

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

на правах рукописи

Ельянов Артём Евгеньевич

**Динамика и структура фронта водородно-воздушного пламени в каналах и плоских зазорах**

Специальность 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
проф., д.ф.-м.н. В.В. Голуб

Москва 2024

Оглавление	
Введение.....	3
Глава 1. Распространение водородно-воздушных пламен в каналах .....	16
1.1 Режимы распространения фронта пламени в трубах и каналах .....	16
1.2 Описание экспериментальной установки для исследования периферийного воспламенения водородно-воздушной смеси.....	21
1.3 Аналитическая модель «пальцеобразного» и «обратного пальцеобразного» пламен.....	34
1.4 Сравнительный анализ динамики распространения фронта пламени при центральной и периферийном воспламенении.....	38
1.5 Влияние ширины кольцевого зазора на динамику фронта пламени в трубе .....	51
Выводы по Главе 1 .....	56
Глава 2. Горение водородно-воздушных смесей в плоских зазорах. ....	58
2.1 Режимы горения бедных и ультра-бедных водородно-воздушных смесей в плоских зазорах .....	59
2.2 Экспериментальное исследование образования отдельных ячеек пламени в плоских зазорах.....	69
2.3 Экспериментальные результаты .....	71
2.4 Динамика фронта пламени и образовавшихся отдельных ячеек .....	76
2.5 Механизм распада фронта пламени и форма образовавшихся ячеек.....	88
2.6 Инфракрасное излучение распространяющегося фронта пламени в плоском зазоре.....	98
Выводы по Главе 2 .....	107
Заключение .....	109
Список литературы .....	110

## **Введение**

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию горения бедных и ультра-бедных водородно-воздушных смесей в трубах, каналах и плоских зазорах. Представленные геометрии камер сгорания и концентрации горючего позволили подробно рассмотреть различные режимы горения.

### Актуальность темы исследования

Использование ископаемых топлив ставит перед исследователями вопросы о возможности перехода на возобновляемые источники энергии. Этот вопрос важен как с точки зрения сокращения запасов, так и с точки зрения повышения экологических требований к объектам промышленности и транспорта. Альтернативой углеводородным топливам принято считать водород [1]. Широкий выбор источников производства водорода — от электролиза до паровой конверсии природного газа, а также низкий уровень вредных выбросов — привели к развитию программ энергетического использования водорода во многих странах [2, 3]. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р [4] утвержден план мероприятий по развитию водородной энергетики, направленный на увеличение производства и расширение сферы применения водорода в качестве экологически чистого энергоносителя.

До 25% выбросов углекислого газа в атмосферу Земли производилось в результате работы разного рода транспорта [5]. Применение водородных технологий в автомобилестроении позволит снизить эти выбросы и найти решения для контролируемого захоронения и использования побочно производимого углерода.

Превращение внутренней энергии водорода в механическую энергию движущегося транспортного средства на данный момент возможно как через использование двигателей внутреннего сгорания на водороде, так и с помощью топливных ячеек. Эксперименты по использованию водорода в

двигателях внутреннего сгорания начались еще с момента создания самого принципа двигателя. Сегодня производители транспортных средств, такие как Ford, Mazda, Nissan, Toyota, BMW, MAN и Changan, продолжают разработки двигателей внутреннего сгорания, работающих на водороде [6, 7, 8].

Водородные топливные ячейки, основанные на электрохимических процессах, позволяют получать электрическую энергию без сжигания водорода. Одним из успешных инженерных решений, стабильно работающих на водородных топливных ячейках, является автомобиль марки Toyota [9].

С другой стороны, использование водорода в качестве топлива ставит сложные задачи обеспечения безопасности эксплуатации транспортных средств. Высокая текучесть, низкая энергия инициирования и высокая температура сгорания увеличивают риски разрушений в аварийных ситуациях. Проблемы безопасности водородной энергетики ярко проявились в атомной энергетике. При авариях на атомных электростанциях основные разрушения происходили из-за воспламенения водорода, образовавшегося при контакте воды с редкоземельными металлами.

Эффективное и безопасное использование водорода в двигателях внутреннего сгорания и топливных ячейках легло в основу мотивации для написания данной диссертации.

#### Степень разработанности темы исследования

На данный момент в мире накоплен большой опыт исследования горения водорода в трубах и каналах. Основные направления этих исследований связаны с замедлением или ускорением распространения пламени.

Одним из способов замедления фронта пламени на начальном этапе является использование теплопоглощающих элементов, проницаемых для газа. Например, замедление фронта пламени с использованием проволочной

сетки, перфорированных и гофрированных пластин было рассмотрено в работах [10, 11, 12, 13], а использование акустически поглощающего материала для ослабления интенсивности детонационной волны — в работе [14]. Также часто применяются металлическая сетка [15, 16], гофрированный фильтрующий элемент, вспененная керамика [17], а также перфорированная металлическая пластина [18, 19, 20]. Основным принципом работы таких пламегасителей заключается в подавлении распространения пламени на ранних стадиях его развития [21, 22]. Даже при возникновении детонации, пламегасители могут демонстрировать эффективные характеристики подавления [23, 24, 25]. Для эффективного торможения фронта пламени важно разработать высокоэффективные пламегасители, устойчивые к пламени и имеющие низкое сопротивление потоку [26, 27]. В качестве критерия распространения пламени применяется критическое число Пекле, которое характеризует соотношение между интенсивностью переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью. Этот критерий также используется для анализа экспериментальных данных по прохождению пламени через отверстия и слои пористых материалов [28].

Однако расположение ячеистых и волокнистых материалов вдоль пути распространения пламени или поперёк канала может ускорять фронт пламени до скорости звука в горючей смеси в зависимости от состава смеси, характеристик материала и геометрии канала [29]. Эффект обусловлен турбулизацией потока горючей смеси перед фронтом пламени, теплопроводностью каркаса дисперсной среды и затруднением движения в ограниченном пространстве. Классическим турбулизатором и ускорителем пламени в трубе считается спиралевидная вставка, получившая название «спираль Щелкина» [30].

Современные экспериментальные исследования фронта пламени в трубах в основном сводятся к теневой или шпирен-визуализации пламени в каналах прямоугольного сечения. В отличие от регистрации процессов

ионизационными датчиками или датчиками давления визуализация процесса позволяет рассмотреть форму и структуру фронта пламени, а не только динамику его распространения. Большинство работ, проводимых международными научными группами по данной тематике, посвящены именно этим исследованиям [31, 32]. Эти работы демонстрируют переходы от полусферического пламени к «пальцеобразному». Изучены скорости различных типов пламени и формы поверхности фронта в плоскости.

Известно, что механизмы неустойчивости фронта пламени зависят от стадии его распространения. Однако, в отличие от сферического случая, детальное рассмотрение неоднородностей (ячеек и разрывов) на фронте пламени до сих пор отсутствует. В работе [33] была выполнена трёхмерная визуализация пламени в трубе. В исследовании [34] авторы изучили «пальцеобразное» пламя в больших объёмах (4,5 куб. метра). Были измерены скорости движения фронта в различных направлениях и вычислены характерные скорости роста неоднородностей на фронте пламени.

Логическим продолжением исследований горения в трубах и каналах является изучение влияния их размеров. При уменьшении размеров каналов увеличивается сопротивление потока и усиливается тепловое взаимодействие между зоной горения и стенками канала по сравнению с традиционными камерами сгорания из-за значительно большего отношения поверхности к объёму [35]. Эти ограничения не позволяют рассматривать фронт пламени, распространяющийся в плоском зазоре, аналогично фронту пламени в трубах и каналах, и требуют проведения специальных экспериментов. В серии работ по исследованию распространения пламени в тонких зазорах в водородно-воздушных смесях [36, 37, 38, 39] были выявлены различные режимы горения в зависимости от концентрации водорода в смеси, толщины зазора и направления распространения пламени в вертикальной камере сгорания. Фронт пламени может распадаться на отдельные участки в зависимости от концентрации водорода и ширины зазора.

В работе [40] представлены результаты экспериментального исследования распространения водородно-воздушных пламен в горизонтальном зазоре. Основным применяемым в работе [40] методом визуализации – регистрация следов паров воды. Искривление фронта пламени в поперечном сечении исследовалось в работе [41]. Показано искривление фронта пламени в зависимости от концентрации водорода и толщины зазора. В работах [36, 41] проведен анализ безразмерных параметров, способных определить смену режима горения и распад фронта пламени в зависимости от концентрации водорода и толщины зазора. В [41] в качестве такого параметра было предложено модифицированное число Льюиса, в [36] основным влияющим числом было определено число Пекле. При исследовании горения смесей водород-воздух [42] и углеводородов [43] фронта пламени не распадается на отдельные участки. Анализ режимов горения и распада фронта пламени посвящен также ряд расчетно-теоретических работ [44, 35].

### Цели и задачи работы

В работе ставятся две цели. Первая – изучить влияние периферийного воспламенения водородно-воздушных смесей в трубах и каналах:

1. определить скорость фронта пламени при периферийном и центральном воспламенении и провести сравнение,
2. определить оптимальное соотношение площади пластины, формирующей кольцевую щель, и площади поперечного сечения канала, которое обеспечивает максимальную скорость фронта пламени.

Вторая цель – изучить динамику и структуру фронта водородно-воздушных пламен в плоских зазорах:

1. определить динамику и механизм распада фронта пламени в плоском зазоре, а также форму образующихся отдельных ячеек пламени,
2. определить влияние потерь тепла в стенки на основе излучения продуктов сгорания в инфракрасном спектре.

Для достижения целей были поставлены следующие задачи:

1. Разработка и сборка экспериментальных установок для исследования распространения водородно-воздушных пламен в трубах, каналах и плоских зазорах;
2. Разработка методов регистрации распространяющегося пламени в трубах, каналах и плоских зазорах на основе теневой и инфракрасной визуализации;
3. Проведение экспериментов по исследованию распространения водородно-воздушных пламен в указанных геометриях;
4. Создание программного комплекса обработки экспериментальных данных и определение погрешности получаемых результатов;
5. Анализ и обработка полученных экспериментальных изображений;
6. Построение зависимостей радиуса и скорости распространения пламени от времени;
7. Построение аналитической модели «обратного пальцеобразного» пламени;
8. Описание качественного и количественного преимущества периферийного воспламенения перед центральным;
9. Проведение параметрического исследования по выявлению ширины кольцевого зазора, обладающего максимальной эффективностью;
10. Получение инфракрасных изображений фронта водородно-воздушного пламени в плоском зазоре;
11. Описание механизма распада фронта пламени в плоском зазоре и формы образующихся отдельных ячеек;



## 12. Построение критерия распада фронта водородно-воздушного пламени, распространяющегося в плоском зазоре.

### Научная новизна работы

В работе получен режим распространения пламени в трубах и каналах при периферийном зажигании. Данный режим по аналогии с известным режимом горения, когда фронта пламени представляет собой «пальцеобразную» структура обозначен как «обратное пальцеобразное» пламя. Продемонстрировано преимущество периферийного зажигания перед классическим центральным. Показан рост скорости пламени в режиме «обратного пальцеобразного» горения. В ходе исследования была собрана установка, позволяющая визуализировать пламя в трубе теневым методом вдоль всего диаметра трубы.

Впервые проведена синхронизированная съемка в инфракрасном спектре и методом теневой визуализации водородно-воздушного пламени, распространяющегося в трубе в перпендикулярных плоскостях. Полученные изображения позволили соотнести стадии распространения пламени с формой его фронта.

Построена аналитическая модель «обратного пальцеобразного» пламени. Анализ модели позволил оценить расстояние до схлопывания «обратного пальцеобразного» фронта пламени.

Впервые получены инфракрасные изображения водородно-воздушного пламени в плоском зазоре. Данные изображения позволили детально рассмотреть распад фронта пламени на отдельные участки зон реакции на начальном этапе. Образующиеся отдельные элементы фронта обозначены как «колпачкообразные» пламена. Распад фронта пламени возникает в связи с локальным затуханием искривленного фронта пламени согласно механизму термодиффузионной неустойчивости.

Показаны скорости фронта пламени в зависимости от концентрации водорода в водородно-воздушной смеси. Измерены линейные размеры фронта пламени до распада и соотнесены с размерами образующихся «колпачкообразных» пламен.

#### Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные в работе результаты несут как фундаментальное, так и прикладное значение.

Модель «обратного пальцеобразного» пламени может использоваться как в расчетных работах, так и учитываться при конструировании водородных энергетических установок. Преимущества периферийного воспламенения перед центральным может повысить эффективность работы двигателей внутреннего сгорания.

Распад фронта пламени в плоском зазоре поднимает вопрос безопасности эксплуатации водородных топливных ячеек. «Колпачкообразные» пламена могут распространяться в тонких зазорах и нести риски воспламенения в случае утечки водорода. Условия существования «колпачкообразных» пламен чувствительны к толщине зазора и концентрации смеси, и данный режим горения может проявляться в местах, где не поддерживается дефлаграционное горение.

#### Методология и методы исследования

Поставленные в рамках диссертации цели решались в первую очередь экспериментальными методами. Основные задачи, поставленные при проведении экспериментов – осуществление регистрации распространяющегося фронта пламени теневым методом и с помощью инфракрасной визуализации. Теневой метод визуализации был реализован при помощи прибора ИАБ-451 и высокоскоростной видеокамеры Phantom VEO710S. По общему типу схема прибора ИАБ-451 относится к Z-образным схемам с параллельным ходом лучей. Световой диаметр равен 230 мм.

Высокоскоростная камера Phantom VEO 710 S обеспечивает максимальную скорость съемки 7400 кадров в секунду в полнокадровом режиме при разрешении 1280 на 800 пикселей. Источник света в приборе ИАБ-451 – галогеновая лампа мощностью 75 Вт.

Инфракрасная визуализация осуществлялась инфракрасной камерой Infratec ImageIR 8300. Матрица данной ИК-камеры выполнена по технологии InSb, спектральный диапазон составляет от 1,5 до 5,7 мкм. Основная длина волны излучения продуктов сгорания водорода составляет 2,7 мкм. Разрешение матрицы составляет 640 на 512 пикселей. В полнокадровом режиме скорость съемки составляет до 300 кадров в секунду. В режимах уменьшенного числа задействованных линий матрицы скорость съемки может достигать 5000 кадров в секунду. При проведении исследований по инфракрасной визуализации фронта пламени в тонком зазоре использовалось стекло марки КИ, обладающее 90% пропусканием на длине волны 2,7 мкм.

