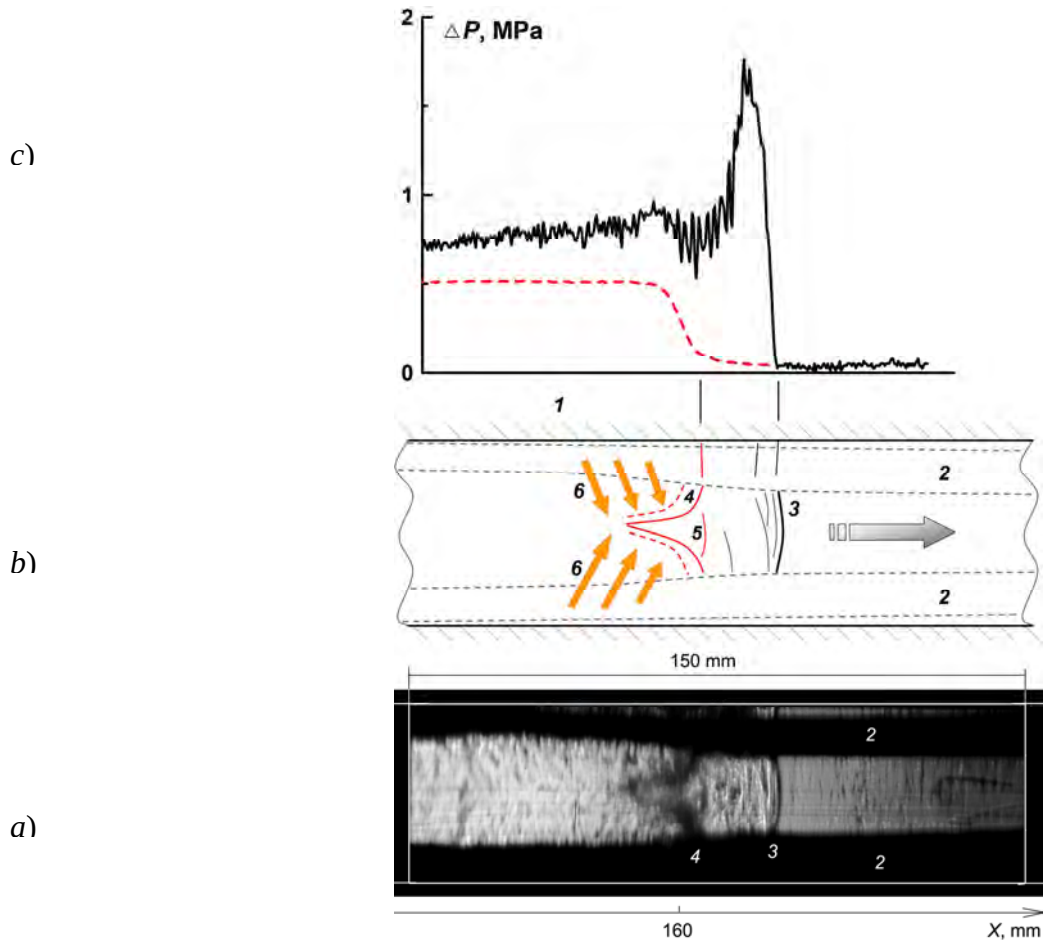


Рисунок 39 – Теневой снимок (a), схематическое изображение (b) и количественное распределение (c) ударной волны, фронта пламени и продуктов сгорания в прямоугольном канале с ППУ-95 на стенке. 1 – жесткая стенка, 2 – пористый материал на стенке (ППУ-95), 3 – ударная волна, 4,5 – фронт пламени, 6 – возможное направление расширения продуктов горения.

Уменьшение импульса и ослабление интенсивности приводят к распаду детонационной волны и к постепенному увеличению временного интервала между ударной волной и фронтом пламени. В этом случае форма фронта пламени претерпевает изменения. Образуется тюльпанообразная структура. Слабое возмущение, зарегистрированное на оси (5), характеризует фронт пламени на стороне стеклянных стенок, не покрытых пористым слоем.

Формирование такой структуры фронта пламени обусловлено рядом факторов: трением потока на пористом покрытии и интенсификацией области горения. Подобные структуры возникают, как правило, с ускорением фронта

пламени. Эти структуры можно найти в [80]. Однако из-за того, что фронт пламени не ускоряется, а замедляется, можно принять во внимание дополнительное предположение о том, что эта структура образуется за счет расширения горячих продуктов сгорания из пор в радиальном направлении (*6*). Ранние эксперименты показали, что сжигание водородно-воздушной смеси происходит также внутри пористого покрытия. Поэтому горячие продукты должны расширяться из пористого покрытия. Расширение может осуществляться как в осевом направлении, противоположном направлению ударной волны (в системе координат ударной волны), так и в радиальном направлении. Последнее наиболее вероятно, так как общая толщина пористого слоя в этом направлении минимальна. Учет всех вышеперечисленных факторов приводит к образованию этой тюльпанообразной структуры фронта пламени.

В зазоре между верхним покрытием и металлической стенкой регистрируется ударная волна, распространяющаяся в той же секции, что и ударная волна на оси канала. Кроме того, в зазоре регистрируется зона горения.

На рис. 39с также показано качественное распределение давления вдоль оси канала во время прохождения ударной волны датчика давления №2. Это пространственное распределение может быть приблизительно получено из временного, характерного для показания давления, умножая его на скорость ударной волны. Легко видеть, что происходит постепенное увеличение давления после основного скачка. Вторичное увеличение давления вызвано расширением продуктов сгорания за фронтом пламени.

Была проведена серия экспериментов с использованием ППУ, который был покрыт пленкой. Это позволяет избежать потерь на трение потока газа на поверхности покрытия.

Осциллограммы давления показаны на рисунке 40. В отличие от устойчивой детонации и распространения по пористой поверхности, датчики давления регистрируют двукратное увеличение амплитуды давления: до 4.2 МПа в положении 60 мм и 2.7 МПа в 160 мм. Временной интервал между фронтом ударной

волны и фронтом пламени увеличивается с расстоянием от начала пористой секции от 40 мкс в положении 60 мм до 100 мкс в положении 360 мм.

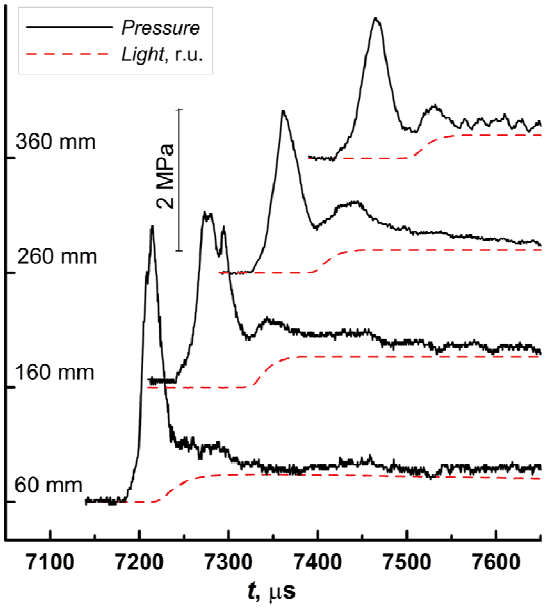


Рисунок 40 – Показания датчиков давления и фотодиодов в канале с ППУ-95, покрытым пленкой (для четырех позиций).

Фотография распространения детонации показана на рисунке 41. Не наблюдался тюльпанообразный профиль фронта пламени. При использовании пористого покрытия с порами, закрытыми пленкой, также регистрировался распад детонации. Отсутствие открытых пор, по-видимому, уменьшает торможение нагретого газа на поверхности до минимума. В результате отсутствия торможения газа на поверхности распределение скорости потока в области горения остается однородным, а фронт принимает сферическую форму.

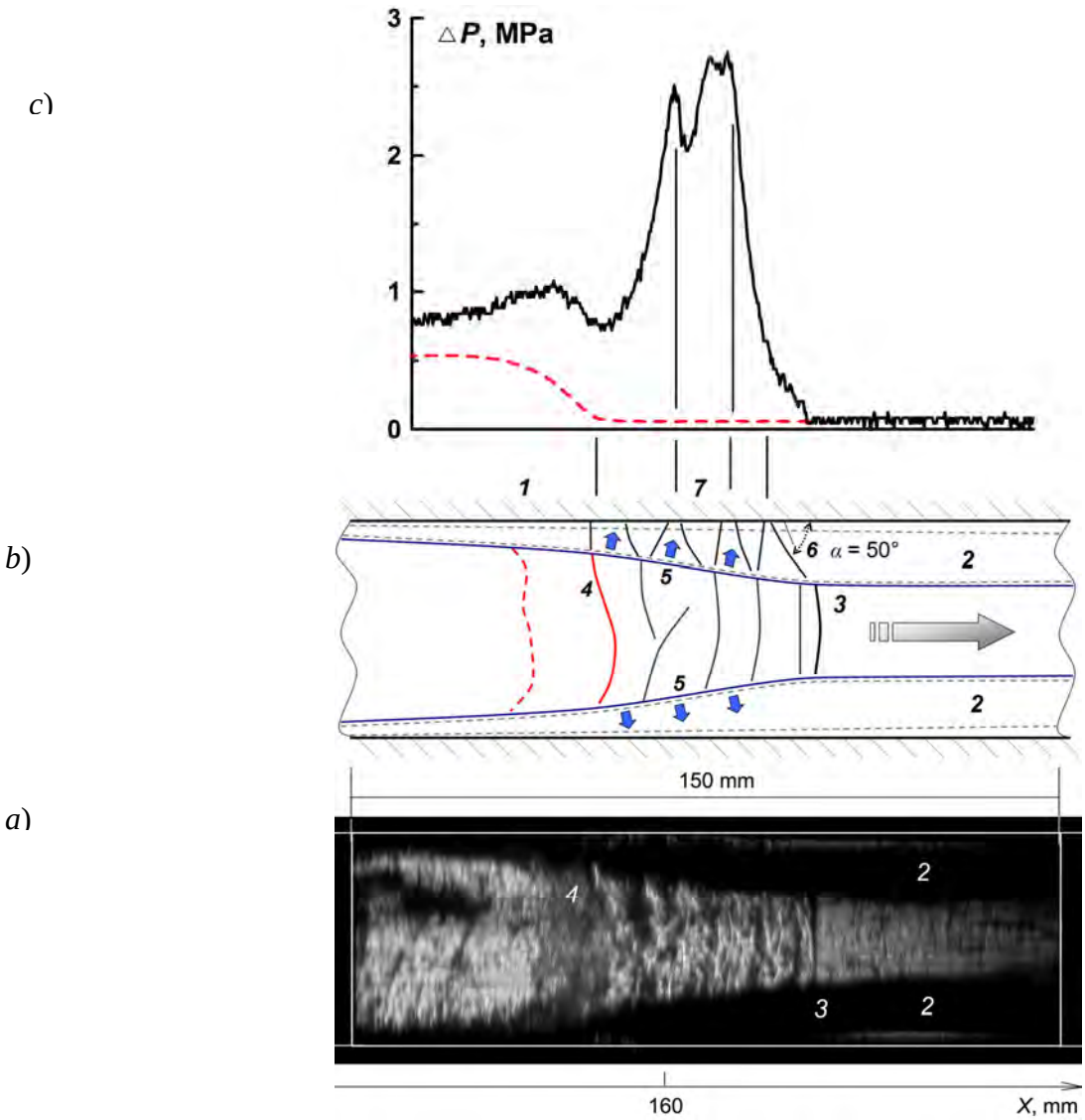


Рисунок 41 – Теневой снимок (a), схематическое изображение (b) и количественное распределение (c) ударной волны, фронта пламени и продуктов сгорания в прямоугольном канале с ППУ-95, покрытым пленкой. 1: прямоугольный канал; 2: ППУ, покрытый пленкой; 3: ударная волна; 4: фронт пламени; 5: направление движения сжатого газа; 6: косые волны; 7: серия косых волн.

При наличии плёнки ударно-сжатый газ за ударной волной не проникает непосредственно в пористый слой. Этот газ оказывает давление (*5*) на плёнку и пористое покрытие под ней. Генерация возмущений ударной волны внутри пористого покрытия осуществляется сдвигом верхнего слоя этого покрытия. Образуется косая ударная волна (*6*). Ряд ударных волн наблюдается в зазоре между верхним покрытием и металлической стенкой. Эти волны, видимые в зазоре,

качественно расположены в соответствии с волновым пакетом в ядре потока, как показано на эскизе. Таким образом, наклонные волны генерируют последующую серию косых ударных волн (*7*) внутри пористого покрытия.

За волновым пакетом в ядре потока следуют фронт горения (4). Продукты сгорания, расширяющиеся, оказывают дополнительное давление на пористую оболочку, тем самым уменьшая зазор между пленкой и стенкой секции. Уменьшение зазора приводит к дополнительному перемещению сжатой газовой смеси внутри пор к стенке. Одновременное наличие пакета косых ударных волн и движение плёнки приводит к тому, что давление за отраженными наклонными волнами увеличивается многократно и достигает 2.5-4.0 МПа.