В исследованиях с закрытым каналом использовался датчик динамического давления РСВ 113В21. Данный датчик измеряет давление в диапазоне до 1379 кПа с точностью 0,007 кПа.

Обработка экспериментальных изображений, а именно определение координат положения фронта пламени осуществлялись методом бинаризации. Определение ошибки соответствия реального положения фронта пламени с распознанным осуществлялось методом выборочного среднеквадратичного отклонения.

#### Положения, выносимые на защиту

1. Фронт водородно-воздушного пламени, распространяющегося в трубах и каналах при периферийном воспламенении, представляет собой форму «обратного пальцеобразного» пламени. «Обратное пальцеобразное» пламя распространяется быстрее классического «пальцеобразного» пламени, возникающего при центральном воспламенении, в 2.3 раза быстрее в смеси

с 12 об.% содержанием водорода и в 2.8 раза в смеси с 13 об.% содержанием водорода.

2. Оптимальное отношение площади пластины, формирующей кольцевую щель, к площади поперечного сечения трубы, которое обеспечивает максимальную скорость фронта пламени на начальном этапе распространения пламен водородно-воздушных смесей с содержанием водорода 15 и 20 об.% составляет 92.7%.
3. В плоских зазорах толщиной от 3 до 5 мм фронт пламени в бедных водородно-воздушных смесях с содержанием водорода от 7 до 10 об.% распадается на отдельные «колпачкообразные» ячейки при локальном затухании искривленного фронта в вогнутостях.
4. Критерий распада фронта пламени в плоском зазоре на основе модифицированного числа Пекле позволяет предсказывать тенденцию фронта пламени к распаду на отдельные ячейки.

#### Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность представленных данных определяется как методами проводимых исследований, так и сопоставлением результатов с работами различных научных групп. Так, например, распад фронта пламени в плоском зазоре происходит при параметрах толщины зазора и концентрации смеси, совпадающих с результатами научных групп НИЦ Курчатовский Институт и Технологического Института Карлсруэ. Совпадение экспериментально полученных результатов с аналитической моделью подтверждает достоверность.

Результаты работы опубликованы в 4 статьях:

1. **Elyanov A.**, Golub V., Volodin V. Premixed hydrogen-air flame front dynamics in channels with central and peripheral ignition // Int J Hydrogen Energ, 2022, V. 47, № 53, P. 22602-22615.

2. Володин В.В., Голуб В.В., **Ельянов А.Е.** Горение водородно-воздушных смесей в канале при кольцевом воспламенении // ТВТ, 2022, Т. 60, № 6, С. 957-960.
3. Володин В.В., Голуб В.В., **Ельянов А.Е.** Исследование распространения водородно-воздушного пламени в плоском зазоре методом инфракрасной визуализации // ТВТ, 2024, Т. 62, № 2, С. 322-329.
4. **Elyanov A.** et al. Decay of a hydrogen-air flame front to cup-like cells in a narrow horizontal gap // Process Saf Environ, 2024, V. 191 Part B, P. 1872-1882.

Результаты работы были представлены на 6 конференциях.

1. Володин В.В., Голуб В.В., **Ельянов А.Е.** Сравнение распространения водородно-воздушного пламени в канале при центральном и кольцевом воспламенении // XIV Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2022), 4–13 сентября 2022 г., Алушта.
2. Golub V., Volodin V., **Elyanov A.**, Malashin I. Flame acceleration in a tube with annular ignition at the closed end // 15th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Virtual conference, 25 – 28 July 2021.
3. Gavrikov A., Danilin A., **Elyanov A.**, V. Volodin, V. Golub. Experiments and simulations of combustion in a thin flat cell // XXXIX Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2024)
4. **Ельянов А.Е.**, Ускорение пламени в цилиндрической трубе на стадии развития «finger-flame» // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021».
5. **Ельянов А.Е.**, Распространение и распад аксиального фронта водородно-воздушного пламени в плоской горизонтальной щели //

Всероссийская конференция молодых ученых механиков, 4–14 сентября 2024, г. Сочи, Россия.

- б. **Ельянов А.Е.**, Голуб В.В., Володин В.В. Исследование распада фронта водородно-воздушного пламени на отдельные ячейки в плоской горизонтальной щели // XVII Всероссийский симпозиум по горению и взрыву, 16-20 сентября 2024 года, г. Суздаль, Россия.

#### Личный вклад автора

Автором диссертации лично были спроектированы, сконструированы и собраны все используемые экспериментальные стенды вплоть до изготовления уникальных частей установок с применением соответствующих станков.

Все эксперименты и их последующая обработка также проводились автором лично. Была проведена синхронизация высокоскоростной и инфракрасной камеры. В процессе проведения экспериментов автором дорабатывались стенды и условия проведения экспериментов для достижения максимально точных результатов.

Постановка задач, обсуждение результатов и выводов проводились совместно с научным руководителем профессором, доктором физико-математических наук Голубом В.В. Активное обсуждение планирования экспериментов и анализ полученных результатов проводилось совместно со старшим научным сотрудником лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН, кандидатом физико-математических наук Володиным В.В.

Работа, представленная в данной кандидатской диссертации, является логическим продолжением исследований автора, затрагивающих вопросы горения водородно-воздушных смесей, начиная с написания автором бакалаврского диплома. С 2017 года автор занимался исследованием горения струй водорода, горения в свободном пространстве в мелких и крупных масштабах. За время работы над этой тематикой автор стал соавтором 19

публикаций и 22 докладов на конференциях с учетом тех, где представлены результаты данной работы.

#### Соответствие специальности

Представленное экспериментальное исследование горения водородно-воздушных смесей в трубах, каналах и плоских зазорах соответствует паспорту специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника в направлении исследований п.8 «Численное и натурное моделирование теплофизических процессов в природе, технике и эксперименте, расчет и проектирование нового теплотехнического оборудования». Проведенные эксперименты моделируют горение водородно-воздушных смесей в двигателях внутреннего сгорания, микрогорелках. Результаты направлены на обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации подобных теплотехнического оборудования.

#### Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы.

Первая глава состоит из обзора литературы, описания экспериментального стенда и полученных результатов. В первой главе представлены результаты экспериментов по распространению водородно-воздушных пламен в открытой трубе и закрытом канале квадратного сечения.

Вторая глава содержит результаты исследования распространения пламени в плоском зазоре. Глава содержит обзор литературы и описание экспериментальных методик. В главе приводятся полученные изображения, анализ погрешностей при их обработке, результаты.

Диссертация содержит 123 страницы, 49 рисунков, 4 таблицы. Список литературы включает 130 наименований.

## **Глава 1. Распространение водородно-воздушных пламен в каналах**

В исследованиях, связанных с распространением водородно-воздушных пламен в трубах и каналах, в основном рассматриваются вопросы ускорения или замедления скорости фронта пламени. На данный момент распространение фронта пламени в круглых цилиндрических каналах (трубах) изучено достаточно хорошо. Различные преграды используются для замедления фронта пламени, а турбулизирующие вставки, такие как спираль Щелкина, позволяют сократить путь, который дефлаграционный фронт преодолевает до детонации. Однако вопросам воспламенения пламени в каналах уделено меньше внимания. Турбулизаторы потока в каналах не приводят к мгновенному ускорению пламени — оно происходит на расстоянии нескольких диаметров от точки воспламенения. Комбинирование методов воспламенения с такими турбулизаторами может сократить путь, необходимый для ускорения фронта пламени. В данной главе будет рассмотрено влияние кольцевого воспламенения на ускорение фронта пламени.

### **1.1 Режимы распространения фронта пламени в трубах и каналах**

В гражданском применении горение в трубах относится к работе двигателей внутреннего сгорания. Цилиндр двигателя рассматривается как закрытая труба. Оптимизации рабочего процесса водородных двигателей внутреннего сгорания посвящено множество работ. В работе [45] изучены методы подавления проблем ненормального сгорания в водородных двигателях. К ненормальным явлениям сгорания относят преждевременное воспламенение, обратную вспышку с выходом пламени во впускной коллектор и «knock effect» - стук в двигателе, возникающий при быстром сгорании топливной смеси. Подобные ненормальные эффекты снижают производительность двигателя внутреннего сгорания и даже вызывают необратимые повреждения. В [45] определены коэффициенты избытка горючего, а также угол впрыска и массовый расход топлива, при которых



обеспечивается эффективное сгорание топлива. В работе [46] с помощью быстрого преобразования Фурье изучалась частота возникновения детонации сгорания при высоких оборотах двигателя. Из-за таких свойств водорода, как низкая энергия воспламенения и высокая способность к самоподдерживающемуся горению, условия работы водородного двигателя способствуют возникновению детонации при высоких оборотах двигателя (более 3000 об/мин), чего нет в бензиновых двигателях. В [47] исследована возможность снижения детонации водородного двигателя за счет применения рециркуляции отработавших газов. Также рассматривается влияние непосредственного впрыска водорода на детонацию и работу двигателя [48, 49]. В двигателях с искровым зажиганием, чем раньше впрыскивается водород, тем больше времени остается на смешивание водорода и воздуха, что позволяет смеси стать более гомогенной. Однако, когда смесь достаточно однородна, чрезмерно опережающий момент впрыска не оказывает эффективного воздействия на тепловые характеристики.

Фундаментальные аспекты интенсивного ускорения фронта пламени обсуждаются уже много лет в тесной связи с исследованием взрывов в каналах и инициированием детонации в технологических установках. В частности, теория ламинарного горения, теория детонации и перехода от горения к детонации (ПГД) представлена в работах Я. Б. Зельдовича [50, 51]. Градиентный механизм ускорения пламени наблюдается на более поздних стадиях, когда скорость пламени приближается к скорости звука в горючей смеси. Численные [52] и экспериментальные [53] исследования ускорения пламени в каналах показывают, что на ускорение пламени большое влияние оказывает его ячеистая структура из-за неустойчивости фронта пламени.

На практике наиболее используемым средством ускорения фронта пламени является спираль Щелкина [54]. Эксперименты по изучению перехода горения в детонацию обычно проводятся в закрытых трубах с различными видами поверхностей, препятствий и форм. Установка

спиральных барьеров Щелкина с различным перекрытием, рассчитываемым как отношение площади сечения канала к площади преграды, приводят как к положительному, так и к отрицательному влиянию шероховатости на пределы распространения фронта пламени и детонации [55, 56].

В различных работах показаны возможности перехода горения в детонацию с использованием конических элементов, установленных в каналах [57], колец [58], препятствий [59] и витых лент [60, 61]. В [62] проведены эксперименты с пламенем в трубе с квадратными и прямоугольными препятствиями, квадратными препятствиями с выемкой вдоль потока и H-образными препятствиями. Численное моделирование ускорения пламени водородно-воздушной смеси в канале с прямоугольными препятствиями представлено в [63]. Показано, что взаимодействие пламени с преградами и непосредственно складчатость фронта являются основным механизмом увеличения площади поверхности и скорости пламени.

При прохождении препятствий с наветренной стороны скорость пламени уменьшается, но при дальнейшем движении с подветренной стороны пламя ускоряется. В вычислительной работе [64] исследования проводились с препятствиями различной формы: прямоугольником, кругом и треугольником, обращенными гранью или основанием к потоку. В [62] показано, что прямоугольные препятствия на стенках трубы ускоряют фронт в меньшей степени, в отличие от препятствий в виде гипербол. В той же работе отмечается, что исследования влияния препятствий различной формы не проводились. Начальное ускорение пламени в канале определяется условиями воспламенения. При численном моделировании часто предполагается воспламенение по всей плоскости закрытого конца канала [65, 66]. В работах [67, 68] представлены результаты численного моделирования ускорения пламени в канале при зажигании в центре и по всей плоскости закрытого конца канала. Установлено, что переход от плоского зажигания к точечному приводит к увеличению начального ускорения пламени и уменьшению времени и расстояния до детонации.

В [69] построена аналитическая модель «пальцеобразного пламени», когда при центральном зажигании в трубе неустойчивое пламя ускоряется под действием неустойчивости Дарье-Ландау. Пламя в этом режиме имеет вытянутую в осевом направлении форму и ускоряется по мере приближения боковой поверхности к стенкам трубы. В случае кольцевого зажигания вблизи стенки трубы пламя также будет распространяться растянуто и ускоренно, но публикаций на эту тему не обнаружено.

Для изучения распространения пламени в каналах с препятствиями сложной формы обычно используются экспериментальные [70] и численные методы [71]. В редких случаях, когда проводятся крупномасштабные параметрические экспериментальные исследования, результаты объединяются в эмпирические формулы параметров горения из свойств горючей смеси и геометрических характеристик канала и препятствий. Это требует длительной экспериментальной работы и дает надежный результат в условиях эксперимента. Численное моделирование требует ответственного выбора моделей химического превращения и газовой динамики, которые не всегда однозначны [72]. Эволюцию относительно простых конфигураций пламени можно описать аналитически. Аналитические описания позволяют решать задачи оптимизации процессов без проведения большого количества экспериментов и расчетов.

Хотя двигатели внутреннего сгорания, как ожидается, получат массовое производство в следующем десятилетии, они требуют постоянного совершенствования для соответствия экологическим нормам и перехода на возобновляемые источники энергии. [73]. Одним из технических решений по улучшению характеристик двигателя является использование форкамерного зажигания вместо точечного [74]. Для уменьшения эффекта образования «тюльпанного пламени» и, следовательно, снижения детонации можно использовать изгиб камеры сгорания на  $90^\circ$  [75, 76].

Как было показано, геометрия камеры сгорания сильно влияет на распространение пламени. Можно предположить, что место возгорания

также должно иметь влияние. Некоторые вопросы влияния точки инициирования были исследованы в следующих работах. В работе [77] изучались взрывные свойства водородно-воздушной смеси в цилиндрическом сосуде при трех различных положениях воспламенения. Подобные исследования горения смесей синтез-газ-воздух в канале квадратного сечения описаны в [78]. Крупномасштабные эксперименты по горению водородно-воздушных пламен описаны в [79]. Влияние точки инициирования на максимальное давление взрыва в закрытом сосуде исследовалось в [80].

В данной главе работы предложен метод периферийного воспламенения водородно-воздушной смеси для интенсификации скорости распространения водородно-воздушного пламени в трубах и каналах [81, 82].