Так, например, оценка давления для первой отраженной ударной волны может быть выполнена с использованием газодинамических соотношений. Анализируя данные, представленные в работе [81] о скорости распространения возмущений в пористой среде, можно предположить, что материал № 5 с пористостью 97.5% ближе всего к ППУ-95 и ППУ-98. Скорость распространения возмущений принималась равной 290 м/с. Угол α между наклонной волной и стенкой составляет 50° (см. рисунок 41b). Использовались данные экспериментов с α = 45-60 °. Для ударной волны, имеющей скорость 1430 м/с, число Маха нормальной составляющей наклонной волны будет M_n = 3.8 (3.6-4.0). Используя соотношение для наклонных ударных волн, давление P за наклонной ударной волной может быть определено уравнением:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} M_n^2 \sin^2\alpha - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \qquad (1)$$

где γ – показатель адиабаты.

Для начального давления P0 = 0.1 МПа можно получить, что амплитуда давления P равна 0.8-1.1 МПа. Давление за отраженной наклонной волной можно оценить по графикам в [82] и давлениям в [83]. Для достаточно интенсивных волн в большом диапазоне углов давление увеличивается примерно в два раза. Таким

образом, для оценки начальное увеличение давления на стенку может составлять 1.6-2.2 МПа. После серии косых волн это значение может увеличиться в несколько раз.

На рис. 41с приведено качественное представление распределения давления на верхней стенке канала в соответствии с пакетом наклонных ударных волн внутри пористого слоя, когда ударная волна проходит датчик давления № 4. Вторичное увеличение давления также регистрируется во время прохождения фронта пламени.

Также были проведены эксперименты со стальной ватой на стенках канала. На рисунке 42 показаны осциллограммы давления под металлической ватой в четырех положениях датчиков давления. Показания регистрируют детонационный распад, за которым следует фронт пламени, и регистрируют уменьшение интенсивности ударной волны от 1.4 МПа в положении 60 мм до 0.3 МПа в положении 160 мм. Временной интервал между фронтом ударной волны и фронтом пламени увеличивается с расстоянием от входа в пористую секцию от 30 мкс в положении 60 мм до 110 мкс в положении 360 мм.

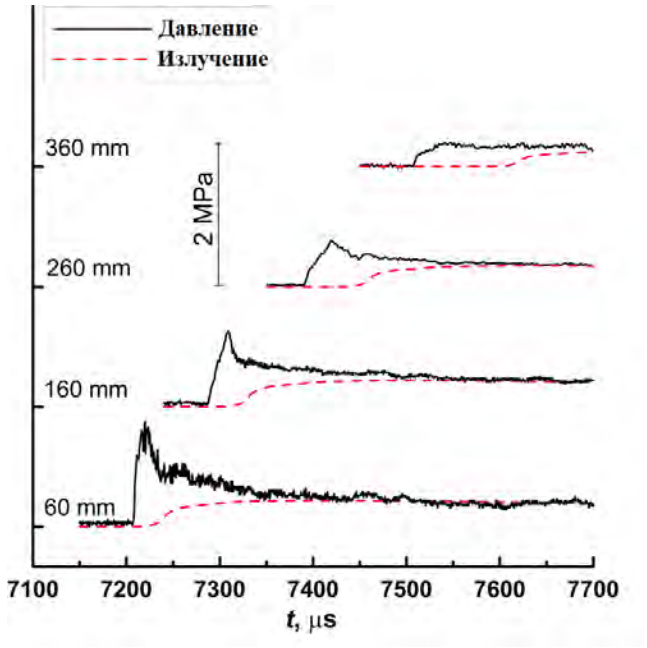


Рисунок 42 – Показания датчиков давления и фотодиодов в канале со стальной ватой (для четырех позиций.№3-6).

Теневой снимок ударной волны и фронта пламени в канале с стальной ватой показаны на рисунке 43. В этом случае камера регистрирует кривизну ударной волны. Однако фронт пламени искривлен по сравнению с рисунком 39 для ППУ. Это может быть связано с более высокой степенью пористости и, следовательно, с тем, что поток горящего горячего газа сохраняет продольное движение, а не поперечное. Наличие пустого пространства между волокнами металлической ваты приводит к боковому смещению сжатого газа. Это приводит к соответствующему искажению фронта ударной волны и уменьшению интенсивности. На рисунке 43с качественно представлено распределение давления на боковой поверхности в момент, когда ударная волна проходит датчик давления №4. В этом случае вторичное увеличение давления во время прохождения фронта пламени не регистрируется.

Более того, как показано в [84], значительная часть тепловой энергии передается на нагрев металлических волокон. Потери тепла могут достигать 44%. Было показано, что длительность полного нагрева волокон составляет около 10 мкс. Последнее также приводит к тому, что скорость фронта пламени замедляется, а интенсивность волн уменьшается.

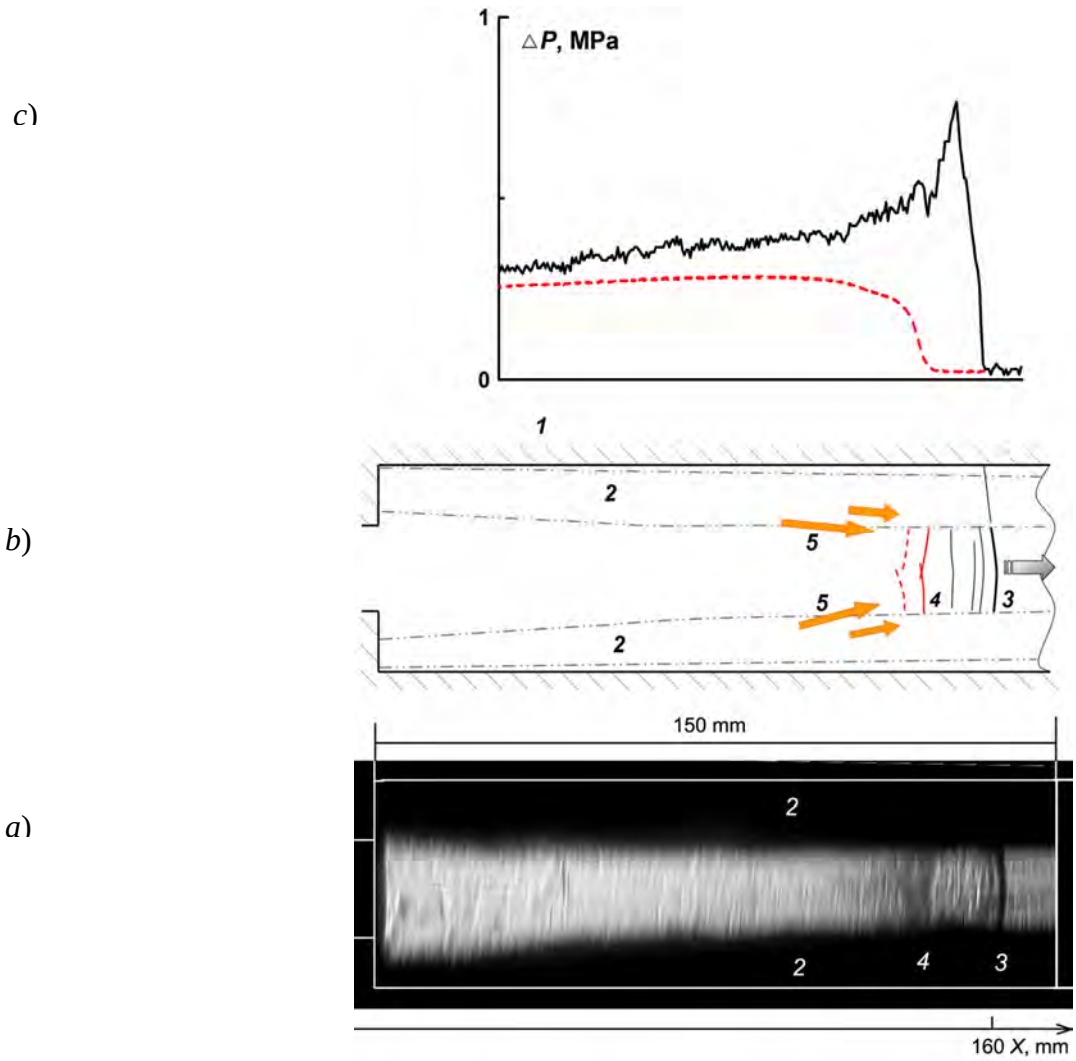


Рисунок 43 – Теневой снимок (a), схематическое изображение (b) и амплитуда давления (c) ударной волны, фронта пламени и продуктов сгорания в прямоугольном канале со стальной ватой. 1: прямоугольный канал; 2: стальная вата; 3: ударная волна; 4: фронт пламени; 5: направление движения продуктов горения.

3.2.3 Сравнение эффекта различных пористых материалов на детонационную волну

Чтобы сравнить влияние различных пористых покрытий при приложении волны детонации к боковой поверхности канала, на рисунке 44 приведены осциллограммы давления в четырех положениях для четырех типов материалов. Здесь во всех положениях начальные значения соответствуют тому же начальному давлению 0.1 МПа для каждого материала.

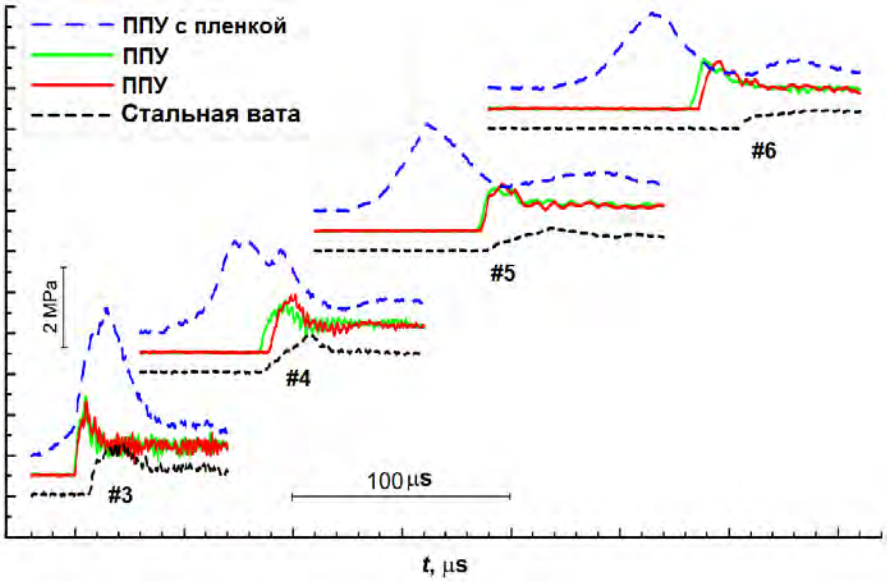


Рисунок 44 – Показания датчиков давления в канале с ППУ, ППУ, покрытым пленкой и стальной ватой на стенке для четырех позиций.

Во-первых, легко видеть, что наименьшая скорость ударной волны регистрируется при использовании стальной ваты. Средняя скорость уменьшается от 1300 м/с между датчиками № 3 и № 4 до значения 860 м/с между датчиками № 5 и № 6. В среднем скорость волны падает на 30-35%. Такое значительное снижение скорости с довольно высокой пористостью 99% может быть вызвано потерями энергии на металлических волокнах, как было упомянуто выше.

Относительное изменение средней скорости волны под пенополиуретаном претерпевает самые незначительные изменения и составляет около 10-12%. На рисунке 40 скорость падает с 1180 м/с до 1050 м/с. Это значение сопоставимо со скоростью звука Чепмена-Жуге 1092 м/с для стехиометрической водородно-воздушной смеси [78]. И, как было показано в главе 2, после прохождения пористого участка возможно восстановление детонации.

Наибольшая скорость ударной волны характерна для пористого покрытия, покрытого пленкой. Среднее значение волны между датчиками № 3 и № 4 составляет 1430 м/с. Между датчиками № 5 и № 6 средняя скорость волны уменьшается до значения 1050 м/с. Анализируя все эксперименты, среднее относительное падение скорости достигает 25-30%. Такая высокая скорость относительно ППУ с открытыми порами может быть вызвана отсутствием трения и

торможения потока сжатого газа на границе плёнки, как было упомянуто выше. Эта скорость ударной волны также может быть достаточной для восстановления детонации.

Во-вторых, из рисунка 44 видно, что наименьшая амплитуда давления регистрируется при использовании стальной ваты. Среднее значение давления на датчике № 3 составляет 1.4 МПа. Затем давление монотонно уменьшается до 0.3 МПа на датчике № 6. Относительное изменение давления составляет ~ 50% для всех экспериментов.

Относительное изменение амплитуды давления под ППУ претерпевает самые незначительные изменения и составляет около 40%. Давление монотонно уменьшается от 2.0 МПа до 1.2 МПа. Как следует из данных главы 2, это значение может быть достаточным для восстановления детонации после прохождения через пористую секцию.