## **1.2 Описание экспериментальной установки для исследования периферийного воспламенения водородно-воздушной смеси**

Все эксперименты в данной работе, в том числе и в главе 2, проводились с использованием предварительно перемешанных водородно-воздушных смесей. Как на практике, так и для простоты описания экспериментальной части работы, установку можно рассматривать как две независимые части, соединенные газовой магистралью. Первая часть установки представляет из себя сложную газовую магистраль с баллонами газа, манометрами и емкостью для смешения газов (далее Пульт), показанную на Рис. 1. Данный Пульт предназначен для подготовки исследуемых газовых смесей. Вторая часть экспериментальной установки представляет из себя экспериментальный стенд с возможностью применения различных методов регистрации и обеспечения горения в различных геометриях. Во всей работе используется один и тот же пульт, а экспериментальный стенд модернизируется для решения конкретной поставленной задачи.

Пульт оснащен стрелочным манометром (M1 на Рис. 1) с пределом измерения равным 1,6 МПа, классом точности 1,5, цифровым манометром (M2 на Рис. 1) с пределом измерения 10 бар и классом точности 0,25 и вакуумметром (BM1 на Рис. 1) с предельным измерением разрежения 100 кПа, классом точности 1,0.

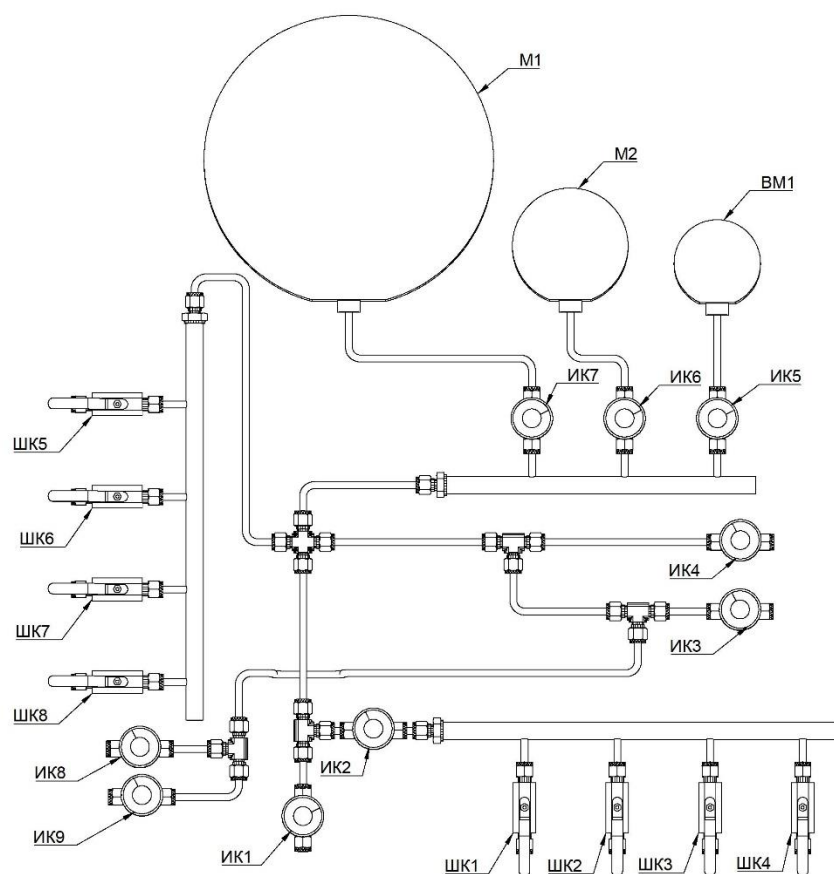


Рис. 1 – Пульт для создания газовых смесей.

К Пульту подключается емкость, объемом 10 или 40 л, предназначенная для создания смеси с заданными концентрациями водорода и воздуха при заданном конечном давлении. Максимальное давление смеси в емкости в рамках данной работы не превышает 5 атм. В емкость могут поступать как газы из баллонов, подсоединенных к пультау через шаровые краны ШК1 – ШК4 на Рис. 1, так и воздух из компрессора, подключенный через игольчатый кран ИК4 на Рис. 1. Очистка воздуха производится фильтром с фильтрующим элементом степени очистки по маслу  $0,1 \text{ мг/м}^3$  и по частицам 1 мкм. Вакуумный насос подключен к Пультау через кран ИК3 на Рис. 1. Игольчатый кран тонкой регулировки ИК2 регулирует расход газа, перетекающего из баллонов с газом в емкость смешения и позволяет точно дозировать необходимое количество газов в смеси. После заполнения емкости газовой смесью, емкость отсекается от газовой магистрали краном ИК1. Через шаровый кран ШК8 емкость с подготовленной смесью

соединяется газовой магистралью с экспериментальным стендом. Шаровые краны ШК5 – ШК7 и игольчатые краны ИК8 и ИК9 – резервные и предназначены для подключения дополнительных магистралей, соединения с системой вентиляции для удаления остатков газов или соединения с атмосферой.

Процедура приготовления водородно-воздушной смеси во всей работе одинаковая и производится следующим образом. Предварительно, с помощью вакуумного насоса, из емкости удаляются остатки газа, до предельного разрежения, контролируемого вакуумметром ВМ1. Далее емкость соединяется с атмосферой, до полного выравнивания давлений, после чего полагается, что емкость заполнена воздухом до абсолютного давления равного 1 атм. После этого в емкость подается водород до давления, равного парциальному давлению водорода исследуемой смеси, контролируемого манометрами М1 и М2. Парциальное давление водорода рассчитывается исходя из исследуемой объемной концентрации водорода в смеси, равное проценту от абсолютного давления в 6 атм. В конце емкость заполнялась воздухом из компрессора до избыточного давления 5 атм согласно манометру М2. Смесь выдерживается не менее 24 часов перед проведением экспериментов.

Экспериментальный стенд для исследования динамики распространения и формы фронта пламени водородно-воздушной схематически изображен на Рис. 2.

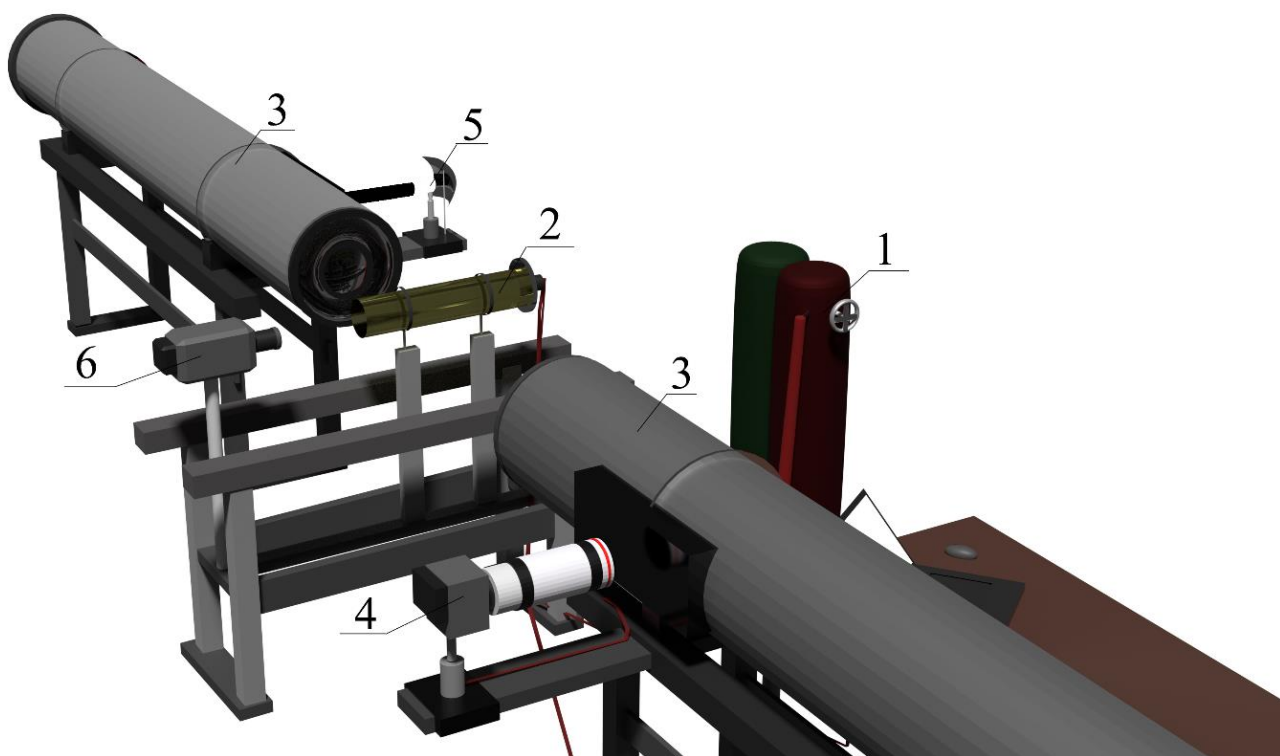


Рис. 2 – Экспериментальный стенд. 1 – емкость с водородно-воздушной смесью, 2 – полукрытый канал круглого сечения, 3 - теневой прибор ИАБ-451, 4 - высокоскоростная видеокамера, 5 – источник света, 6 – высокоскоростная инфракрасная камера.

В экспериментальный стенд вместо полукрытого канала круглого сечения (2 на Рис. 2) могут быть установлены различные камеры сгорания или трубы. В данной работе исследования проводились в полукрытом канале круглого сечения (Рис. 3а) и в закрытой камере сгорания (Рис. 3б).



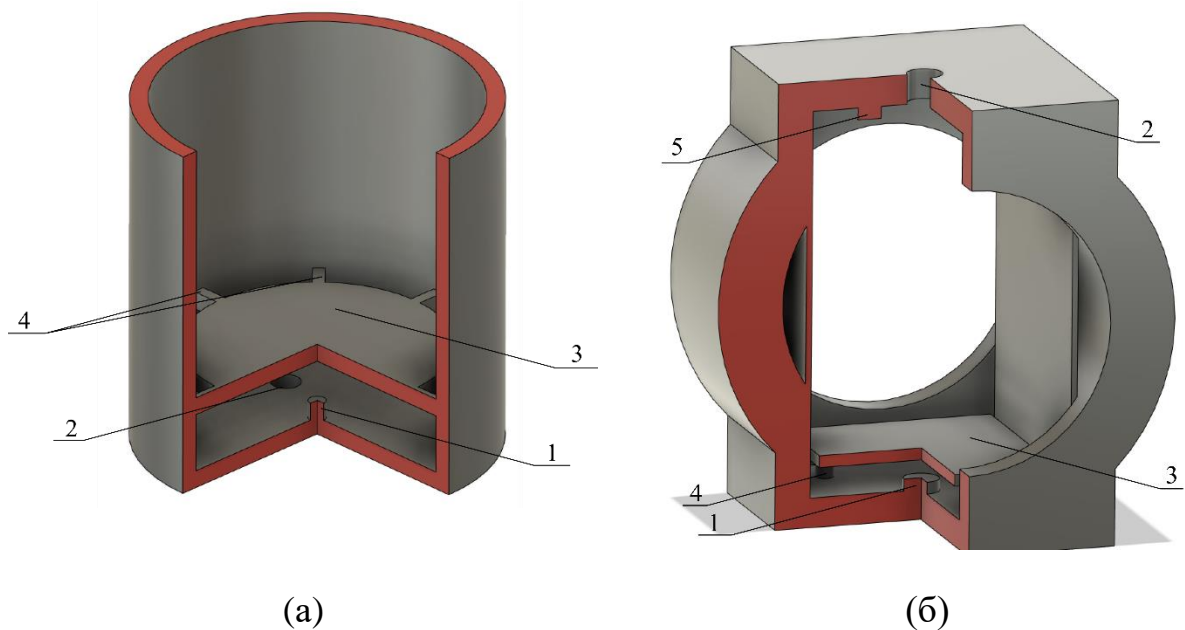


Рис. 3 – Схематичное изображение трубки с открытым концом (а), закрытая камера сгорания (б) с пластиной (3) для периферийного воспламенения. Вид в разрезе. Грани секций окрашены в красный цвет. 1 – свеча зажигания, 2 – впускное отверстие впрыска газа, 3 – пластина, 4 – крепящие пластину штифты, 5 – датчик давления.

Полуоткрытый канал круглого сечения представляет из себя трубу из оргстекла наружным диаметром 60 мм, толщиной стенок 3 мм и длиной 500 мм. В закрытом торце канала через отверстие (2 на Рис. 3а) устанавливался газовый штуцер, соединяющий канал с Пультот газовой магистралью, а в центре устанавливалась свеча зажигания. Поскольку данный канал оставался открытым, заполнение горючей смесью осуществлялось методом вытеснения. Перед проведением экспериментов канал продувалась 10 литрами смеси. Объем смеси контролировался расходомером Bronkhorst El-Flow. Таким образом, объем продуваемой смеси в 10 раз превышал объем канала. Смесью внутри поджигалась через 3 секунды после заполнения.

В данном канале производились исследования по распространению фронта пламени как при центральном, так и периферийном воспламенении. Для формирования кольцевого воспламенения напротив закрытого торца на расстоянии 10 мм от свечи зажигания размещалась пластина (3 на Рис. 3а),

закрепленная на стенках канала 8 металлическими штифтами (4 на Рис. 3а). Диаметр пластины составлял 49 мм, образуя таким образом щель шириной 5 мм. Фронт пламени огибал пластину и попадал в канал, образуя кольцевое воспламенение смеси. Объем части канала между закрытым торцом и пластиной составлял 0,1 литра. В экспериментах с полуоткрытым каналом давление было равно атмосферному, а температура — комнатной (293 К).