Наибольшая амплитуда давления ударной волны, воздействующая на боковую поверхность канала, характерна для пористого покрытия с пленкой. Среднее значение давления на датчике № 3 составляет 4.2 МПа. Затем давление монотонно уменьшается до 2.2 МПа на датчике № 6. Относительное изменение давления составляет ~ 50% для всех экспериментов.

Наряду с амплитудой ударной волны значение, называемое импульсом давления J, имеет важное значение при оценке безопасности объектов. Эта характеристика является интегралом падения давления ΔP (t) в течение всей продолжительности действия τ:

$$J = \int_0^{\tau} \Delta P dt \qquad (2)$$

Говоря о продольном воздействии детонации или ударной волны, необходимо определить интервал действия этой волны. Ввиду того, что длительность действия продуктов сгорания внутри пористого канала до момента полного оттока продуктов сгорания и время установления равновесного состояния может принимать довольно большие числовые значения, необходимо определить эффективный период действия

детонации/ударной волны. Очевидно, что этот период не должен превышать время разряда электрического заряда из пьезоэлектрических датчиков давления.

Однако для определения эффективности покрытия определение полного импульса давления не нужно. Достаточно отметить на рисунке 44, что, независимо от типа покрытия, давления принимают практически одинаковое значение через 80-100 мкс. Еще один перепад давления происходит для всех типов поверхностей таким же образом, включая канал с жесткими стенками без пористого покрытия. Таким образом, для оценки эффективности покрытия достаточно определить разность импульсов давления относительно давления, создаваемого устойчивой детонацией Чепмена-Жуге в канале с твердыми стенками:

$$\Delta J = \int_0^{\tau^*} \left(\Delta P_{por.} - \Delta P_{sol.}\right) dt = \int_0^{\tau^*} \left(P_{por.} - P_{sol.}\right) dt \,, \qquad (3)$$

где τ * - временной интервал, который может принимать любые значения, превышающие 100 мкс. В этой работе использовались три временных интервала: 100 мкс, 200 мкс и 300 мкс. Полученные данные были усреднены, и была определена ошибка. Полученные данные, а также данные об амплитуде эффекта представлены в виде диаграмм на рисунке 45 для устойчивой детонации (ΔJ = 0) и для четырех типов покрытия в четырех последовательных положениях (60 мм, 160 мм , 260 мм и 360 мм).

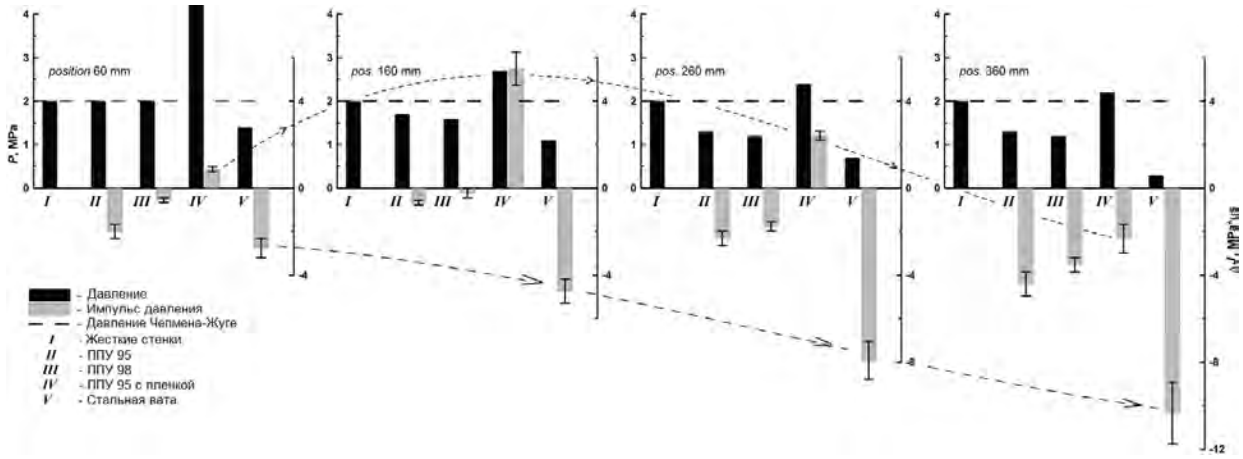


Рисунок 45 – Давление и импульсы давления в четырех позициях для различных типов покрытия на стенке: I, жесткая стенка; II, ППУ с пористостью 95; III, ППУ с пористостью 98; IV, ППУ с пористостью 95, покрытый пленкой; V, стальная вата.

Отрицательное значение ΔJ указывает на уменьшение импульса давления. Отрицательные значения характерны для пористых поверхностей с открытыми порами, включая стальную вату. 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 уменьшается на 0.7-2.0 Па*с в положении 60 мм, а в конце секции 360 мм уменьшается на 3.5-4.3 Па*с. В то же время максимальное снижение регистрируется для стальной ваты. Эта разница сначала достигает 2.7 Па*с в положении 60 мм, а затем значительно увеличивается до значения 10.2 Па*с.

Положительное значение ΔJ указывает на увеличение импульса давления, создаваемого ударной волной/детонацией при использовании ППУ, покрытого пленкой. В то же время максимальное увеличение импульса давления 5.3 Па*с регистрируется не в начале канала (60 мм), а на расстоянии 160 мм. После этого импульс давления уменьшается, и на расстоянии 360 мм указанная разница принимает отрицательное значение 2.2 Па*с.

3.2.4 Динамика фронта пламени

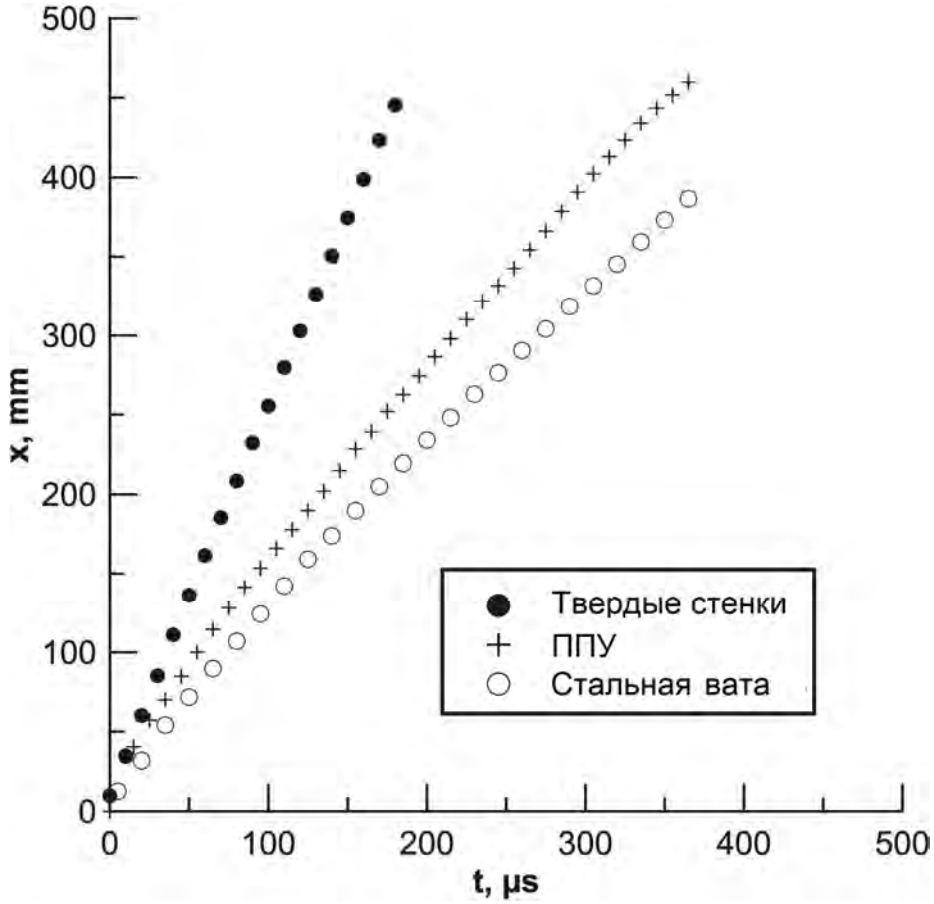


Рисунок 46 – Пространственно-временная развертка торможения фронта пламени вдоль оси канала и траектория фронта пламени в твёрдом канале. ППУ и стальная вата в качестве пористого материала, ER = 1.5.

Чтобы определить динамику фронта пламени, стрик-изображения были получены с помощью высокоскоростной камеры «Видеоспринт».

На рисунке 46 показаны пространственно-временные развертки динамики фронта пламени. ER смеси составляла 1.5. Траектория фронта детонации для жестких стенок является прямой линией. На рисунке 47 показаны стрик-изображения торможения фронта пламени вдоль оси канала с использованием ППУ и стальной ваты.

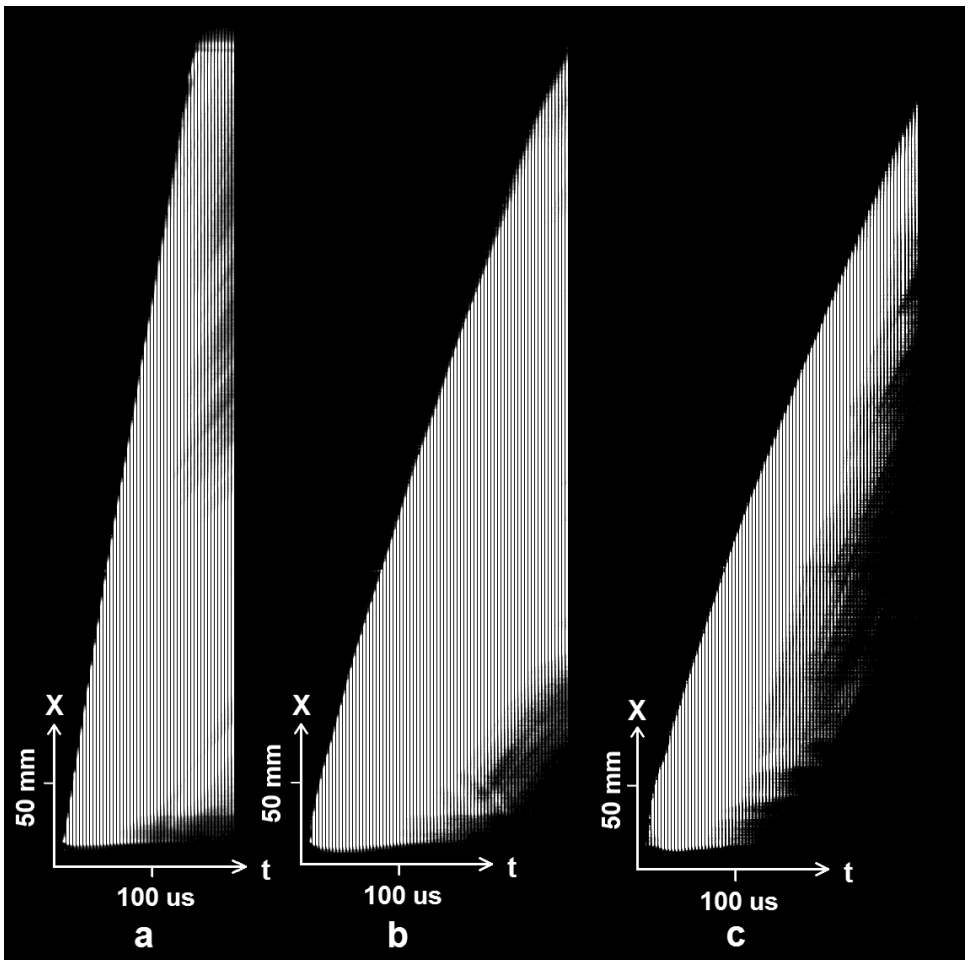


Рисунок 47 – Стрик изображения движения фронта пламени и продуктов детонации вдоль оси канала для ER=1.5: a – канал с твёрдыми стенками; b – канал с ППУ на стенке, c –канал со стальной ватой на стенке.

На рис. 48 показаны скорости фронта пламени вдоль оси канала на основе стрик-изображений. Данные представлены для трех смесей: ER = 0.8, ER = 1.0 и ER = 1.5. Использовался канал с ППУ и покрытием из стальной ваты. Результаты показали, что торможение фронта пламени начинается сразу в начале пористой секции. Падение скорости фронта пламени происходит на расстоянии около 3 диаметров трубки. Резкое падение скорости фронта детонационного пламени внутри пористого канала регистрируется на расстоянии нескольких диаметров трубы и определяется отношением скорости стационарной детонационной волны $D_{C\text{-}J}$ к скорости распространения поперечной волны. Скорость распространения поперечной волны приблизительно равна скорости звука $a_{C\text{-}J}$ сразу за фронтом детонации. Длина распада волны детонации соответствует одному отражению

поперечной волны и пропорциональна диаметру канала d. После резкого падения скорость пламени падает до скорости звука Чепмена-Жуге из-за потерь в пористом слое. Это падение можно объяснить исчезновением поперечных волн и самой детонации. Следующее снижение скорости пламени вдоль канала может быть объяснено потерями тепла и трением в пористом материале. Окончательная скорость фронта пламени была равна 1000 м/с для стехиометрической смеси и 750 м/с для ER = 0.8 и 1.5 при использовании ППУ. Конечная скорость фронта пламени равнялась 750 м/с для ER 1 и 1.5 и 1000 м/с для ER = 0.8 при использовании стальной ваты. Скорости фронта пламени менялись нерегулярно. Это можно объяснить тем, что распространение пламени определяется главным образом турбулентностью, вызванной пористым материалом.

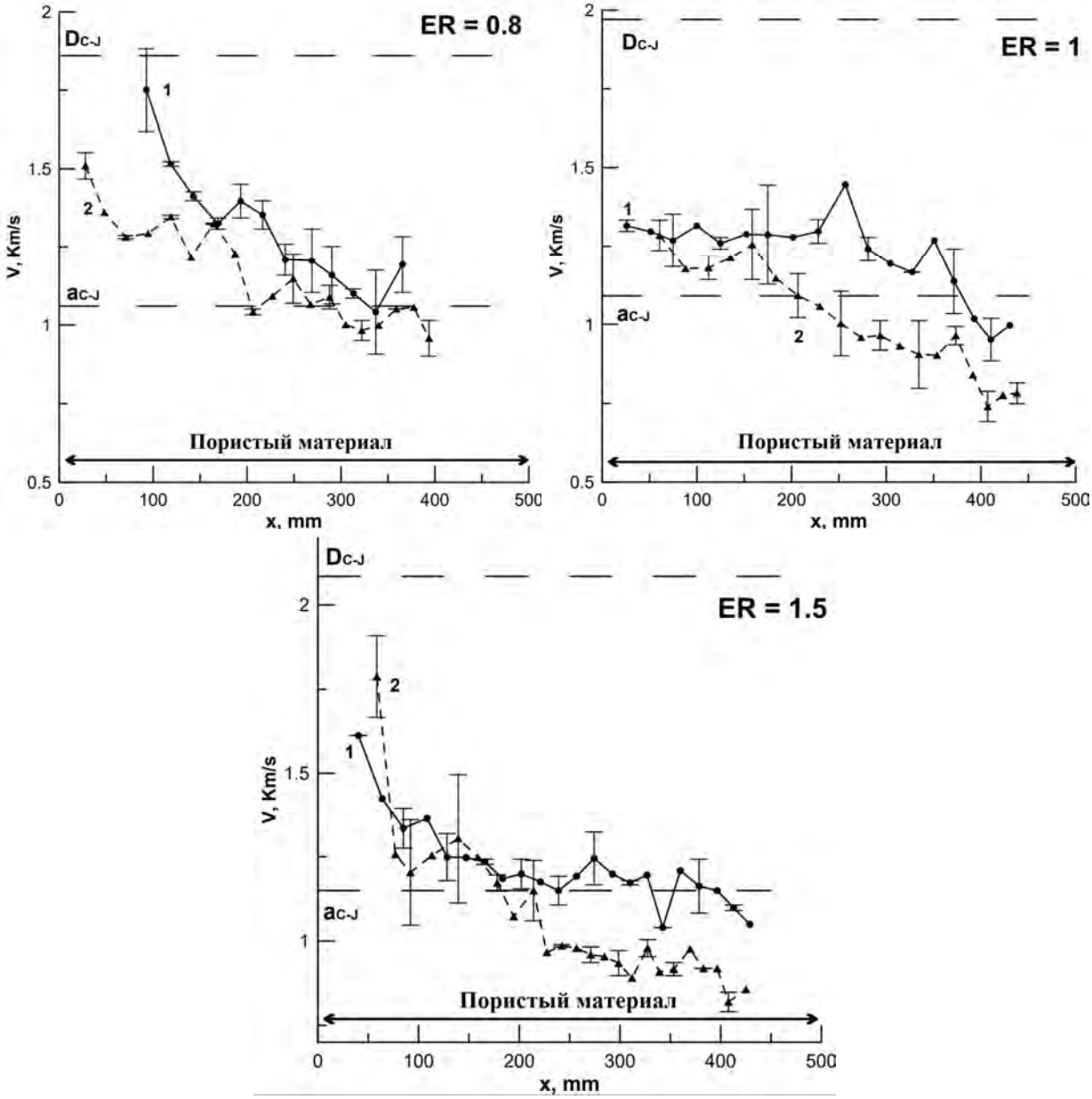


Рисунок 48 – Эволюция скорости фронта пламени вдоль канала с пористым покрытием для трёх составов смеси: 1 – ППУ, 2 – стальная вата, $D_{C\text{-}J}$ – скорость детонации Чепмена-Жуге, $a_{C\text{-}J}$ – акустическая скорость Чепмена-Жуге.

На основе данных рисунка 32 был рассчитан поток газа за ударной волной (u_1) с использованием классических уравнений ударной волны (уравнение 4). Числа Маха были рассчитаны между местоположениями датчиков давления. Данные представлены в таблице 6. Схема распространения ударной волны и фронта пламени показана на рисунке 49. Скорость потока за ударной волной определяется в следующем виде:

$$u_1 = \frac{(2a_0(M - \frac{1}{M}))}{\gamma + 1} \quad (4)$$

где a_0 - скорость звука в начальных условиях, M - число Маха ударной волны, γ – показатель адиабаты для горючей смеси.

Таблица 6 – Скорость потока за ударной волной (u_1), рассчитанная по числу Маха на рисунке 32 на разных расстояниях от начала пористого канала.

X, мм	u_1 в ППУ, м/с	u_1 в стальной вате, м/с
110	980	860
210	800	700
310	700	620

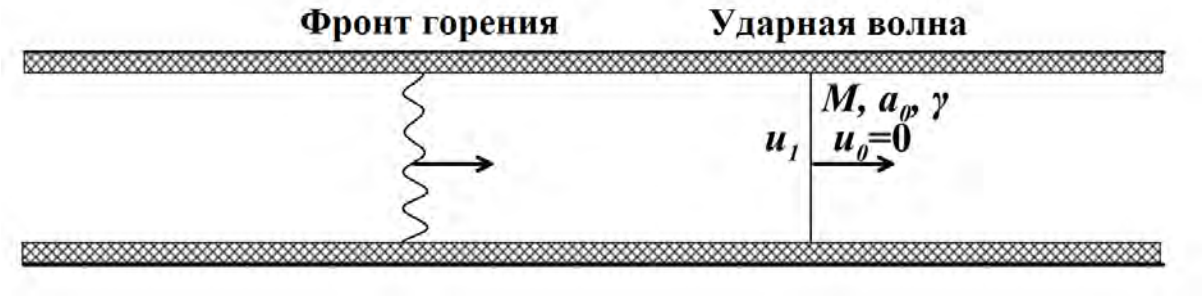


Рисунок 49 – Схема распространения ударной волны и фронта пламени после распада детонации.

Сравнивая эти числа со скоростью пламени, можно видеть, что скорость пламени примерно на 300 м/с выше, чем скорость потока за ударной волной. Это значение слишком велико для скорости ламинарного пламени, что означает, что горение за ударной волной распространяется турбулентным образом. Модель дефлаграции Чепмена-Жуге [85] здесь не может быть применена, поскольку продукты горения в нашем эксперименте не являются стационарными. Их траектории можно увидеть на стрик изображениях (рисунок 47).

3.2.5 Влияние размера пор на характер распространения и параметры детонации

На рисунках 50 и 51 показаны осциллограммы показаний давления детонации в канале с пористыми материалами на стенке, число пор на дюйм составляет соответственно 10 и 80. Можно видеть, что при использовании покрытия с небольшим размером пор (PPI = 80) давление ударной волны составляет 1.1 МПа на первом датчике, расположенном на расстоянии 60 мм (3 ширины канала) от начала пористой секции и затем опускается до 0.6 МПа. Профиль волны представляет собой профиль плоской ударной волны уже на втором датчике. При использовании ППУ с большим размером пор (PPI = 10) давление на первом датчике составляет 1.4 МПа, затем оно падает до 1 МПа на втором датчике давления и увеличивается до 1.3 МПа на последнем. Это указывает на то, что при использовании этого покрытия происходит повторное возникновение детонации.

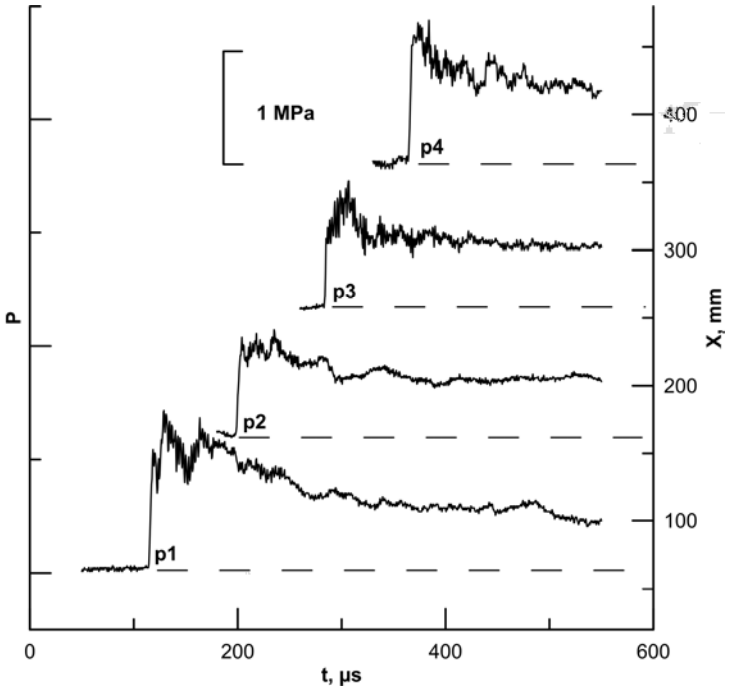


Рисунок 50 – Эволюция давления ударной волны при движении детонации вдоль канала с ППУ с PPI = 10 на стенке. Водородно-воздушная смесь, ER = 1.

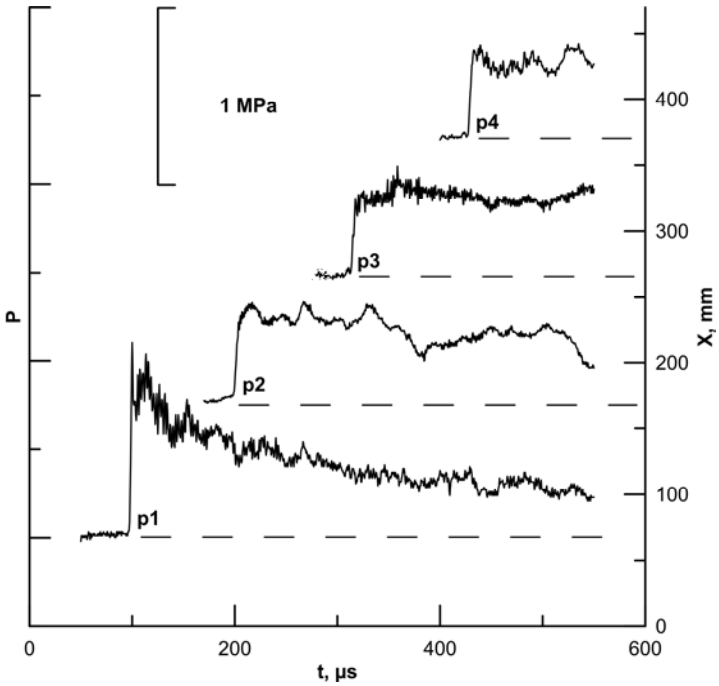
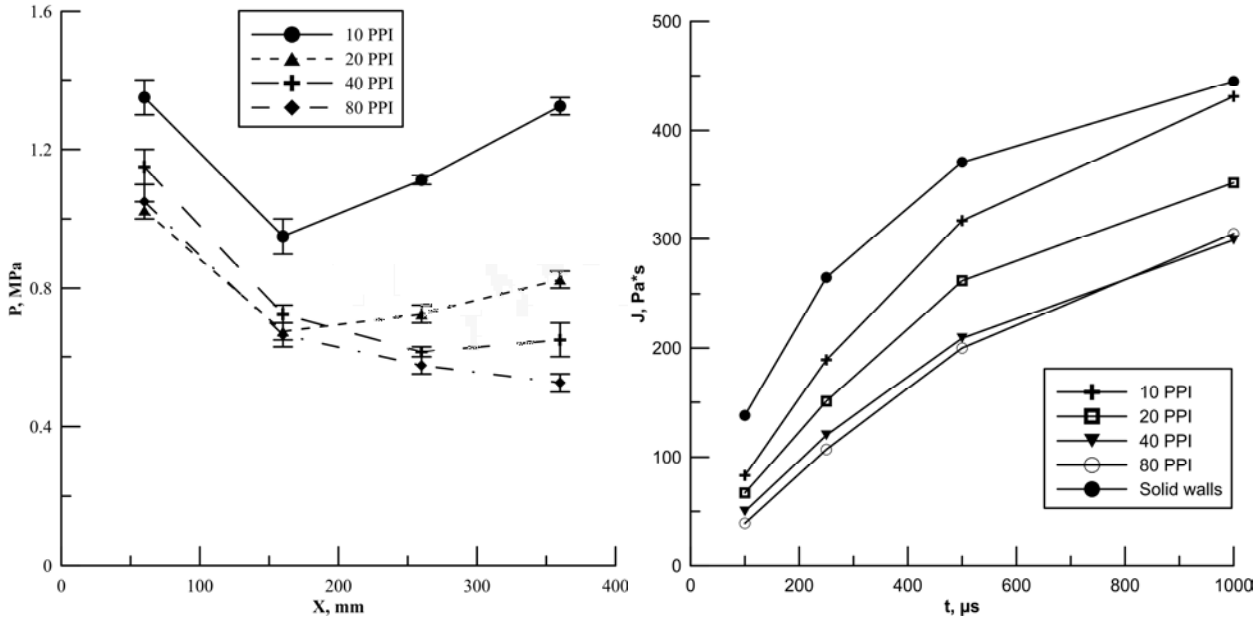


Рисунок 51 – Эволюция давления ударной волны при движении детонации вдоль канала с ППУ с PPI = 80 на стенке. Водородно-воздушная смесь, ER = 1.