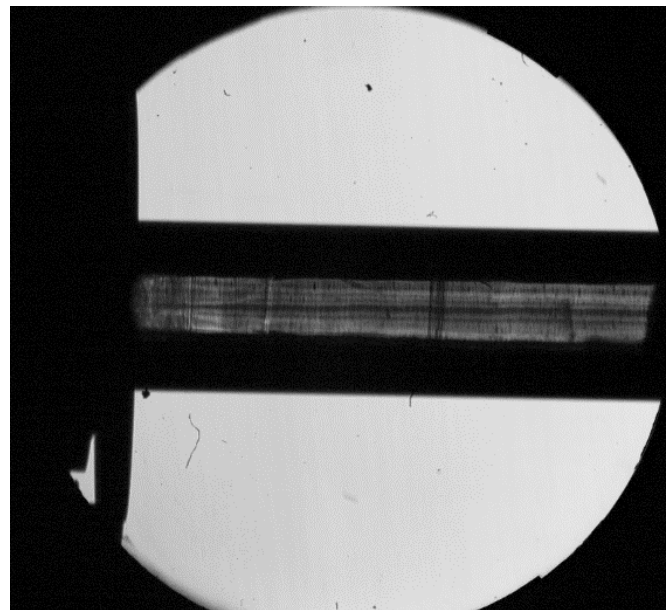
Визуализация горения осуществлялась в двух поперечных плоскостях. Трубка располагалась перпендикулярно продольной осью к теневому прибору, как показано на Рис. 2. В данной плоскости регистрация осуществлялась высокоскоростной камерой Phantom VEO 710 S (4 на Рис. 2) со скоростью съемки до 3000 кадров в секунду. Источником света в теневом приборе служила ксеноновая лампа (5 на Рис. 2). Инфракрасная камера Infratec ImageIR 8300 (6 на Рис. 2) осуществляла визуализацию с открытого конца трубки в соответствующей серии экспериментов со скоростью съемки до 300 кадров в секунду. В связи с тем, что стенки трубы из оргстекла значительно преломляли плоскопараллельный световой поток, визуализация по всему сечению трубы была невозможна (а на Рис. 4). Для устранения этой проблемы в канале были вырезаны окна длиной 150 мм, в которые была установлена ПЭТ пленка толщиной 0.3 мм (б и в на Рис. 4). Эти окна-вставки позволили визуализировать фронт пламени по всему сечению канала.

Вторая серия экспериментов проводилась в закрытой камере сгорания (Рис. 3б). Камера сгорания размещалась горизонтально на станине между двумя частями теневого устройства ИАБ-451. Камера сгорания представляла собой закрытый квадратный сосуд с двумя противоположно расположенными смотровыми окнами. Его внутренний размер составлял 70×70×230 мм. Свеча зажигания (1 на Рис. 3б) располагалась в центре нижнего фланца, газовая трубка (2 на Рис. 3б) и датчик динамического давления РСВ 113В21 (5 на Рис. 3б) располагались в верхнем фланце. Для заполнения камеры предварительно смешанным газом, имеющийся в камере

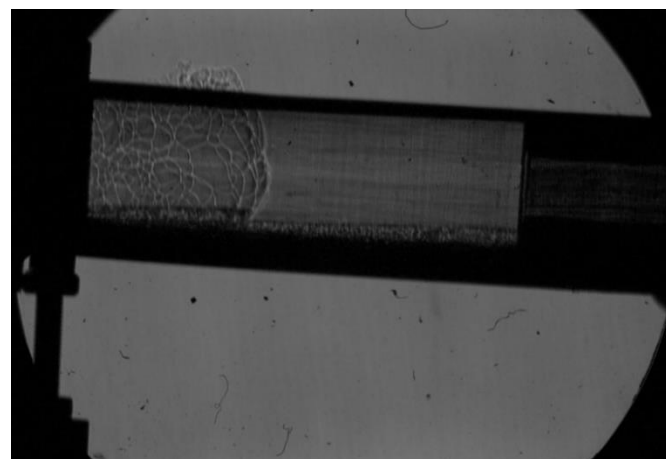
газ откачивался из камеры вакуумным насосом, а затем водородно-воздушная смесь заполняла камеру до абсолютного давления 0,5 атм. Температура была равна комнатной температуре (293 К). Для варьирования центрального и периферийного воспламенения в этой камере в нижнем фланце вокруг свечи зажигания были установлены 4 штифта (4 на Рис. 3б). Эти штифты удерживали тонкую квадратную металлическую пластину (3 на Рис. 3б) над свечой зажигания. Длина штифтов составляла 5 мм, а размер пластины на 5 мм меньше внутреннего размера камеры. Таким образом, пластина образовала зазор между стенками в 5 мм. Без пластины зажигание было классическое центральное, с установленной пластиной зажигание рассматривалось как периферийное.

Искровое воспламенение в обеих установках производилось с использованием одной и той же свечи зажигания, подключенной к источнику высокого напряжения. Свеча через коммутатор подключалась к генератору импульсов Г5-63. Инфракрасная съемка и высокоскоростная видеосъемка запускались тем же сигналом генератора, что и искра зажигания. Таким образом осуществлялась синхронизация: первые кадры во всех экспериментах соответствуют одинаковому моменту времени.

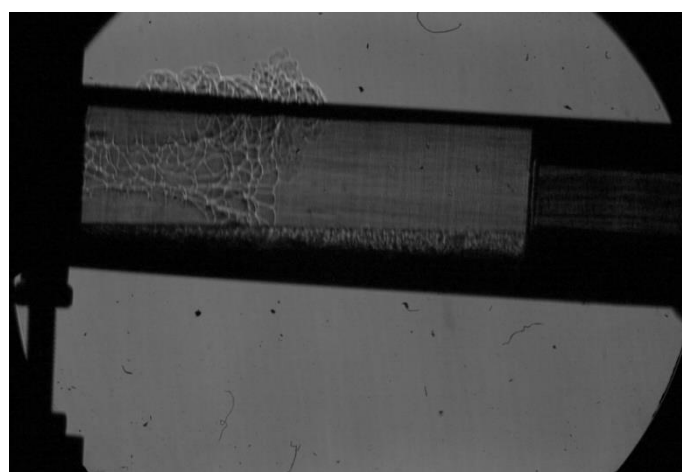
Все эксперименты проводились с водородно-воздушными смесями с концентрацией водорода 12, 13 и 15 об.%. Данные концентрации были выбраны по нескольким причинам. В работе [83] показано, что сферический фронт пламени переходит во всплывающий термик при содержании водорода 10 об.%. Смеси с концентрацией водорода более 15 об.% представляли опасность для визуализации ИК-камерой открытого конца трубки и критического давления камеры сгорания.



(a)



(б)

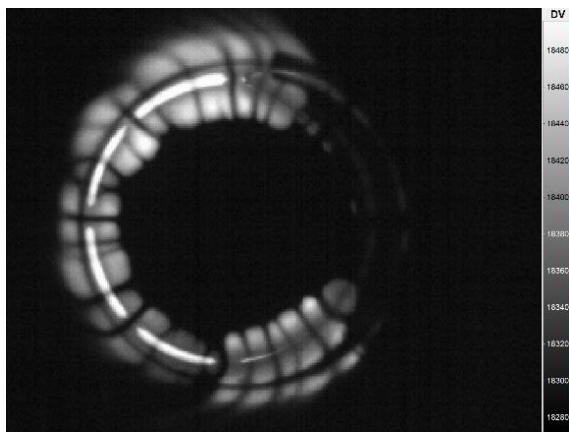


(в)

Рис. 4 – Полнокадровые теневые изображения фронта пламени 15 об.% водородно-воздушной смеси в канале круглого сечения в момент времени

20 мс: а – канал без окна-вставки, при центральном воспламенении; б – канал с окном-вставкой, при центральном воспламенении; в – канал с окном-вставкой, при кольцевом воспламенении.

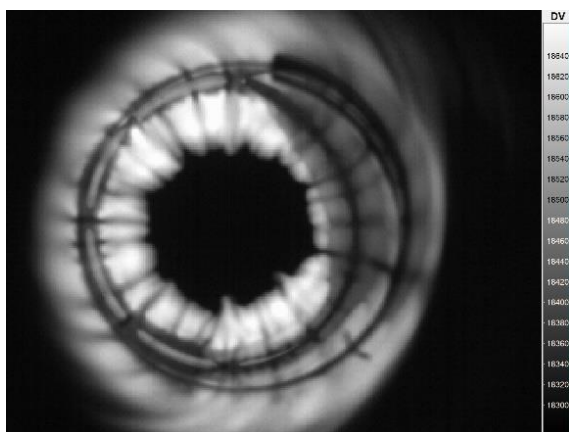
При центральном воспламенении фронт пламени вытягивается в осевом направлении, что принято называть «finger-flame» или «пальцеобразное» пламя [84]. Увеличение скорости в осевом направлении связано с вытеснением горючей смеси продуктами сгорания в сторону открытого конца канала. В радиальном направлении пламя движется со скоростью близкой к нормальной скорости ламинарного пламени. Общая площадь пламени растёт до момента гашения цилиндрической области пламени при достижении стенки. На Рис. 5 показаны инфракрасные изображения фронта пламени в различные моменты времени при кольцевом и центральном воспламенении. При кольцевом воспламенении фронт пламени вытягивается вдоль стенок, что, в рамках данной работы, будем называть «обратным пальцеобразным» пламенем. В радиальном направлении пламя сходится к оси канала. Длина цилиндрической области пламени увеличивается, а радиус сокращается, что приводит к постепенному уменьшению массовой скорости горения. После «схлопывания» фронта на оси пламя продолжает распространяться в осевом направлении. При центральном воспламенении фронт пламени соответствует форме «пальцеобразного» и на изображениях на Рис. 5 находится на полусферической стадии распространения.



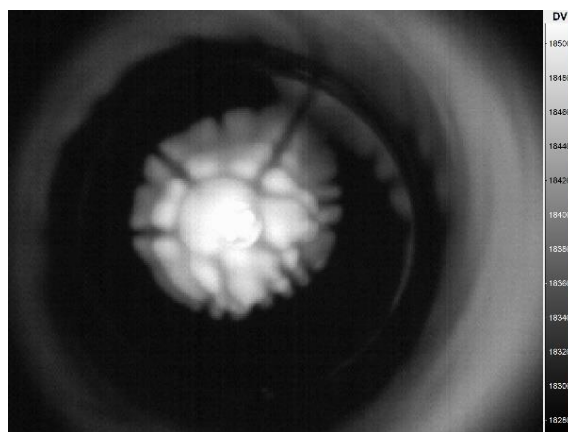
5 мс



5 мс



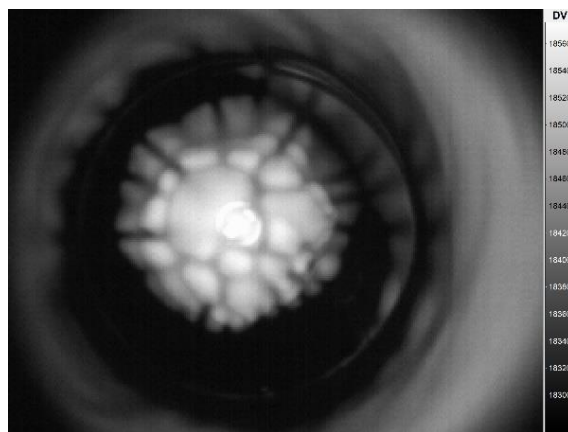
6 мс



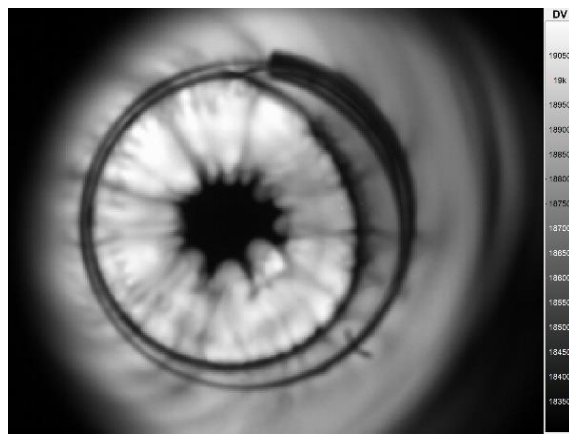
7 мс



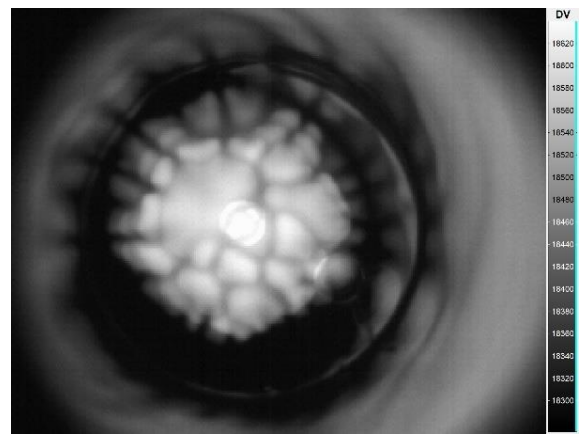
7 мс



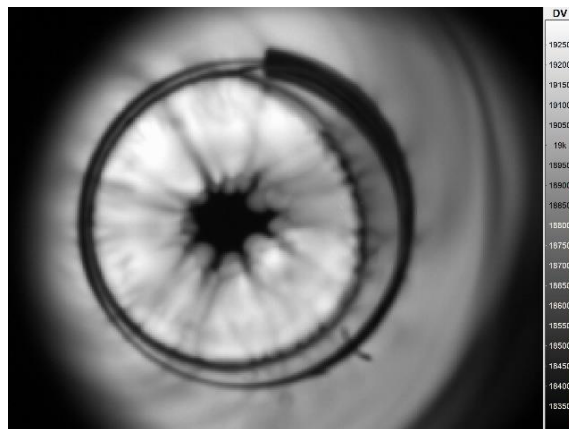
9 мс



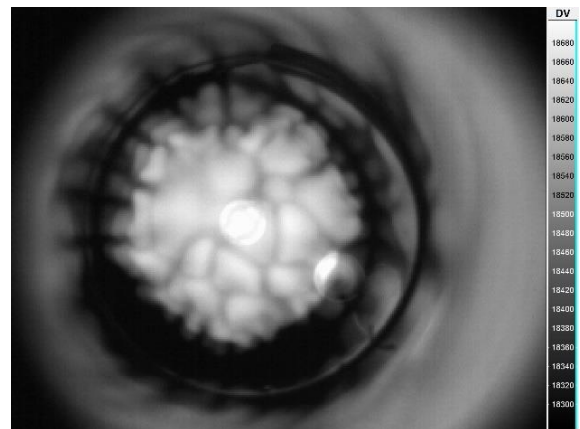
8 мс



11 мс



9 мс



13 мс

Рис. 5 – Инфракрасные изображения схлопывающегося пламени при кольцевом зажигании (слева) и полусферического пламени при центральном воспламенении (справа) в различные моменты времени в трубе диаметром 54 мм, содержание водорода в смеси 12%.