Эволюция показаний датчиков давления для пористых материалов с разными размерами пор показана на рисунке 52а. Давление на первом датчике находилось в диапазоне 1-1.4 МПа для всех пористых материалов с самым высоким давлением в пористом материале с большими порами. Конечное давление имеет прямую зависимость от размера пор: самое низкое давление наблюдалось при использовании ППУ с PPI = 40 и PPI = 80 (около 0.6 МПа), наибольший при использовании ППУ с PPI = 10 (1.3 МПа). Важно отметить, что в случае ППУ с PPI = 40 и PPI = 80 наблюдался монотонный спад давления, в то время как в более крупных типах ППУ минимальное давление наблюдалось на расстоянии 160 мм начала пористого участка, за которым следует увеличение давления.



a b

Рисунок 52 – Эволюция давления (a) и импульса давления (b) ударной волны при распространении вдоль пористого материала с различным количеством PPI. Водородно-воздушная смесь, ER = 1.

Эволюция скорости ударной волны показана на рисунке 53. Аналогично зависимости давления от размера пор, максимальная скорость волны наблюдалась в ППУ с PPI = 10. Начальная скорость составляла 1150 м/с, конечная скорость составила 1250 м/с. По мере уменьшения размера пор скорость распространения волны также уменьшается: для ППУ с PPI = 80 конечная скорость составляет 900 м/с, что меньше половины скорости детонации Чепмена-Жуге (1950 м/с). Аналогично амплитуде ударной волны, в случае ППУ с PPI = 10 и 20 наблюдается увеличение скорости распространения волны после начального снижения. В ППУ с PPI = 40 и 80 скорость ударной волны монотонно уменьшается. В пористом материале с 80 порами на дюйм на последнем датчике наблюдается небольшое снижение давления, но скорость волны увеличивается. Средние значения скорости волны были рассчитаны между датчиками давления, поэтому значения давления и скорости приведены для разных координат вдоль длины: даны показания давления для местоположения датчиков, а показания скорости расположены между датчиками. Рост скорости волны в ППУ с наименьшими порами меньше

погрешности измерения. Принимая во внимание тот факт, что распад волны детонации является нестационарным процессом, возможны такие колебания скорости и давления.

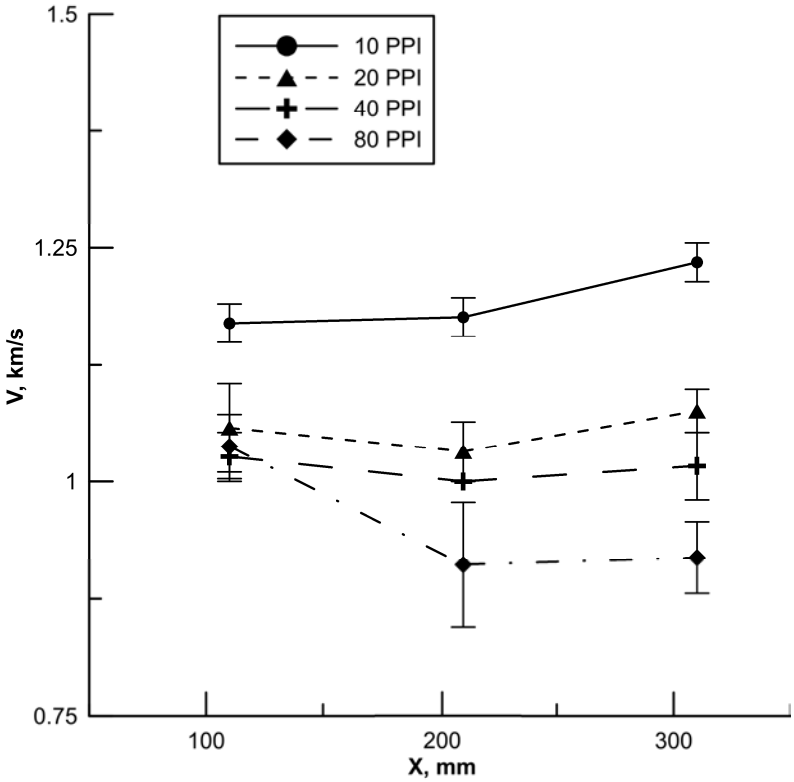


Рисунок 53 – Эволюция скорости волны ударной волны при распространении вдоль пористого материала с различным количеством PPI. Водородно-воздушная смесь, ER = 1.

Так как одним из основных механизмов распада детонационной волны является исчезновение поперечных волн из-за их ослабления в пористом материале, в случае использования пористого материала с большими порами поперечные волны проходят через пористый материал с малой долей затухания и отражаются от твердой стенки, что позволяет повторно инициировать детонационную волну.

Оценка толщины пористого слоя может быть проведена следующим образом: 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 количеством пор на дюйм 20 и 40 это расстояние составляет 5 и 2.5 мм, соответственно [81]. Для ППУ с количеством пор на дюйм 80 это расстояние меньше 1 мм, для ППУ с 10 порами на дюйм это расстояние более 10

мм, что соответствует толщине пористого материала в этом эксперименте. Это позволяет поперечным волнам проходить через пористый материал без затухания, отражаться от жесткой стенки и влиять на распространение фронта детонации. В пористом материале с наименьшими порами поперечные волны испытывают затухание и тем самым замедляются и ослабевают. Ослабленная отраженная волна покидает пористый материал с задержкой и больше не может поддерживать детонацию.

На рисунке 52b показаны значения импульса давления на первом датчике давления для длительности импульса 100 мкс, 250 мкс, 500 мкс и 1000 мкс. Видно, что импульс давления монотонно убывает с уменьшением размера пор в пористом материале.

Падение скорости и давления на расстоянии от 60 до 160 мм объясняется процессом вхождения детонационной волны в сечение с пористым покрытием. Когда детонационная волна входит в пористую секцию, поперечные волны движутся на большее расстояние до жесткой стенки и не влияют на горения в начальный момент. При дальнейшем распространении волны вдоль пористой секции с большими порами (PPI = 10-20) отраженные поперечные волны возвращаются в зону реакции, поэтому видно увеличение давления и скорости.

3.3 Выводы

При использовании водорода в качестве топлива необходимо учитывать его способность гореть в ограниченном объеме в режиме детонации с образованием интенсивных ударных волн. Такие волны могут быть ослаблены, а сама детонация может быть подавлена использованием пористых материалов, которые могут быть нанесены на внутренние поверхности химического реактора. Экспериментально исследован распад детонации в пористом канале. Сравнивались два типа пористых материалов: пенополиуретан (ППУ) и стальная вата. Распад детонационной волны на ударную волну и фронт пламени наблюдался в пористой секции детонационной трубки для двух материалов. Пик давления на конце пористой секции на расстоянии 360 мм со стальной ватой и ППУ были в 6 и 4 раза ниже, чем в канале с твердыми стенками. Скорость пламени упала ниже скорости звука Чепмена-Жуге в двух

случаях и была на 25% ниже в случае стальной ваты. Наблюдалось немонотонное влияние параметров пористого покрытия на эволюцию волны детонации в канале. Когда используется пористый материал с большими порами (PPI = 10 и 20), сначала давление и скорость волны уменьшаются, после чего давление и скорость волны возрастают на расстоянии более 300 мм от начала пористой секции. Когда волна распространяется в ППУ с малыми порами (PPI = 40 и 80), наблюдается монотонное снижение давления. Конечное давление в ППУ с PPI = 10 в два раза выше, чем в ППУ с PPI = 80, а конечная скорость на 40% выше.

Глава 4. Режимы распространения детонации в канале субкритического диаметра.

В данной главе были исследованы нестационарные формы распространения детонации и горения в ацетилено-воздушных смесях в канале с поперечным размером сравнимым с шириной детонационной ячейки. Определены условия, при которых возникал распад и повторное инициирование детонации, а также затухающие осциллирующие формы распространения фронта пламени. Горение изучалось экспериментально с использованием оптических методов диагностики. Получены пространственно-временные развертки и теневые фотографии распространения горения и ударных волн.

Целью данной главы было определение параметров распространения пламени и критериев распада детонации в смеси ацетилен-воздух, а также галопирующего распространения детонации.

4.1 Экспериментальная установка

Эксперименты проводились с использованием двух детонационных каналов квадратного сечения. Поперечные размеры каналов были 3×3 мм и 5×5 мм, длина каналов составляла 1200 мм. Они были соединен с детонационной трубкой диаметра 20 мм и длиной 3000 мм (рисунок 54). Второй конец узкого канала был открыт в атмосферу, 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.

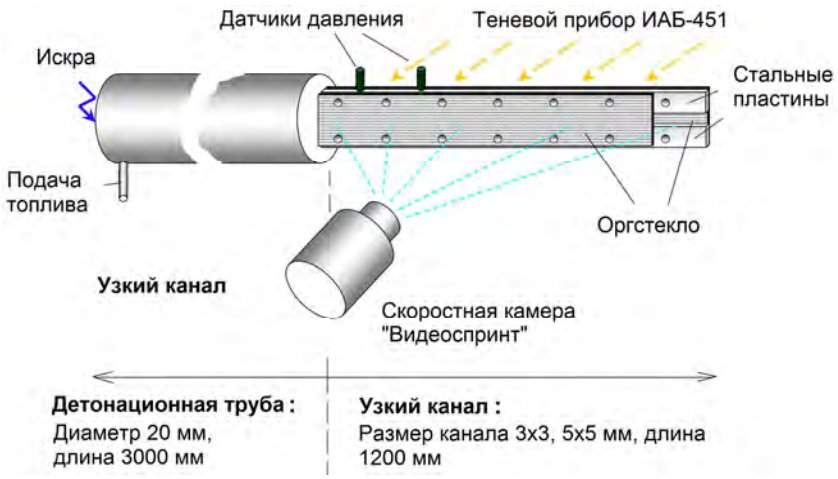


Рисунок 54 – Схема экспериментальной установки.

Смесь ацетилен-воздух подавалась с закрытого конца детонационной трубки, которая ранее откачивалась вакуумным насосом. Через 3 секунды после наполнения смесь воспламеняли. Зажигание проводилось искровым разрядом на закрытом конце трубки. Стационарная детонация Чепмена-Жуге была зарегистрирована до входа в прямоугольный канал пьезоэлектрическим датчиком давления.

Смесь ацетилен-воздух позволяет проводить эксперименты в довольно узком канале с достаточной яркостью в видимом диапазоне. С помощью высокоскоростной камеры «Видеоспринт» были получены пространственно-временные развертки распространения детонационной волны и фронта пламени (стрик изображения) и снимки зоны реакции. Параметры съемки для пространственно-временных разверток: кадровая частота 170000 кадров в секунду, экспозиция 1 мкс, разрешение 1280*3 пикселя. Параметры съемки зоны реакции: 27800-28100 кадров в секунду, экспозиция 1 мкс, разрешение 1280*100 пикселей. Для детального изучения структуры фронта пламени использовался теневой прибор ИАБ-451.