Серия изображений фронта пламени была подвергнута компьютерной обработке. Для анализа теневых кадров была создана программа с использованием программного обеспечения MatLab, которая определяла координаты фронта пламени для каждого момента в декартовых координатах. В основе распознавания фронта пламени лежал метод бинаризации. Изображения, полученные с помощью высокоскоростной камеры, являлись градиентом серого. Таким образом, определение порогового значения, совпадающего с яркостью фронта пламени, позволило получить маску фронта пламени и определить его координаты вдоль оси

канала. Возникновение ошибки определения размеров объекта по его изображению связано с размытием границ объекта и вычислению количества пикселей, соответствующих границе объекта. Чтобы учесть этот эффект необходимо знать размер пикселей матрицы камеры, учитывать фокусное расстояние объектива и расстояние до объекта. Однако существует более простой метод определения данной ошибки, который был реализован в данной работе. При вычислении размера объекта по изображению можно использовать калибровочное изображение, на котором изображен объект с известными размерами. По данному изображению рассчитывается расстояние в пикселях и вычисляется масштабирующий коэффициент. В данной работе использовалась величина размерности миллиметр/пиксель. Многократное измерение данной величины позволяет использовать метод определения выборочного стандартного отклонения [85]. После вычисления данный коэффициент переносится в основную программу, вычисляющую положение фронта в пикселях и пересчитывающую его в миллиметры. Было установлено, что 10 раз измеренное расстояние на калибровочном изображении позволяет получить ошибку в коэффициенте масштабирования не превышающую 0,25 %. В Главе 1 данной диссертации погрешность измерений не превышает размера точки на графиках.

Общепринятым методом [86] определения положения распространяющегося фронта является определение местоположения кончика пламени. В случае «пальцеобразного» фронта это значение совпадало с максимальным значением абсциссы фронта, поскольку форма фронта в направлении его распространения является выпуклой. Фронт «обратного пальцеобразного» пламени имеет вогнутую форму по направлению распространения, однако для корректного сравнения динамики распространения фронта пламени обеих форм, изображения, полученные при кольцевом воспламенении, были подвергнуты аналогичному анализу.



Инфракрасные изображения обрабатывались тем же способом, но в качестве ориентира для радиус-вектора использовался центр круга. Он соответствует точке инициирования в случае плоского закрытого конца и центру окружности перегородки в экспериментах с кольцевым воспламенением.

Обработка первичных экспериментальных данных позволила получить положения «юбки» ( $R_f$ ) и «кончика» ( $Z_f$ ) для каждой фотографии серии (Рис. 6). Полученные зависимости будут представлены в виде зависимостей положения «юбки» и «кончика», то есть  $R_f-t$  и  $Z_f-t$  диаграмм для экспериментов в канале круглого сечения и  $Z_f-t$  диаграмм для экспериментов в закрытой камере сгорания.

### 1.3 Аналитическая модель «пальцеобразного» и «обратного пальцеобразного» пламен.

В классическом эксперименте по исследованию распространения «пальцеобразного» пламени воспламенение происходит в центре закрытого конца канала. При горении газовых смесей продукты сгорания имеют меньшую плотность и занимают больший объем, чем исходная топливная смесь. Расширение продуктов сгорания приводит к появлению потока газа впереди фронта пламени и распространению фронта пламени в направлении потока. В случае наличия ограничительных стенок поток горючей смеси отклоняется, а фронт пламени вытягивается к открытому концу канала. Схема системы координат и фронт пламени при его распространении в канале с открытым концом показаны на Рис. 6 (а).

Приближенная модель «пальцеобразного» фронта пламени представляет собой фронт пламени в виде цилиндрической области, называемой «юбкой», и полусферической области, называемой «кончиком» [69].

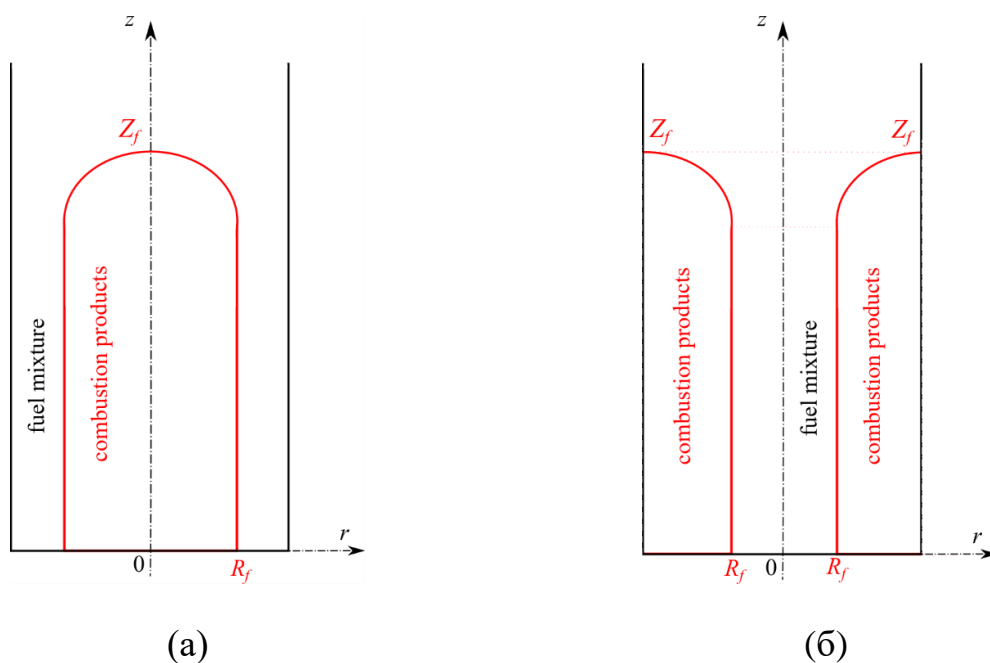


Рис. 6 – Схематическое изображение: а - «пальцеобразного» и б - «обратного пальцеобразного» пламен в канале.

В рассматриваемой задаче скорость пламени значительно меньше скорости звука, что позволяет упростить математическую модель и пренебречь сжимаемостью среды [87]. Тогда для описания движения газа в областях продуктов сгорания и горючей смеси можно воспользоваться уравнением неразрывности. В работе [69] при условии потенциальности течения построена аналитическая модель распространения «пальцеобразного» пламени. При этом течение считается цилиндрически симметричным, а анализу применимости приближения несжимаемости посвящены работы [88, 89].

Положение фронта пламени определяется из уравнений в дифференциальной форме:

$$\begin{cases} \frac{dR_f}{dt} = \theta S_L - (\theta - 1) S_L \frac{R_f^2}{R_c^2} \\ \frac{dZ_f}{dt} = 2(\theta - 1) S_L \frac{R_f}{R_c^2} Z_f + \theta S_L \end{cases} \quad (1)$$

В случае неустойчивого пламени скорость пламени  $S_L$  заменяется средним значением  $S_{DL}$ , которое может зависеть от времени и размера распространения фронта пламени. В [90] предложена следующая зависимость:

$$S_{DL} = S_L^n \left( \frac{\theta(\theta-1)^2}{n\delta_{th}((\theta-1)^2 + (\theta+1)\theta \ln \theta)} \right)^{n-1} t^{n-1} = \alpha t^{n-1}, \quad (2)$$

где  $n$  – показатель степени в степенном законе ускорения сферически расширяющегося пламени,  $\delta_{th}$  – тепловая толщина фронта пламени.

Подставив зависимость (2) в систему (1) и проинтегрировав с начальными условиями  $R_f(0) = 0$ ,  $Z_f(0) = 0$ , получено точное решение:

$$\begin{cases} R_f = \frac{\sqrt{\theta} R_c}{\sqrt{\theta-1}} \tanh(\beta t^n) \\ Z_f = \frac{\sqrt{\theta} R_c}{2\sqrt{\theta-1}} \sinh(2\beta t^n) \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } \beta = \frac{\sqrt{(\theta-1)}}{\sqrt{\theta} R_c \delta_{th}^{n-1}} \left( 1 + \frac{(\theta+1)}{(\theta-1)^2} \theta \ln \theta \right)^{1-n} \left( \frac{\theta}{n} S_L \right)^n.$$

Данное решение первоначально было получено в [69] и экспериментально подтверждено в [91].

Схема системы координат и форма пламени при распространении «обратного пальцеобразного» пламени показаны на Рис. 6 (б). В сценарии распространения «обратного пальцеобразного» пламени воспламенение происходит по окружности на закрытом конце канала. По соображениям симметрии задачу о распространении пламени по стенке открытого с обеих сторон канала можно свести к задаче о распространении «пальцеобразного пламени». Отличие заключается в том, что продукты сгорания располагаются у стенок, а горючая смесь — у оси канала.

Приближенная модель «обратного пальцеобразного» пламени представляет фронт пламени в виде цилиндрической области, называемой «юбкой», и полутороидальной области. Полные решения приведены в работе [81].

Граничные условия на стенках и оси представимы следующим образом:

$$\begin{cases} u_{ru}(0, z) = 0 \\ u_{ru}(R_c, z) = 0 \\ u_{zu}(r, 0) = 0 \\ u_{rb}(R_c, z) = 0 \\ u_{zb}(r, 0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

По аналогии с системой уравнений (1) Скорости радиуса и переднего конца пламени в дифференциальной форме можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dR_f}{dt} = -(\theta - 1) S_{DL} \frac{R_f^2}{R_c^2} - S_{DL} \\ \frac{dZ_f}{dt} = 2(\theta - 1) S_{DL} \frac{R_f}{R_c^2} Z_f + \theta S_{DL} \end{cases} \quad (5)$$

Подставив зависимость (2) в систему (5) и проинтегрировав с начальными условиями  $R_f(0) = R_c$ ,  $Z_f(0) = 0$ , получим точное решение:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_f = \frac{R_c}{\sqrt{\theta-1}} \frac{\sqrt{\theta-1} - \tan(\sqrt{\theta}\beta t^n)}{1 + \sqrt{\theta-1} \tan(\sqrt{\theta}\beta t^n)} \\ Z_f = \theta R_c \left[ \sin^2(\sqrt{\theta}\beta t^n) + \frac{1}{2\sqrt{\theta-1}} \sin(2\sqrt{\theta}\beta t^n) \right] \end{array} \right.$$

(6)

#### 1.4 Сравнительный анализ динамики распространения фронта пламени при центральном и периферийном воспламенении

Основные результаты аналитических и экспериментальных исследований фронта пламени различной формы представлены на диаграммах зависимости положения «юбки» ( $R_f$ ) и «кончика» ( $Z_f$ ) фронта пламени от времени. На Рис. 7 и Рис. 8 показаны временные зависимости пройденного расстояния «пальцеобразным» пламенем при концентраций водорода в смеси 12 и 13 об.% соответственно.

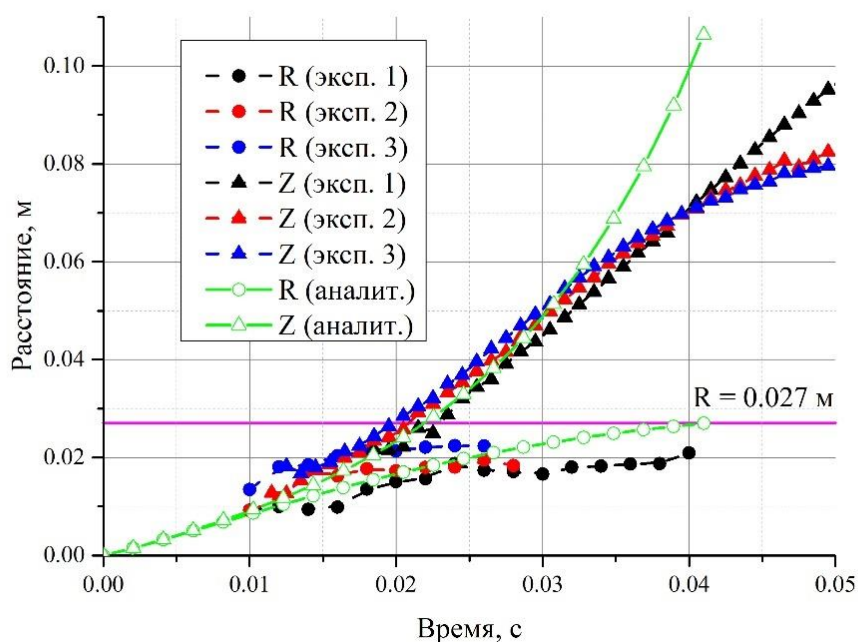


Рис. 7 – Экспериментальные и аналитически полученные зависимости положения «кончика» и «юбки» пламени 12 об.% смеси в полуоткрытом канале круглого сечения при центральном воспламенении.

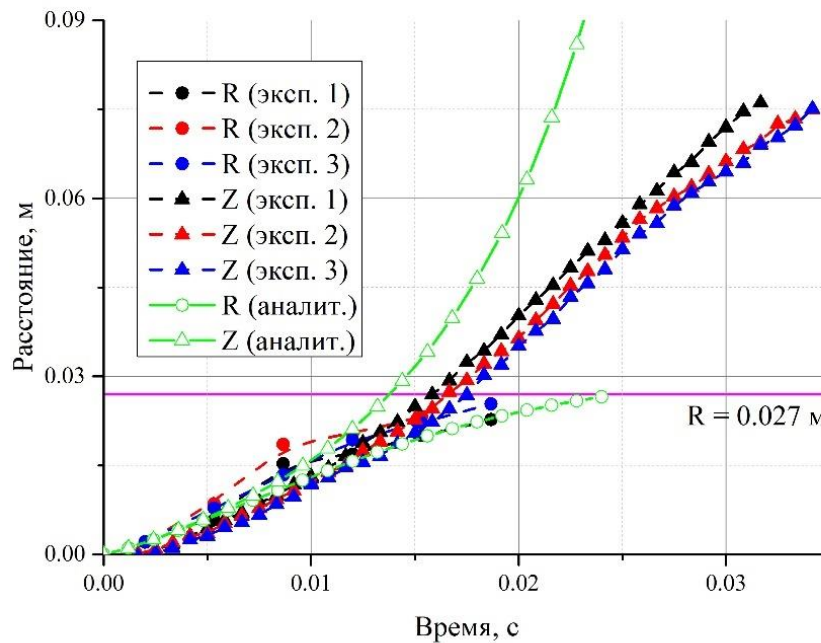


Рис. 8 – Экспериментальные и аналитически полученные зависимости положения «кончика» и «юбки» пламени 13 об.% смеси в полуоткрытом канале круглого сечения при центральном воспламенении.

На Рис. 7 и Рис. 8 распространяющегося «пальцеобразного» пламени заметна разница в скорости распространения на более позднем этапе. Этот эффект обуславливается упрощениями, принятыми в аналитической модели. Предлагаемая модель не учитывает шероховатость стенок трубы. Пограничный слой также не рассматривается и не учитывается теплоотвод на границе со стенками трубы. Эти ограничения модели могут привести к тому, что аналитически рассчитанное расстояние, пройденное фронтом пламени до касания стенок, уменьшится.

Это предположение могут подтвердить графики на Рис. 9 и Рис. 10, на которых показана динамика распространения «обратного пальцеобразного» фронта пламени в смесях с концентрацией водорода 12 и 13 об.%, соответственно. Геометрия распространения «обратного пальцеобразного» пламени меньше зависит от граничных условий на стенках трубы. «Обратное пальцеобразное» пламя контактирует со стенками сразу после возгорания и

продолжает распространяться вдоль стенок. «Пальцеобразное» пламя на ранних стадиях распространяется, не касаясь стенок.

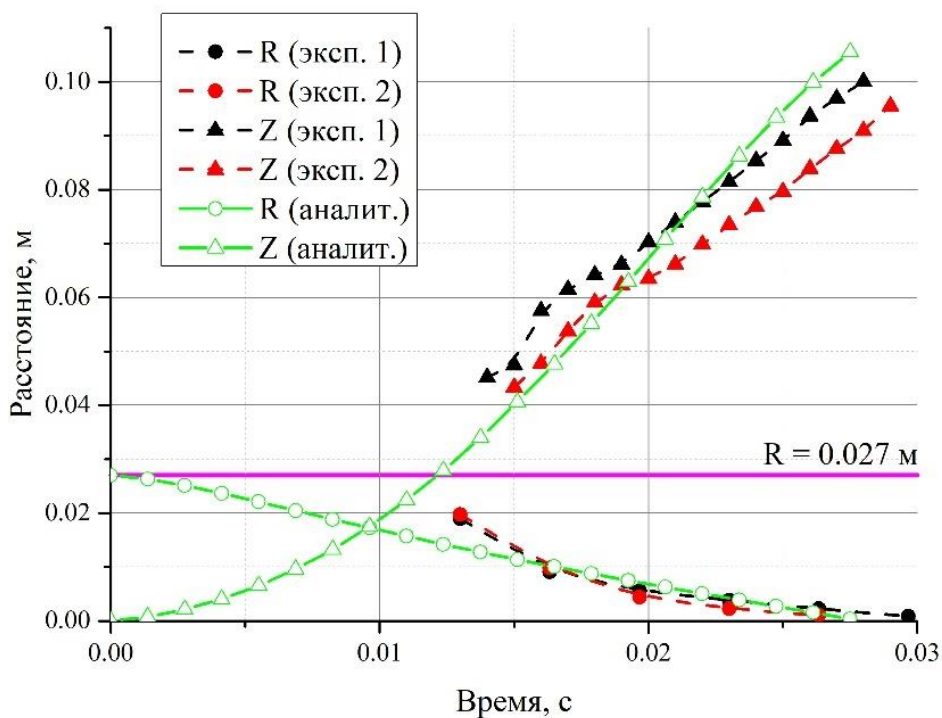


Рис. 9 – Экспериментальные и аналитически полученные зависимости положения «кончика» и «юбки» пламени 12 об.% смеси в полуоткрытом канале круглого сечения при кольцевом воспламенении.



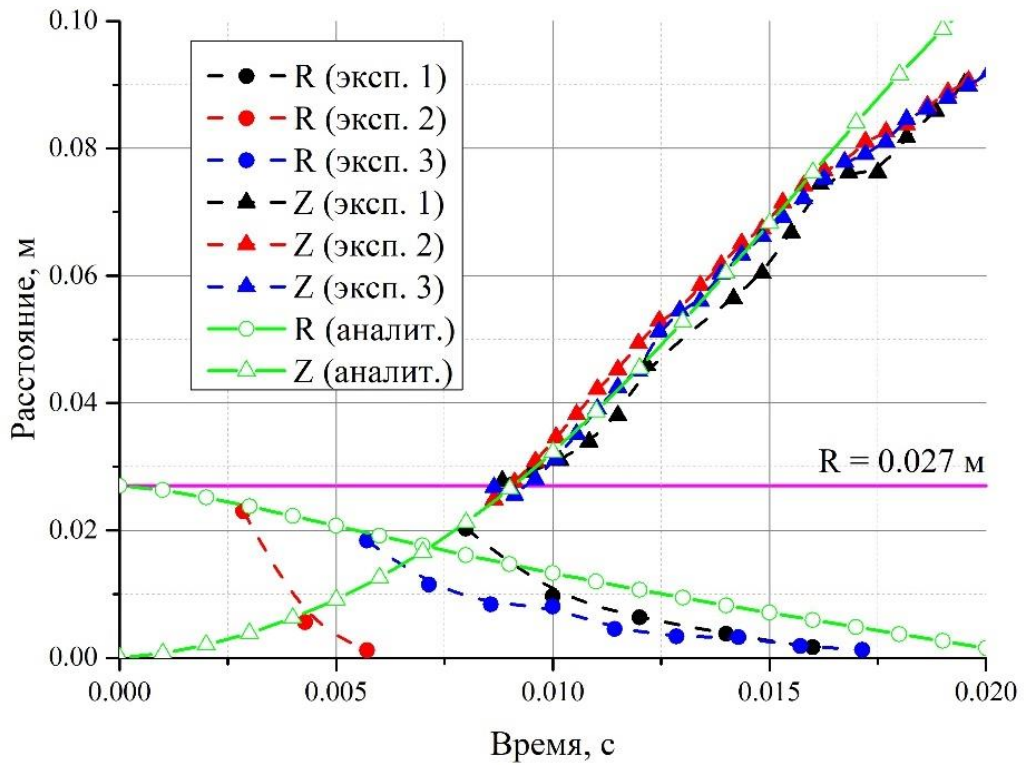


Рис. 10 – Экспериментальные и аналитически полученные зависимости положения «кончика» и «юбки» пламени 13 об.% смеси в полуоткрытом канале круглого сечения при кольцевом воспламенении.

Сравним скорости распространения пламени на стадии сферического распространения для случаев «пальцеобразного» и «обратного пальцеобразного» пламен. Сферическая неограниченная скорость пламени [69]:

$$v_{sph} = n\beta \frac{\sqrt{\theta} R_c}{\sqrt{(\theta-1)}} t^{n-1}. \quad (7)$$

Та же скорость распространения «пальцеобразного» пламени составляет:

$$v_{ff} = \frac{\beta n \sqrt{\theta} R_c}{\sqrt{\theta-1}} \cosh(2\beta t^n) t^{n-1}. \quad (8)$$

Необходимым условием экстремума скорости является равенство нулю ее производной:

$$\exp(4\beta t^n) = \frac{2\beta n t^{n-(n-1)}}{2\beta n t^{n+(n-1)}}. \quad (9)$$

Левая часть уравнения (9) всегда больше 1, поскольку все показатели степени положительны. Коэффициент  $n$  отвечает за ускорение пламени и всегда больше 1, поэтому правая часть уравнения (9) всегда меньше 1. Таким образом, «пальцеобразное» пламя все время распространяется с ускорением. Максимальное значение скорости будет наблюдаться тогда, когда произойдет переход к «тюльпанообразному» пламени.

Скорость распространения «обратного пальцеобразного» пламени можно рассчитать следующим образом:

$$v_{rff} = n\sqrt{\Theta}\beta\Theta R_c \left[ \sin(2\sqrt{\Theta}\beta t^n) + \frac{1}{\sqrt{\Theta-1}} \cos(2\sqrt{\Theta}\beta t^n) \right] t^{n-1}. \quad (10)$$

Ускорение меняет знак с положительного на отрицательный за время, равное:

$$t_{rff,max} = \left[ \frac{1}{2\sqrt{\Theta}\beta} \operatorname{atan}(\sqrt{\Theta-1}) \right]^{1/n}. \quad (11)$$

Максимальное значение скорости «обратного пальцеобразного» пламени в это время составляет:

$$v_{rff,max} = \frac{n\beta^{1/n}\Theta^{3/2+1/2n}R_c}{\sqrt{\Theta-1}} \left( \frac{1}{2} \operatorname{atan}(\sqrt{\Theta-1}) \right)^{1-1/n}. \quad (12)$$

Режим распространения «пальцеобразного» пламени соблюдается до момента гашения юбки пламени на стенке канала. Этот момент можно получить из первого уравнения системы (3).

$$t_{end} = \left( \frac{1}{2\beta} \ln \left( \frac{\sqrt{\Theta} + \sqrt{\Theta-1}}{\sqrt{\Theta} - \sqrt{\Theta-1}} \right) \right)^{1/n}. \quad (13)$$

К этому времени «кончик» пламени преодолевает расстояние:

$$Z_{ff,end} = \Theta R_c. \quad (14)$$

Скорость «пальцеобразного» пламени к моменту касания «юбки» о стенку максимальна и составляет:

$$v_{ff,end} = \frac{n\sqrt{\Theta}(2\Theta-1)\beta^{1/n}R_c}{\sqrt{\Theta-1}} \left( \frac{1}{2} \ln \left( \frac{\sqrt{\Theta}+\sqrt{\Theta-1}}{\sqrt{\Theta}-\sqrt{\Theta-1}} \right) \right)^{(n-1)/n}. \quad (15)$$

Режим распространения «обратного пальцеобразного» пламени наблюдается до тех пор, пока не схлопнется юбка пламени. Этот момент времени можно получить из первого уравнения системы (6).

$$t_{rff,end} = \left[ \frac{1}{\sqrt{\Theta}\beta} \operatorname{atan}(\sqrt{\Theta-1}) \right]^{1/n}. \quad (16)$$

Пламя проходит следующее расстояние в осевом направлении, пока «юбка» не коснется стенки:

$$Z_{rff,end} = \Theta R_c. \quad (17)$$

$$\text{Его скорость: } v_{rff,end} = n \frac{\Theta^{(2n+1)/2n}}{\sqrt{\Theta-1}} \beta^{1/n} R_c \operatorname{atan}^{(n-1)/n}(\sqrt{\Theta-1}).$$

Для сравнения скорости рассчитывается распространение пламени в открытом пространстве до достижения радиуса  $\Theta R_c$ . Требуемое время составляет:

$$t_{sph,end} = \left( \frac{\sqrt{\Theta}\sqrt{\Theta-1}}{\beta} \right)^{1/n}. \quad (18)$$

Скорость пламени можно рассчитать следующим образом:

$$V_{sph,end} = n\beta^{1/n} \frac{\Theta^{1-1/2n}(\Theta-1)^{1-1/2n}}{\sqrt{\Theta-1}} R_c. \quad (19)$$

Таблица 1. Скорости «пальцеобразного» и «обратного пальцеобразного» пламен при переходе к «тюльпанообразному» пламени, а также максимальные значения скорости «обратного пальцеобразного» пламени. Все величины нормированы на скорость сферического пламени радиусом  $\Theta R_c$ .

Состав смеси, об.%	$V_{ff,end}/V_{sph,end}$	$V_{rff,end}/V_{sph,end}$	$V_{rff,max}/V_{sph,end}$
10	5,56	3,73	5,97
12	6,20	4,14	7,02

13	6,50	4,33	7,54
15	7,09	4,72	8,62
20	8,44	5,62	11,28
30	10,59	7,10	16,16
40	9,76	6,52	14,20
50	8,82	5,88	12,09
60	7,76	5,16	9,89

Эксперименты, проведенные в закрытой камере сгорания демонстрируют качественно схожие результаты. На Рис. 11 представлены теневые изображения фронта пламени в закрытом канале квадратного сечения.

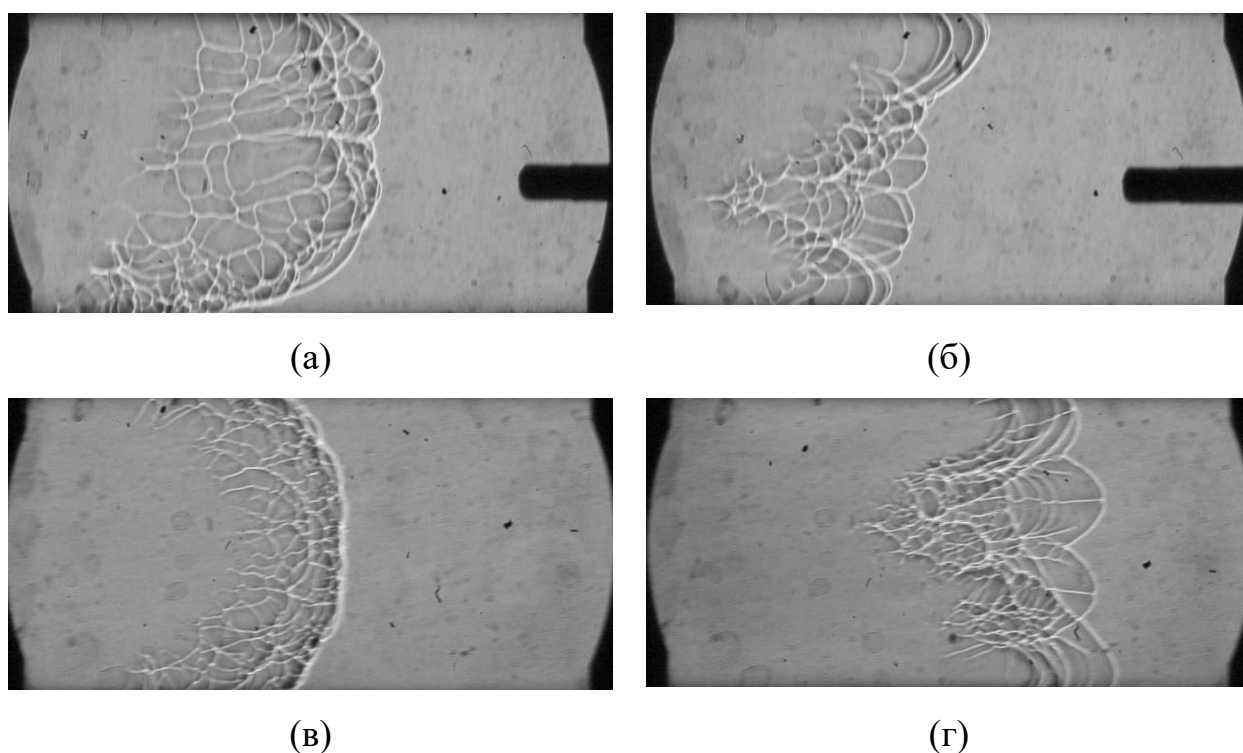


Рис. 11 – Теневые изображения фронта пламени в закрытом канале: а – 12 об.% водородно-воздушная смесь при центральном воспламенении, б – 12 об.% водородно-воздушная смесь при периферийном воспламенении, в – 15 об.% водородно-воздушная смесь при центральном воспламенении, г – 15 об.% водородно-воздушная смесь при периферийном воспламенении.