4.2 Экспериментальные результаты

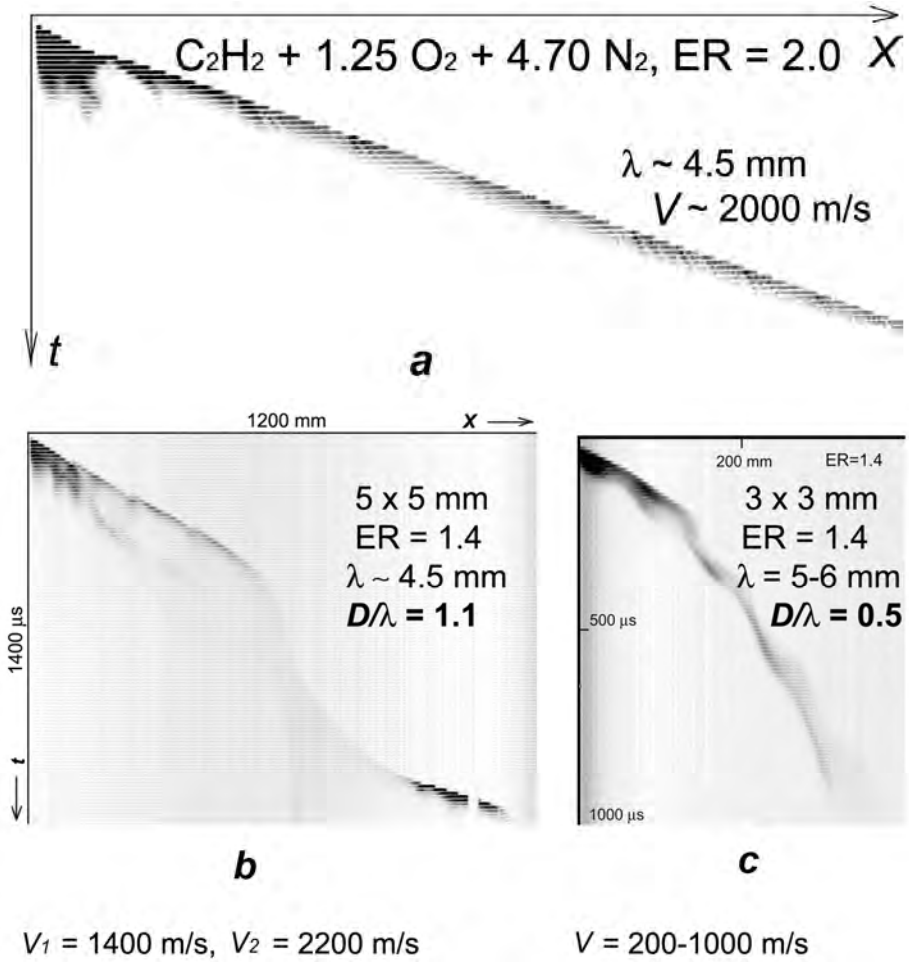


Рисунок 55 – Пространственно-временные развертки распространения детонационной волны в канале 5×5 мм (a,b) и 3×3 мм (c). Негатив.

Изменяя соотношение между ацетиленом и воздухом (O_2 + 3.76 N_2) в диапазоне ER 0.9-2.0, были зафиксированы несколько форм распространения горения при переходе детонационной волны из канала диаметром 20 мм в узкий канал размером 5×5 или 3×3 мм. На рисунке 55 представлены характерные временные развертки тех процессов, которые были обнаружены в узком канале:

а. устойчивая детонация (рисунок 55a). Данные представлены для ER = 2.0 и ER = 1.6 в канале 5×5 мм. На рисунке 55 показана развертка распространения детонации для смесей ацетилен-воздух для ER = 2.0.

б. распад детонации с последующим восстановлением (рисунок 50b). Данные представлены для ER = 1.4 в канале 5×5 мм.

в. затухающее колебательное горение (рисунок 50с). Данные также представлены для ER = 1.4 в канале 3×3 мм.

Как и следовало ожидать, изменяя состав смеси, можно получить несколько форм распространения горения в канале. Изменение состава приводит к изменению тепловыделения в процессах горения, к изменению скорости звука, плотности. Связанные с этими параметрами газодинамические процессы происходят с тем или иным количеством тепла, уходящим на боковые стенки канала. Далее подробно рассмотрены основные параметры, характерные для указанных процессов.

4.2.1 Устойчивая детонация

Представленная на рисунке 55а пространственно-временная развертка траектории фронта пламени характерна для стационарного детонационного горения. Данная траектория представляет собой прямые линии, что подтверждает постоянство скорости. Скорость распространения пламени равнялась около 2000 м/с, что соответствует скорости детонации Чепмена-Жуге [7].

На рисунке 56 показана серия мгновенных снимков распространения волны детонации в канале с поперечным размером 5×5 мм. Эти снимки были получены для смеси ацетилен-воздух с ER = 1.4. Скорость распространения фронта этой волны остается неизменной и соответствует скорости распространения детонации в широком канале ~ 2000 м/с. На рисунке видно, что фронт свечения имеет практически плоскую форму, и наиболее интенсивное свечение наблюдается на передней кромке.

Анализируя данные в работах [74], возможно оценить ширину детонационной ячейки ацетилено-воздушных смесей: для смеси с ER = 2.0 ширина равна 5.0 мм, а для ER = 1.6 эта ширина равна 4.5 мм.

Таким образом, условие распространения стационарной детонации можно представить в виде $D/\lambda \geq 1.0\text{-}1.1$, где D - поперечный размер узкого канала, λ – ширина детонационной ячейки. Изменяя состав смеси и, соответственно, ширину детонационной ячейки, было установлено, что это значение является предельным значением, при котором распространение детонации носит стационарный характер в канале с сечением 5×5 мм. По этой причине распространение стационарной

детонации в канале с поперечным размером 3×3 мм в смеси ацетилен-воздух не регистрировалось.

Суммируя результаты, полученные в обоих каналах, можно предположить, что в этой геометрической постановке задачи условие распространения стационарной детонации в узком канале выражает отношение $D/\lambda \geq 1.1$.

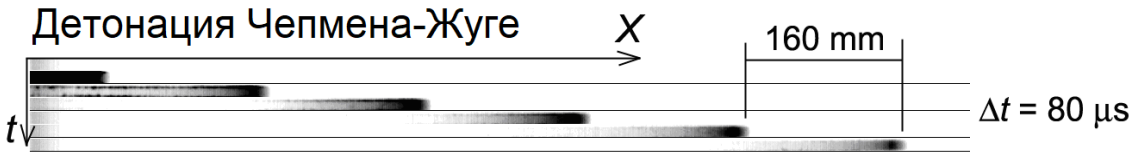


Рисунок 56 – Последовательные снимки распространения детонационной волны в канале 5×5 мм, ацетилен-воздух с ER = 1.4 .

4.2.2 Распад и повторное возникновение

Представленная на рисунке 57 пространственно-временная развертка для смеси с ER = 1.4 характерна для галопирующей детонации. Для такой смеси ширина детонационной ячейки будет близка к значению 4.5 мм. В данном случае отношение D/λ примерно равно 1.1 в канале 5×5 мм, т.е. граничное значение. Таким образом, в том случае, если детонация распадется при переходе в узкий канал, она еще может восстановиться, так как условие для восстановления детонации соблюдается.

На рисунке 57 так же показаны фотографии, сделанные с использованием теневого метода. Теневые снимки подтверждают начало детонации на расстоянии около 1000 мм от начала узкого канала. Это соответствует приблизительно 200 поперечным размерам канала. Таким образом, увеличивая длину узкого канала, есть основания полагать, что можно добиться повторного распада образующейся таким образом детонационной волны и ее последующего распада.

На рисунке 58 показана эволюция скорости фронта пламени для двух смесей ацетилена с воздухом: ER = 1.4 ($D/\lambda = 1.1$) и ER = 1.6 ($D/\lambda = 0.9$). В смеси с ER = 1.4 повторное инициирование детонации регистрировалось на расстоянии 1000 мм от начала канала, тогда как для смеси с ER = 1.6 максимальная скорость фронта пламени не превышала 1500 м/с, что значительно ниже, чем скорость детонации Чепмена-Жуге. Период повторного инициирования составлял около 1000 мкс.

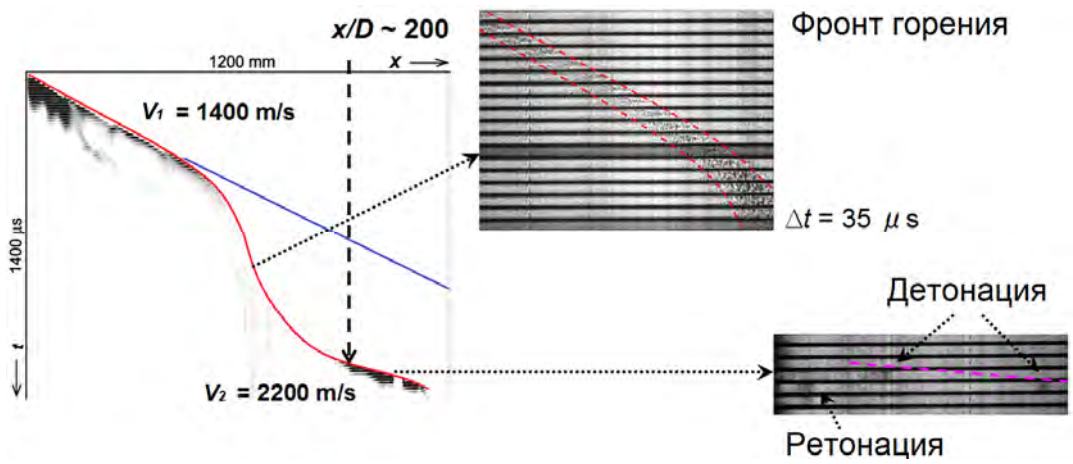


Рисунок 57 – Пространственно-временная развертка (слева) и теневые снимки (справа) распада детонационной волны с последующим повторным возникновением.

Период галопирующей детонации в данном случае составляет около 200 поперечных размеров канала. В литературных источниках период галопирующей детонации составляет от 150 до 600 поперечных размеров канала, среднее значение составляет около 300 [86]. Однако в предыдущих работах минимальная скорость в галопирующем режиме составляла около 0.4 от скорости детонации Чепмена-Жуге, в то время как в данной работе скорость фронта горения составила около 100 м/с или 0.05 от скорости детонации Чепмена-Жуге.

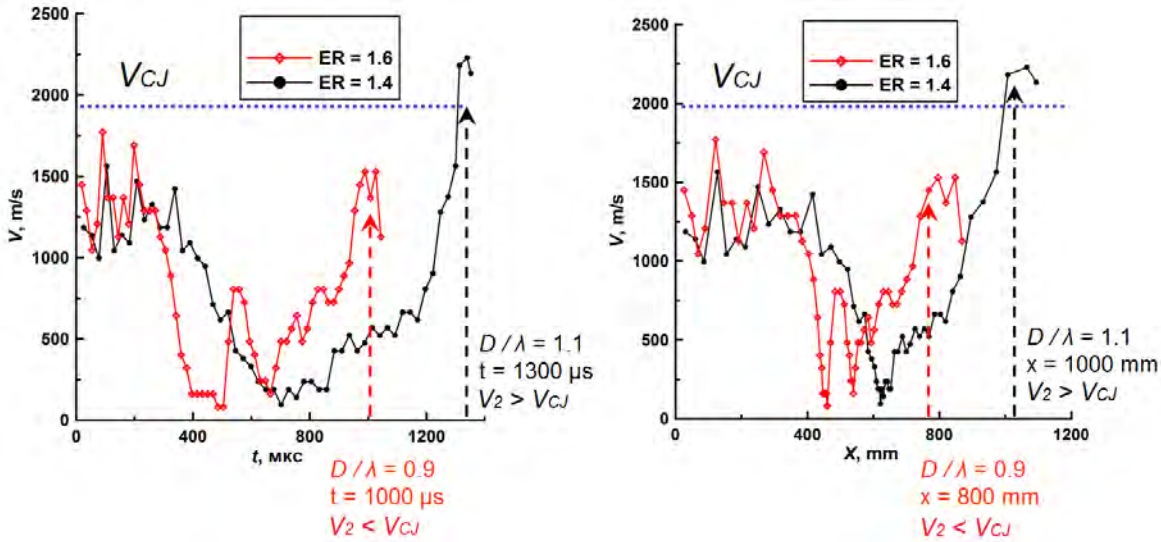


Рисунок 58 – Эволюция скорости фронта пламени от времени (слева) и от расстояния от начала узкого канала (справа) для двух смесей:ER=1.4 (D/λ = 1) и ER=1.6 (D/λ = 0.9). Канал шириной 5 мм.

4.2.3 Режим осциллирующего затухающего пламени

На рисунке 59 показаны теневые кадры распространения затухающего фронта осциллирующего пламени. Кадры объединены в диаграмму, показывающую образование ударных волн.

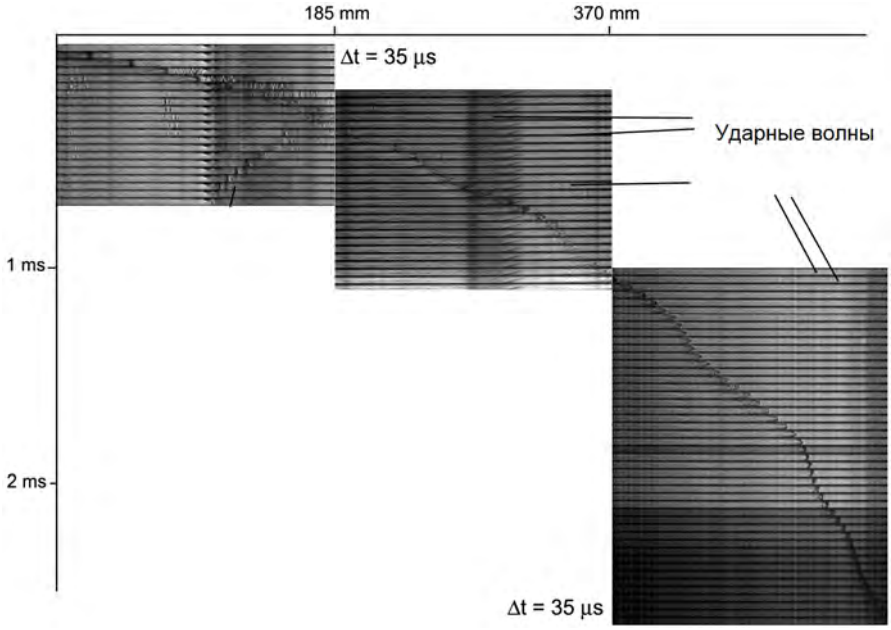


Рисунок 59 – Теневые снимки распространения пламени в осциллирующем затухающем режиме.

На рисунке 55с представлена траектория фронта пламени, средняя скорость движения которого снижается, однако это затухание происходит в осциллирующем режиме. Такое распространение регистрировалось для двух каналов сечением 3×3 мм и 5×5 мм.

Для D/λ = 0.5-1.0 в канале 5×5 мм и для D/λ = 0.5-0.6 в канале 3×3 мм было зарегистрировано осциллирующее затухающее горение. В этом случае значение D/λ = 0.6 является максимально допустимым значением для канала 3×3 мм.

На рисунке 59 показаны теневые кадры распространения затухающего фронта осциллирующего пламени. Снимки объединены в развертку, показывающую циклическое образование точек воспламенения.

На начальном этапе фронт пламени имеет плоскую структуру. Через 100 мкс после входа детонационной волны в канал фронт пламени претерпевает изменения. В связи с тем, что размер поперечного канала не превышает размер детонационной

ячейки смеси ацетилен-воздух (4-5 мм) [28], дальнейшее распространение детонационного горения невозможно. Наличие тепловых потерь приводит к тому, что фронт пламени удлиняется вдоль оси, что наблюдалось при прямом оптическом наблюдении.

После 300 мкс регистрируется ускорение фронта пламени, что может быть вызвано увеличением зоны реакции после замедления фронта горения. В момент ускорения фронта пламени в соответствии с газодинамическим разрывом образуются две ударные волны. Одна из этих волн направлена вдоль движения фронта пламени, а другая направлена в противоположном направлении (волна ретонации).

Дальнейшая динамика фронта пламени повторяется. После ускорения фронт пламени становится плоским. Однако, в отличие от фронта детонации, наблюдается заметное искажение в области пограничного слоя. Ускорение фронта сопровождается его растяжением вдоль оси канала. В таблице 7 приведены временные и пространственные параметры колебаний.

На основе пространственно-временных разверток движения фронта пламени можно построить зависимость скорости пламени от расстояния вдоль оси канала или времени, начиная с момента входа детонационной волны в канал. На рисунке 60 показана эволюция скорости фронта пламени для смеси с ER = 1.4. Зависимость скорости от обоих параметров имеет колебательный характер с затуханием. В этом случае минимальное значение скорости фронта пламени одинаково и равно 100 м/с для каждого цикла, что в несколько раз ниже скорости галопирующей детонации. Период между локальными ускорениями фронта пламени постепенно возрастает. Среднее значение периода колебаний для смеси с отношением ER = 1.4 составляет 214 мкс, а пространственный интервал – 75 мм. Это расстояние соответствует 24 поперечным размерам канала. Следует отметить, что полученный период колебаний по абсолютной величине оказываются близким к параметрам для смеси ацетилен-кислород, представленной в [69].

Осциллирующая форма распространения фронта пламени в канале 3×3 мм, зарегистрированная в этом исследовании, наблюдалась в диапазоне ER от 0.9 до 1.8.

При изменении значения ER ниже 0.8 или выше 2.0 монотонное замедление фронта пламени наблюдалось без колебаний. В таблице 7 приведены временные и пространственные периоды колебаний.

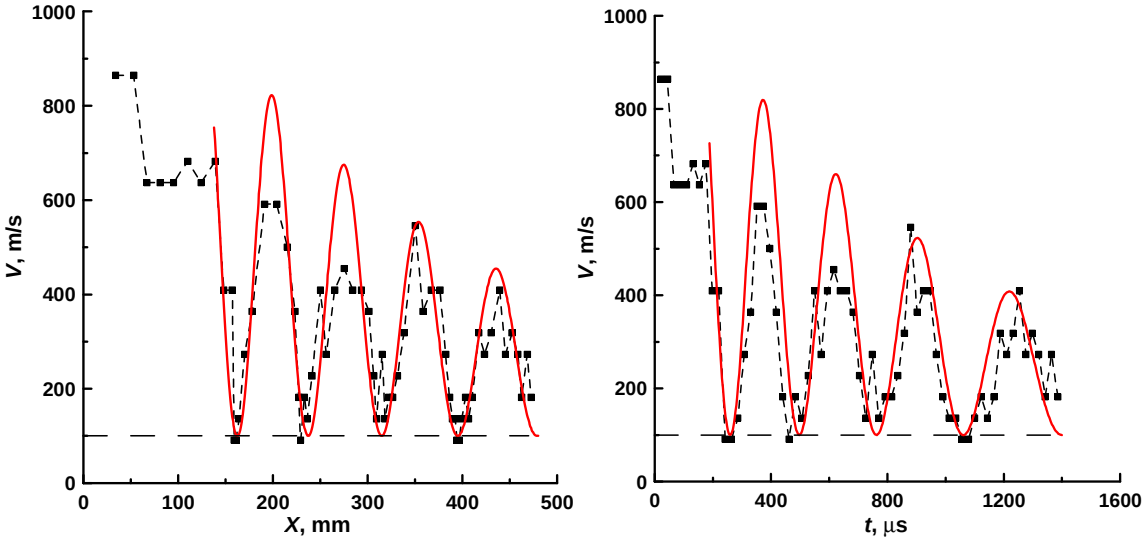


Рисунок 60 – Эволюция скорости фронта пламени от расстояния от начала узкого канала (слева) и от времени (справа). ER=1.4, канал шириной 3 мм.

Таблица 7 – Пространственные и временные периоды колебаний фронта пламени в осциллирующем затухающем режиме горения.

ER	Δx, мм	Δt, мкс
0.9	65	100
1.0	70	200
1.4	75	300
1.6	75	250
1.8	80	300

4.3 Выводы

Используя оптические методы диагностики, был изучен процесс распространения фронта пламени в канале субкритического поперечного размера для смеси ацетилен-воздух. Полученные данные позволили обнаружить

осциллирующую форму распространения горения в узком канале после распада стационарной детонации Чепмена-Жуге на ударную волну и фронт пламени. Период колебаний изменялся в интервале 100-300 мкс, а пространственный интервал составлял около 65-80 мм. Сразу же после распада волны детонации средняя скорость фронта пламени снижается сначала до 1000 м/с, а затем до 200 м/с. При этом минимальное зарегистрированное значение скорости пламени составляло около 100 м/с для каждого цикла. Также был получен режим повторного возникновения детонации, в котором повторное возникновение детонации происходило на расстоянии 200 поперечных размеров от начала узкой секции.

Был получен критерий, определяющий режим распространения фронта пламени. Критерий представляет собой отношение поперечного размера канала к ширине детонационной ячейки. При критерии $D/\lambda>1.0$-1.1 горение распространялось в режиме стационарной детонации, при $D/\lambda=1.0$-1.1 наблюдался режим с распадом и повторным инициированием детонации. Для D/λ в интервале от 0.5 до 1.0 в канале 5×5 мм и для $D/\lambda=0.5$-0.6 в канале 3×3 мм было зарегистрировано затухающее осциллирующее горение.

Заключение

1. Экспериментально изучено распространение детонации в каналах переменного сечения как в покоящейся предварительно перемешанной смеси метана с кислородом, так и при раздельной подаче метана и кислорода в режиме с потоком. Показано, что детонация при раздельной подаче метана и кислорода в режиме потока оказалась более стабильной и имела более широкие пределы существования по сравнению с детонацией в покоящейся предварительно перемешанной смеси. В случае режима потока детонация сохраняла параметры близкие к детонации Чемпена-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. При этом давление пересжатой детонационной волны оказалось вдвое выше давления волны Чепмена-Жуге. Стационарная детонационная волна с параметрами Чепмена-Жуге в этой смеси сохраняет свои параметры на выходе из канала, если в данной смеси на диаметре канала 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 диаметр канала соответствует 4.5-6.0 поперечным размерам ячейки детонации.

2. Экспериментально исследован распад детонации при прохождении через пористый канал. Сравнивались два типа пористых материалов: ППУ и стальная вата. Распад детонационной волны на ударную волну и фронт пламени наблюдался в пористой секции детонационной трубки для двух использованных материалов. Пик давления на конце пористой секции со стальной ватой и ППУ были в 6 и 4 раза ниже, чем в канале с твердыми стенками. Скорость пламени упала ниже скорости звука Чепмена-Жуге в обоих случаях. Использование пористого материала, покрытого непроницаемой пленкой приводило к увеличению давления ударной волны выше значений давления детонации Чепмена-Жуге.

3. Был изучен процесс распространения фронта пламени в канале субкритического поперечного размера для смеси ацетилен-воздух. Полученные данные позволили обнаружить три режима распространения пламени: стационарную детонацию Чепмена-Жуге, затухающую осциллирующую форму

распространения горения и режим с распадом и последующим восстановлением детонации в узком канале.

Безразмерный критерий, определяющий режим распространения фронта пламени, представляет собой отношение поперечного размера канала к ширине детонационной ячейки. Интервал D/λ = 1.0-1.1 является предельным переходным значением критерия между стационарной детонацией, распадом и повторным инициированием детонации.

Благодарность

Автор выражает благодарность всем, без кого эта работа была бы невозможна. Научному руководителю, профессору, доктору физико-математических наук Голубу Виктору Владимировичу. За помощь в экспериментальных исследованиях – Головастову Сергею Викторовичу. За полезные обсуждения – Киверину Алексею Дмитриевичу.

Список литературы

1. Berthelot M., Vieille P. On the velocity of propagation of explosive processes in gases // CR Hebd. Sceances Acad. Sci. – 1881. – V. 93. – №. 2. – P. 18-21.
2. Mallard E., Le Chatelier H. Sur les vitesses de propagation de l’inflammation dans les mélanges gazeux explosifs // Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l’Académie des Sciences. – 1881. – V. 93. – P. 145-148.
3. Михельсон В. А. О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей // Учен. зап. Имп. Моск. ун-та, отд. физ.-мат. – 1893. – №. 10. – С. 1-92.
4. Hugoniot H. Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (first part) // J. de l’Ecole Polytechnique. – 1887. – V. 57. – P. 3-97.
5. Chapman D. L. VI. On the rate of explosion in gases // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1899. – V. 47. – №. 284. – P. 90-104.
6. Jouguet E. Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz // J. Maths. Pure Appl. – 1905. – V. 7. – P. 347.

7. Zhang F. (ed.). Shock Waves Science and Technology Library, Vol. 6: Detonation Dynamics. Springer Science & Business Media, 2012.
8. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах // ЖЭТФ. – 1940. – Т. 10. – №. 5. – С. 542.
9. Neumann J. V. Progress report on the theory of detonation waves // OSRD Report. – 1942. – V. 549.
10. Döring W. On detonation processes in gases // Ann. Phys. 1943. V. 43. P 421-436.
11. Shepherd J. E. Detonation in gases // Proceedings of the Combustion Institute. – 2009. – V. 32. – №. 1. – P. 83-98.
12. Lee John H. S. The detonation phenomenon // Cambridge University Pres. 2008.
13. Денисов Ю. Н., Трошин Я. К. Структура газовой детонации в трубах // ЖТФ. – 1960. – Т. 30. – С. 450.
14. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. Изд-во Сибирского отделения АН СССР. – 1963.
15. Soloukhin R. I. Multiheaded structure of gaseous detonation // Combustion and Flame. – 1966. – V. 10. – №. 1. – P. 51-58.
16. Айвазов Б.В., Зельдович Я.Б. Образование пересжатой детонационной волны в сужающейся трубке // Журн. экспериментальной и теоретической физики. – 1947. – Т. 17. – № 10. – С. 889-900.
17. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Ульяницкий В. Ю. Использование пересжатой детонации для нанесения покрытий // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46. – №. 3. – С. 125-133.
18. Звездин К.А., Голуб В.В., Бакланов Д.И.,Тарасенко И.Н., Ленкевич Д.А., Котельников А.Л., Бивол Г.Ю. Устройство сжигания топлива в режиме многоступенчатой детонации. Патент на полезную модель № 147755. – 2014.
19. Baklanov D. I., Gvozdeva L. G., Scherbak N. B. Formation of high-speed gas flow at combustion in the regime of multi-step detonation // Gaseous and Heterogeneous Detonations: Science to Applications. Moscow, ENAS Publ. – 1999. – P. 141-152.
20. Khasainov B. et al. Detonation diffraction from circular tubes to cones // Shock Waves. – 2005. – V. 14. – №. 3. – P. 187-192.