В экспериментах с 12 об.% содержанием водорода в водородно-воздушной смеси фронт пламени при центральном и периферийном воспламенении испытывает искривление вследствие всплытия. Поэтому далее будет рассматриваться распространение пламени более богатой, 15 об.% водородно-воздушной смеси.

При распространении «обратного пальцеобразного» пламени, полученного при периферийном воспламенении, наблюдается более высокая скорость. На Рис. 12 представлена  $Z_f$ - $t$ -диаграмма распространения фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 об.% для 7 экспериментов с «обратным пальцеобразным» пламенем и 6 для «пальцеобразного» пламени. «Обратное пальцеобразное» пламя достигает конца окна наблюдения почти за 60 мс, тогда как «пальцеобразному» пламени требуется 80 мс. Так, средняя скорость «обратного пальцеобразного» пламени в 1,4 раза выше.

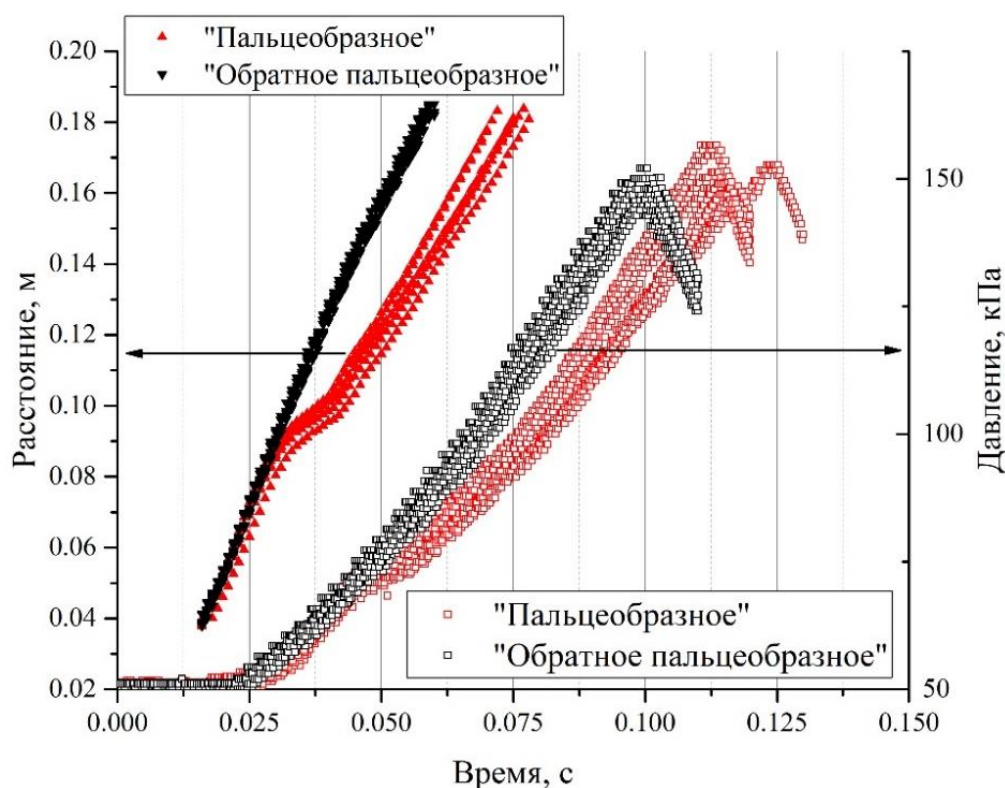


Рис. 12 – Экспериментальные  $Z$ - $t$ -зависимости распространяющегося «пальцеобразного» и «обратного пальцеобразного» пламен для 15 об.%

водородно-воздушной смеси в закрытой камере. Треугольниками по левой оси показаны зависимости пройденного расстояния от времени, квадратами по правой оси показано давление, регистрируемое датчиком.

При этом наблюдался более высокий темп роста давления. На Рис. 12 также показаны зависимости давления от времени при начальном давлении, равном 0,5 ата, по 5 экспериментов на каждый режим распространения. Давление имеет пиковые значения для обоих случаев. Продукты сгорания начинают остывать сразу после соприкосновения со стенками камеры. При этом пиковое давление меньше давления, обусловленного известным коэффициентом расширения продуктов сгорания, в 1,5 раза. Начиная с 30 мс можно наблюдать значительную скорость роста распространения «обратного пальцеобразного» пламени в отличие от классического «пальцеобразного», так что время достижения максимального давления в первом случае меньше на 10 мс.

Одной из причин более быстрого распространения «обратного пальцеобразного» пламени может быть следующая. На начальном этапе, сразу после момента центрального зажигания, радиус фронта пламени меньше внутреннего радиуса трубки, фронт пламени имеет полусферическую форму. Скорость такого пламени равна  $\Theta_{SL}$ . Площадь фронта пламени такой формы зависит от времени, так как площадь полусферы равна  $2\pi R_f^2$ . «Пальцеобразное» пламя в момент зажигания также не замечает отклонения потока и распространяется с той же скоростью  $\Theta_{SL}$ . При этом его площадь зависит от времени как  $\pi^2 R_f R_c$  и по форме совпадает с 1/4 тора с внутренним радиусом трубки. Следовательно, соотношение площадей передней части при данной геометрии равно  $R_f/R_c$ . Поскольку начальная скорость горения «обратного пальцеобразного» пламени выше, это приводит к более быстрому втягиванию пламени в канал.

Для сформированного «пальцеобразного» пламени скорость вдоль оси  $Z$  в основном определяется площадью юбки, которая равна  $2\pi R_f(Z_f - R_f)$ .  $R_f$  в случае классического «пальцеобразного» пламени со временем увеличивается, а в случае «обратного» – уменьшается. Это приводит к тому, что после схлопывания «обратного пальцеобразного» пламени или контакта юбки классического «пальцеобразного» пламени скорость «обратного» становится меньше скорости кончика пламени.

На Рис. 13 показан сравнительный график распространения пламени вдоль оси  $Z$  для концентраций водорода 12 и 13 об.% для каждой геометрии пламени.

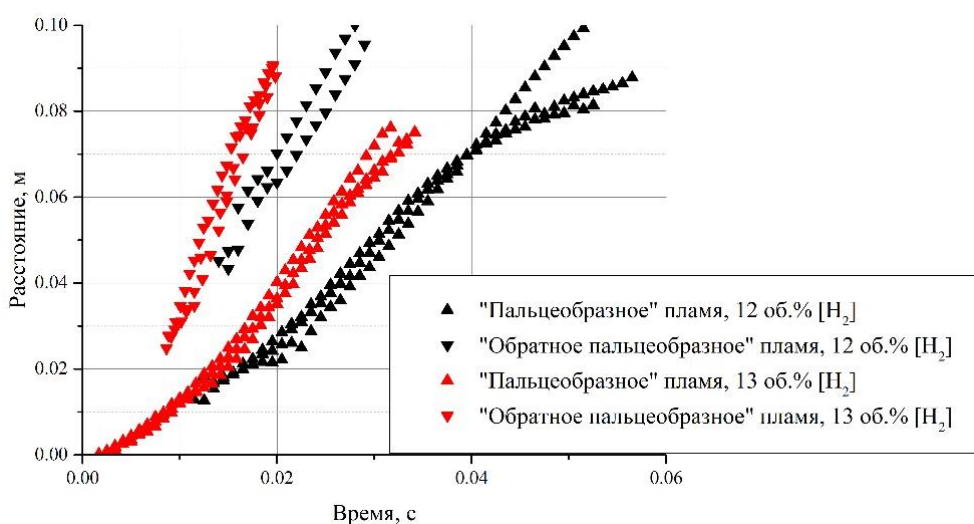


Рис. 13 – Экспериментальные зависимости «пальцеобразного» и «обратного пальцеобразного» в водородно-воздушных смесях с 12 и 13 об.% содержания водорода в полуоткрытом канале концом.

Была проведена линейная аппроксимация экспериментальных диаграммы на Рис. 13, а наклоны для каждой группы экспериментов усреднялись. Полученные коэффициенты, представленные в Таблица 2, соответствуют средней скорости фронта пламени. Средняя скорость «обратного пальцеобразного» пламени с концентрацией водорода 12 об.% выше в 1,2 раза скорости распространения классического «пальцеобразного» пламени. При концентрации водорода в водородно-воздушной смеси 13 об.%

аналогичный прирост скорости составляет 2 раза. Это связано с высокой чувствительностью ламинарной скорости горения к содержанию водорода. При изменении концентрации водорода от 12 до 13 об.% ламинарная скорость горения увеличивается в 1,26 раза. Также происходит увеличение в 1,05 раза степени расширения и уменьшение в 1,15 раза толщины пламени.

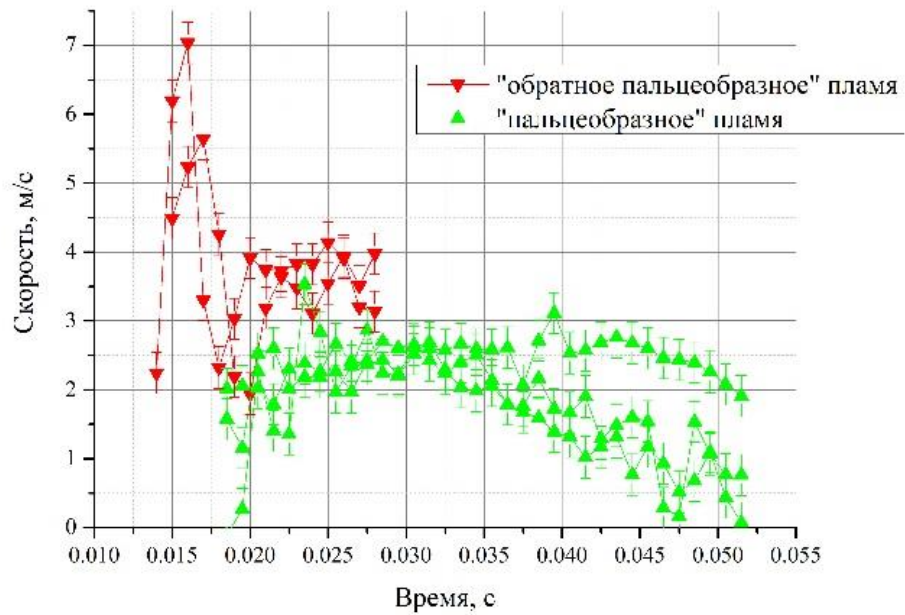
Таблица 2. Средние скорости фронта пламени

Воспламенение	Состав смеси, об.%	Средняя скорость, м/с
Центральное	12	2,1
Кольцевое	12	2,5
Центральное	13	3,6
Кольцевое	13	6,2

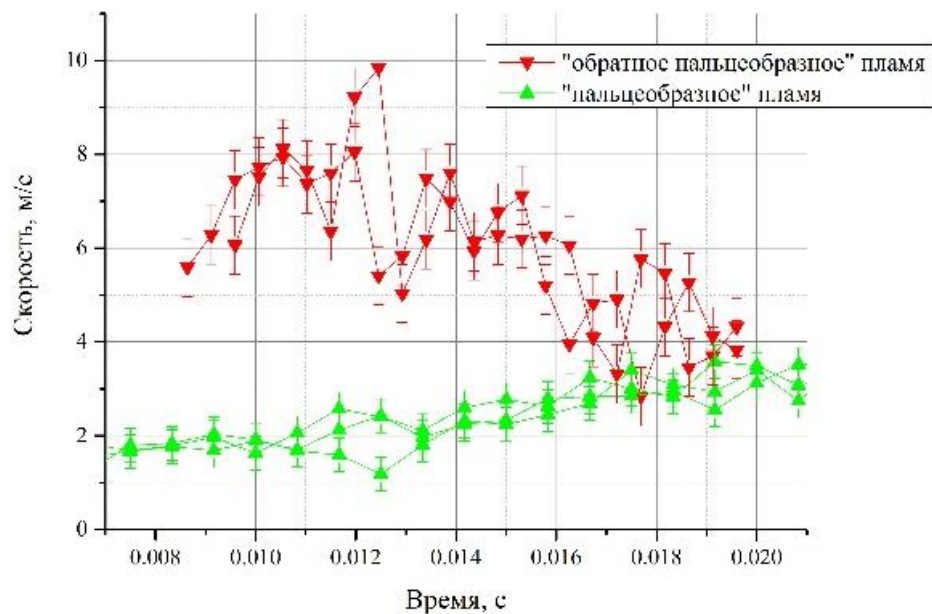
Другая причина различий в скорости распространения может касаться стадий распространения «пальцеобразного» и «обратного пальцеобразного» пламен. На Рис. 14 представлены временные зависимости скорости распространения фронта пламени в смесях с концентрацией водорода 12 об.% (а на Рис. 14) и 13 об.% (б на Рис. 14). Скорости получены численным дифференцированием координат фронта пламени, соответствующих графикам на Рис. 7, Рис. 8, Рис. 9 и Рис. 10. Погрешность оценена как отношение погрешности координаты к шагу по времени. Первоначальное ускорение «пальцеобразного» пламени вызвано быстрым увеличением площади поверхности «юбки». На этом этапе скорость растяжения фронта пламени очень высока, поэтому пламя распространяется гладко. Далее происходит замедление за счет гашения пламени «юбки» на стенках и уменьшения площади фронта. В экспериментах с 12 об.% содержанием водорода расстояние до касания юбкой стенок меньше, чем для 13 об.% смеси. Напомним, что расстояние до касания стенок, согласно аналитической модели, равняется  $\Theta R_c$ . Распространение «обратного пальцеобразного»



пламени лишено стадии распространения полусферического пламени и не испытывает ускорений и замедлений за счет изменения формы его поверхности.



(а)



(б)

Рис. 14 – Зависимость положения «кончика» «пальцеобразного» пламени от времени в смеси с 12 (а) и 15 (б) об.% содержанием водорода в закрытой камере.

На ограниченной длине, равной произведению коэффициента расширения на радиус канала, то есть до схлопывания обратного пальцеобразного фронта пламени, периферийное зажигание обеспечивает более высокую скорость распространения, чем центральное зажигание. Этот эффект наблюдается в трубках с открытым концом и закрытой квадратной камере, таким образом, преимущество периферийного зажигания не зависит от геометрии канала.