21. Bartma F., Schroder K. The Diffraction of a Plane Detonation Wave at a Convex Corner // Combustion and Flame. – 1986. – V. 66. – P. 237-248.
22. Brown C.J., Thomas G.O. Experimental studies of ignition and transition to detonation induced by the reflection and diffraction of shock waves // Shock Waves. – 2000. – V. 10. – P. 23-32.
23. Николаев Ю.А., Васильев А.А., Ульяницкий В.Ю. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т. 39, – № 4. - С.22-54.
24. Pantow E.G., Fischer M., Kratzel Th. Decoupling and recoupling of detonation waves associated with sudden expansion // Shock Waves. – 1996. – V. 6. – № 3. – P. 131-137.
25. Bartlmä F., Schröder K. The diffraction of a plane detonation wave at a convex corner // Combustion and Flame. – 1986. – V. 66. – №3. – P. 237–248.
26. Губин С.А., Когарко С. М., Михалкин В. Н. Экспериментальное исследование газовой детонации в конических трубах // Физика горения и взрыва. – 1982. – №5. – С.111-117.
27. Sorin R. et al. Detonation diffraction through different geometries // Shock Waves. – 2009. – V. 19. – №. 1. – P. 11-23.
28. Vasil'ev A. A. Diffraction of multifront detonation // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1988. – V. 24. – №. 1. – P. 92-99.
29. Polezhaev Y. V., Seleznev R. K. Numerical study of the processes of resonance emergence in the experimental set-up of a pulse detonation engine // High Temperature. – 2014. – V. 52. – №. 2. – P. 225-229.
30. Polezhaev Y. V., Stonik O. G. From deflagration to detonation: Three modes of combustion //High Temperature. – 2010. – V. 48. – №. 4. – P. 534-540.
31. Frolov S. M. Natural-Gas-Fueled Pulse-Detonation Combustor // Journal of Propulsion and Power. – 2013. – V. 30. – №. 1. – P. 41-46.
32. Frolov M. et al. Thermal tests of a pulse-detonation high-speed burner // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2013. – V. 7. – №. 6. – P. 772-776.

33. Borisov A. A. et al. Transient modes of propagation of the shock wave-reaction zone complex in methane-air mixtures // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2014. – V. 8. – №. 2. – P. 158-164.
34. Frolov S. M. et al. Initiation of detonation in a tube with a profiled central body // Doklady Physical Chemistry. SP MAIK Nauka/Interperiodica, – 2011. – V. 438. – №. 2. – P. 114-117.
35. Azatyan V. V., Medvedev S. N., Frolov S. M. Mathematical modeling of the chemical inhibition of the detonation of hydrogen-air mixtures // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2010. – V. 4. – №. 2. – P. 308-320.
36. Fomin P. A., Chen J. R. Effect of chemically inert particles on parameters and suppression of detonation in gases // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2009. – V. 45. – №. 3. – P. 303-313.
37. Fedorov A. V., Kratova Y. V. Influence of non-reactive particle cloud on heterogeneous detonation propagation // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2015. – V. 36. – P. 404-415.
38. Medvedev S. P., Khomik S. V., Gel’fand B. E. Recovery and suppression of the detonation of hydrogen-air mixtures at an obstacle with orifices // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2009. – V. 3. – №. 6. – P. 963-970.
39. Evans M. W., Given F. I., Richeson Jr W. E. Effects of attenuating materials on detonation induction distances in gases // Journal of Applied Physics. – 1955. – V. 26. – №. 9. – P. 1111-1113.
40. Dupre G. et al. Propagation of detonation waves in an acoustic absorbing walled tube // Progress in Astronautics and Aeronautics. – 1988. – V. 114. – P. 248-263.
41. Teodorczyk A., Lee J. H. S. Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls // Shock Waves. – 1995. – V. 4. – №. 4. – P. 225-236.
42. Vasil'ev A. A. Near-limiting detonation in channels with porous walls //Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1994. – V. 30. – №. 1. – P. 101-106.
43. Guo C. et al. Experimental study of gaseous detonation propagation over acoustically absorbing walls // Shock Waves. – 2002. – V. 11. – №. 5. – P. 353-359.

44. Radulescu M. I., Lee J. H. S. The failure mechanism of gaseous detonations: experiments in porous wall tubes // Combustion and Flame. – 2002. – V. 131. – №. 1-2. – P. 29-46.
45. Mehrjoo N. et al. Effects of porous walled tubes on detonation transmission into unconfined space // Proceedings of the Combustion Institute. – 2015. – V. 35. – №. 2. – P. 1981-1987.
46. Radulescu M. I., Maxwell B. M. The mechanism of detonation attenuation by a porous medium and its subsequent re-initiation // Journal of Fluid Mechanics. – 2011. – V. 667. – P. 96-134.
47. Xie Q. et al. Effects of silicone rubber and aerogel blanket-walled tubes on H2/Air gaseous detonation // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2017. – V. 49. – P. 753-761.
48. Zalosh R. Deflagration suppression using expanded metal mesh and polymer foams // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2007. – V. 20. – №. 4-6. – P. 659-663.
49. Wen X. et al. Porous media quenching behaviors of gas deflagration in the presence of obstacles // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2013. – V. 50. – P. 37-44.
50. Babkin V. S., Korzhavin A. A., Bunev V. A. Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media // Combustion and Flame. – 1991. – V. 87. – №. 2. – P. 182-190.
51. Yan X. Q., Yu J. L. Effect of aluminum silicate wool on the flame speed and explosion overpressure in a pipeline // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2013. – V. 49. – №. 2. – P. 153-158.
52. Korzhavin A. A. et al. Selective diffusion during flame propagation and quenching in a porous medium // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2005. – V. 41. – №. 4. – P. 405-413.
53. 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.

54. Johansen C., Ciccarelli G. Combustion in a horizontal channel partially filled with a porous media // Shock Waves. – 2008. – V. 18. – №. 2. – P. 97-106.
55. Ciccarelli G., Johansen C., Kellenberger M. High-speed flames and DDT in very rough-walled channels // Combustion and Flame. – 2013. – V. 160. – №. 1. – P. 204-211.
56. Zhang B. The influence of wall roughness on detonation limits in hydrogen–oxygen mixture // Combustion and Flame. – 2016. – V. 169. – P. 333-339.
57. Wang L. et al. Detonation characteristics of stoichiometric H2–O2 diluted with Ar/N2 in smooth and porous tubes // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – V. 91. – P. 345-353.
58. Gvozdeva L. G. et al. Normal shock wave reflection on porous compressible material // IN: Dynamics of explosions; International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 10th, Berkeley, CA, Aug. 4-9, 1985, Technical Papers (A87-33991 14-25). New York, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., – 1986. – P. 155-165.
59. Skews B. W., Atkins M. D., Seitz M. W. The impact of a shock wave on porous compressible foams // Journal of Fluid Mechanics. – 1993. – V. 253. – P. 245-265.
60. Ben-Dor G. et al. Shock wave interaction with cellular materials // Shock Waves. – 1994. – V. 3. – №. 3. – P. 167-179.
61. Di Mare L. et al. Experimental and numerical study of flammability limits of gaseous mixtures in porous media // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2000. – V. 21. – №. 1-3. – P. 117-123.
62. Huang Z. W., Lefebvre M. H., Van Tiggelen P. J. Experiments on spinning detonations with detailed analysis of the shock structure // Shock Waves. – 2000. – V. 10. – №. 2. – P. 119-125.
63. Wu Y., Lee J. H. S. Stability of spinning detonation waves // Combustion and Flame. – 2015. – V. 162. – №. 6. – P. 2660-2669.
64. Dou H. S., Khoo B. C. Effect of initial disturbance on the detonation front structure of a narrow duct // Shock Waves. – 2010. – V. 20. – №. 2. – P. 163-173.

65. Huang Y. et al. Numerical study of three-dimensional detonation structure transformations in a narrow square tube: from rectangular and diagonal modes into spinning modes // Shock Waves. – 2014. – V. 24. – №. 4. – P. 375-392.
66. Wang C., Zhao Y., Zhang B. Numerical simulation of flame acceleration and deflagration-to-detonation transition of ethylene in channels // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2016. – V. 43. – P. 120-126.
67. Vasil'Ev A. A. Quasi-steady regimes of wave propagation in active mixtures // Shock Waves. – 2008. – V. 18. – №. 4. – P. 245-253.
68. Tsuboi N., Morii Y., Hayashi A. K. Two-dimensional numerical simulation on galloping detonation in a narrow channel // Proceedings of the Combustion Institute. – 2013. – V. 34. – №. 2. – P. 1999-2007.
69. Manzhalei V. I. Low-velocity detonation limits of gaseous mixtures // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1999. – V. 35. – №. 3. – P. 296-302.
70. Wu M. H., Wang C. Y. Reaction propagation modes in millimeter-scale tubes for ethylene/oxygen mixtures // Proceedings of the Combustion Institute. – 2011. – V. 33. – №. 2. – P. 2287-2293.
71. Wu M. H., Kuo W. C. Transmission of near-limit detonation wave through a planar sudden expansion in a narrow channel // Combustion and Flame. – 2012. – V. 159. – №. 11. – P. 3414-3422.
72. Camargo A. et al. Propagation of near-limit gaseous detonations in small diameter tubes // Shock Waves. – 2010. – V. 20. – №. 6. – P. 499-508.
73. Gao Y., Ng H. D., Lee J. H. S. Experimental characterization of galloping detonations in unstable mixtures // Combustion and Flame. – 2015. – V. 162. – №. 6. – P. 2405-2413.
74. Vasil'ev A. A. Cell size as the main geometric parameter of a multifront detonation wave // Journal of propulsion and power. – 2006. – V. 22. – №. 6. – P. 1245-1260.
75. Parra-Santos M. T., Castro-Ruiz F., Mendez-Bueno C. Numerical simulation of the deflagration to detonation transition // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2005. – V. 41. – №. 2. – P. 215-222.

76. Aminallah M., Brossard J., Vasiliev A. Cylindrical detonations in methane-oxygen-nitrogen mixtures // Progress in Astronautics and Aeronautics. – 1993. – V. 153. – P. 203-203.
77. Guirao C. M. et al. Hydrogen-air detonations. – Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA); McGill Univ., Montreal, Quebec (Canada). – 1982. – №. SAND-82-1494C; CONF-820801-11.
78. Schultz E., Shepherd J. Validation of detailed reaction mechanisms for detonation simulation. – 2000.
79. Golovastov, S. V., Bivol, G. Yu., Golub, V.V. – 2016. Decay and recovery of the detonation wave after passing of the steel tube covered by the acoustically-absorbing coatings. Proceedings of 11th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosion (11th ISHPMIE). Paper ISH024.
80. Liberman M. A. et al. Formation of the preheated zone ahead of a propagating flame and the mechanism underlying the deflagration-to-detonation transition // Physics Letters A. – 2009. – V. 373. – №. 5. – P. 501-510.
81. Seitz M. W., Skews B. W. Effect of compressible foam properties on pressure amplification during shock wave impact // Shock Waves. – 2006. – V. 15. – №. 3-4. – P. 177-197.
82. Glasstone S., Dolan P. J. The effects of nuclear weapons. DEPARTMENT OF DEFENSE WASHINGTON DC. – 1977.
83. Wenzel A. B., Esparza E. D. Measurements of pressures and impulses at close distances from explosive charges buried and in air // US Army Mobility Equipment Research and Development Center, Fort Belvoir, VA. – 1972. – P. 1-102.
84. Golovastov S. V., Samoilova A. A., Alexandrova D. M. Evaluation of heat losses behind the front of the detonation moving along the metallic porous surface // Aerospace Scientific Journal of the Bauman. – 2016. – V. 2. – №. 5. – P. 1-15.
85. Chue R. S., Clarke J. F., Lee J. H. Chapman-Jouguet deflagrations // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1993. – V. 441. – №. 1913. – P. 607-623.

86. Gao Y., Ng H. D., Lee J. H. S. Experimental characterization of galloping detonations in unstable mixtures // Combustion and Flame. – 2015. – V. 162. – №. 6. P. – 2405-2413.
87. Glass G. P. et al. Mechanism of the acetylene—oxygen reaction in shock waves // The Journal of Chemical Physics. – 1965. – V. 42. – №. 2. – P. 608-621.
88. Ul'yanitskii V. Yu. Closed model of direct initiation of gas detonation taking account of instability. I. Point initiation // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1980. – V. 16. – № 3. – P. 331-341.