## 1.5 Влияние ширины кольцевого зазора на динамику фронта пламени в трубе

Аналитическое решение, показанное ранее, построено в приближении воспламенения в кольцевой области нулевой ширины. В условиях реального канала зажигание происходит в расположенной перед пластиной форкамере. К моменту зажигания в исследуемом канале форкамера заполнена продуктами сгорания при повышенном давлении, которое зависит от ширины зазора. Давление в форкамере определяет скорость струи продуктов сгорания, которая задает начальную осевую скорость пламени. Таким образом, уменьшение ширины зазора сокращает площадь поперечного сечения, но повышает скорость зажигающей кольцевой струи.

Рассмотрим влияние ширины зазора при кольцевом воспламенении в полуоткрытом канале круглого сечения на ускорение фронта пламени водородно-воздушных смесей. Для формирования различных зазоров кольцевого зажигания канал (2 на Рис. 2) был модифицирован. Вместо закрепленной на металлические штифты пластины в канал помещались изготовленные методом 3D-печати специальные пластины диаметром меньше внутреннего диаметра трубы (Рис. 15).

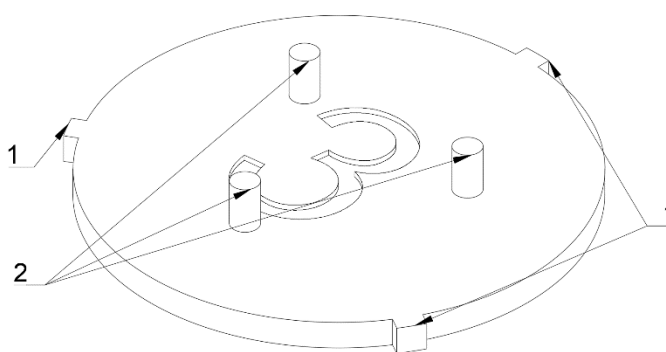


Рис. 15 – Схематическое изображение пластины, формирующей кольцевой зазор шириной 3 мм. 1 – краевые упоры, формирующие зазор, 2 – торцевые упоры.

Пластины были оборудованы специальными упорами по краям (1 на Рис. 15) – для симметричного расположения пластины в трубе, а также с торца (2 на Рис. 15) – для обеспечения повторяемости расстояния между свечой зажигания и пластиной. В качестве основного параметра, определяющего размер щели, было выбрано отношение  $\sigma/S$  в процентах, где  $\sigma$  – площадь пластины, формирующей кольцевую щель,  $S$  – площадь поперечного сечения канала. Положение и форма фронта пламени определялись с помощью теневой визуализации прибором ИАБ-451 (3 на Рис. 2) и высокоскоростной съемки видеокамерой Phantom VEO 710S (4 на Рис. 2).

Для исследования влияния ширины кольцевого зазора при кольцевом воспламенении на динамику распространения пламени была проведена серия экспериментов в водородно-воздушных смесях с содержанием водорода 15 и 20 об.% при ширине кольцевого зазора, через который происходит воспламенение, 0,5, 1, 1,5, 2, 3 и 4,5 мм, то есть, при значениях  $\sigma/S$  составляющих 96,3, 92,7, 89,2, 85,7, 79,0 и 69,4%, соответственно. В качестве сравнения также для каждой смеси рассмотрим эксперименты при воспламенении в центре закрытого конца канала.

На Рис. 16 представлены зависимости положения фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 об.% вдоль оси трубы от времени при центральном и кольцевом ( $\sigma/S=89,2\%$ ) воспламенении.

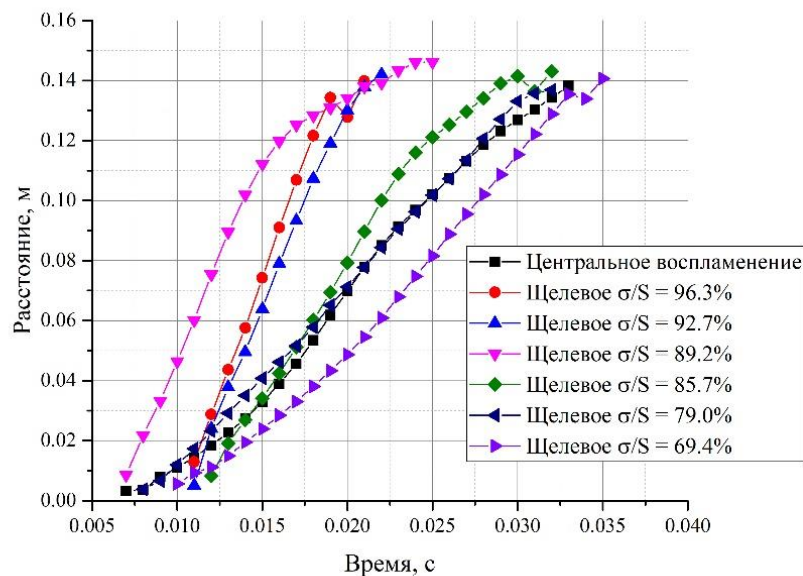


Рис. 16 – Зависимости положения фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 об.% вдоль оси трубы от времени при центральном и кольцевом воспламенении.

На Рис. 17 представлены значения максимальной осевой скорости фронта пламени в канале при центральном и кольцевом воспламенении –  $v$ , нормированные на скорость плоского пламени:  $S_L \Theta$ . Видно, что влияние степени перекрытия на скорость фронта пламени немонотонно и имеет максимум при величине  $\sigma/S=92,7\%$ .

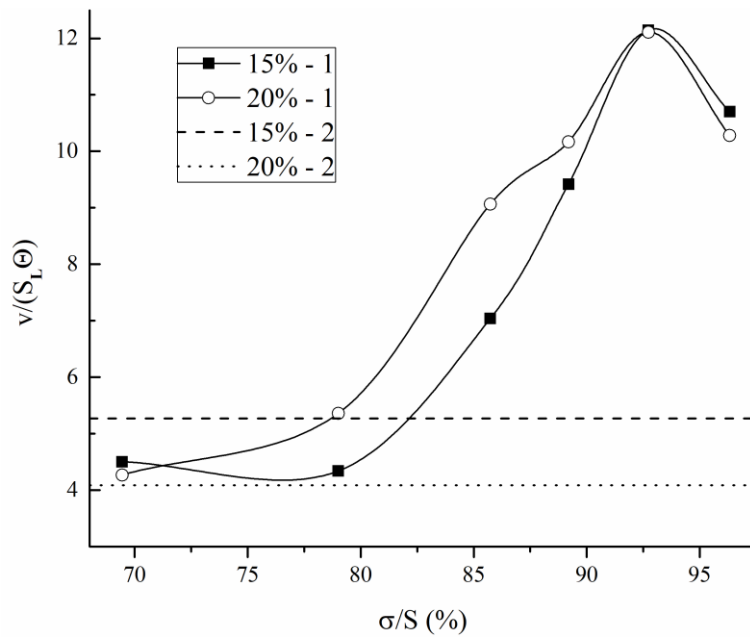


Рис. 17 – Зависимость максимальной приведенной скорости распространения фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 и 20 об.% вдоль оси трубы от степени перекрытия (1). Горизонтальные линии (2) соответствуют максимальной приведенной скорости при центральном зажигании.

«Схлопывание» фронта «обратного пальцеобразного» пламени приводит к его замедлению по причине резкого уменьшения площади фронта пламени и, как следствие, уменьшению потребления горючего. Отношение скорости фронта пламени в конце видимой области к максимальной скорости фронта пламени при центральном воспламенении и кольцевом воспламенении с различной шириной щелевого зазора для водородно-воздушных смесей с содержанием водорода 15 и 20 об.% представлено в Таблица 3. Согласно аналитическим моделям, фронт классического «пальцеобразного» пламени и «обратного пальцеобразного» пламени существуют на расстоянии от точки воспламенения до  $l \leq \Theta \cdot R_c$ , где  $R_c$  – радиус канала. Так, в канале диаметром 54 мм для водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 об.%  $l \approx 125$  мм. Данная величина позволяет зарегистрировать момент «схлопывания» с использованием описанной экспериментальной установки, следовательно оценить скорость

распространения фронта пламени в этот момент, а также ее максимальное значение.

Обнаружено, что в смеси с содержанием водорода 15 об.% замедление в конце распространения фронта пламени при кольцевом воспламенении с  $\sigma/S=85,7\%$  в 5.9 раз больше, чем при центральном воспламенении. В смеси с содержанием водорода 20 об.% эффект выражен слабее, что связано с более высокой (более, чем в 3 раза по теории взрыва в частично открытом объеме) скоростью выходящей из форкамеры воспламеняющей струи.

Таблица 3. Отношение скорости фронта пламени в конце видимой области (3 калибра) к максимальной скорости фронта пламени при центральном воспламенении и кольцевом воспламенении с различной шириной щелевого зазора для водородно-воздушных смесей с содержанием водорода 15 и 20 об.%.

Тип воспламенения	15 об.%	20 об.%
Центральное	0,47	0,93
Кольцевое, $\sigma/S = 96.3\%$	0,17	0,67
Кольцевое, $\sigma/S = 92.7\%$	0,31	0,67
Кольцевое, $\sigma/S = 89.2\%$	0,10	0,66
Кольцевое, $\sigma/S = 85.7\%$	0,08	0,66
Кольцевое, $\sigma/S = 79.0\%$	0,28	0,68
Кольцевое, $\sigma/S = 69.4\%$	0,36	0,86

## Выводы по Главе 1

Эксперименты по периферийному воспламенению водородно-воздушной смеси в каналах выявили структуру «обратного пальцеобразного» пламени. «Обратное пальцеобразное» пламя в зазоре шириной 5 мм на начальном этапе до трех калибров для смесей с 12 об.% и 13 об.% содержанием водорода распространяется с более высокой скоростью, чем классическое «пальцеобразное» пламя, полученное при центральном зажигании смеси в канале: в 2,3 раза в смеси с 12 об.% содержанием водорода и в 2,8 раза в смеси с 13 об.% содержанием водорода.

Построена аналитическая модели «обратного пальцеобразного» пламени на основе уравнения неразрывности для несжимаемой среды. Выявлено, что «пальцеобразное» пламя на протяжении всего своего существования испытывает ускорение, прежде чем перейти в режим горения в виде «тюльпанообразного» пламени. Напротив, «обратное пальцеобразное» пламя достигает максимальной скорости на более ранней стадии распространения и начинает замедляться, прежде чем происходит его схлопывание. Для стехиометрической смеси расчетная максимальная скорость «пальцеобразного» пламени, достигаемая перед переходом в «тюльпанообразное», в 1,5 раза ниже максимальной скорости «обратного пальцеобразного» пламени. При этом максимальная скорость «обратного пальцеобразного» пламени перед схлопыванием 1,5 раза ниже максимальной скорости «пальцеобразного» пламени в конце. Эта особенность периферийного зажигания может быть использована в камерах сгорания определенных размеров. Эффект замедления «обратного пальцеобразного» пламени может уменьшить детонацию в двигателях внутреннего сгорания без потерь мощности. Что касается классических ускорителей пламени в устройствах, где необходимо осуществить переход от горения к детонации, то сочетание классических ускорителей пламени (спираль Щелкина, барьеры



или препятствия) и периферийного воспламенения может сократить длину перехода горения в детонацию.

Исследование влияния толщины кольцевого зазора показывает, что отношение площади пластины, формирующей кольцевую щель, к площади поперечного сечения канала (величина, аналогичная коэффициенту перекрытия), равное 92.7%, обеспечивает максимальную скорость фронта пламени на участке канала длиной до трех диаметров для фронта пламени водородно-воздушных смесей с 15 и 20 об. % содержанием водорода. Определены отношения скоростей фронта пламени в 15%-ной водородно-воздушной смеси в момент схлопывания обратного пальцеобразного пламени к максимальным скоростям фронта пламени при центральном и кольцевом воспламенении. Получено снижение скорости пламени при кольцевом воспламенении в 5.9 раз по сравнению с центральным. Результаты исследования показывают, что кольцевое воспламенение может быть использовано как для снижения детонационно-подобного эффекта при работе двигателей внутреннего сгорания, так и для увеличения начальной скорости фронта на ранних этапах ускорения пламени.

## **Глава 2. Горение водородно-воздушных смесей в плоских зазорах.**

Другим ключевым аспектом исследований является изучение режимов горения водорода в плоских тонких зазорах. Распространение водородно-воздушного пламени в плоских зазорах является и играет ключевую роль в различных областях, включая MEMS (микроэлектромеханические системы) технологии [92] и разработку топливных ячеек [93]. В MEMS устройствах, таких как микрогорелки и турбины, плоские зазоры используются в качестве основных камер сгорания. С другой стороны, в топливных ячейках, которые являются перспективным источником чистой энергии, плоские зазоры играют важную роль в процессах окисления водорода и взаимодействия с воздухом.

Изучение процесса распространения пламени в таких геометрически ограниченных условиях имеет критическое значение для оптимизации процессов сгорания и повышения эффективности систем, особенно в микромасштабных приложениях. Несмотря на значительные усилия, предпринятые в этой области, многие аспекты остаются недостаточно исследованными, особенно в контексте безопасной эксплуатации подобных устройств. По мере углубления в эту тему, ученые изучают различные геометрии слоев, эффективность систем интеграции, а также прочность и надежность топливных ячеек [94]. В данной работе рассматривается распространение пламени в плоских зазорах для решения задач безопасного использования водородных топливных ячеек.

Распространению пламени в замкнутых объемах микроканальной геометрии, таких как закрытые трубки [95], открытых узких трубках [96], щелевые горелки [97] посвящено значительное число работ. Исследуется также влияние поверхности стенок каналов [98] и различных вставок [38] на распространение фронта пламени в узких каналах, как открытых, так и закрытых. Обособленно рассматриваются исследования по распространению фронта пламени в плоских узких зазорах – дисковых горелках с центральным

воспламенением [43]. Подобные зазоры, сформированные между плоскими пластинами, также называют тонкими слоями или плоскими зазора. Иногда используется название ячейки Хеле-Шоу, по аналогии с экспериментальной установкой для исследования вязкий пальцев [42]. Поведение фронта пламени, распространяющегося в тонком зазоре, не поддается точному сравнению с распространением в канале, что требует проведения отдельных экспериментов.

## **2.1 Режимы горения бедных и ультра-бедных водородно-воздушных смесей в плоских зазорах**

На данный момент существует два подхода к изучению горения в плоских зазорах. В первом случае рассматриваются режимы горения в зависимости от концентрации горючего в смеси и толщины зазора. Чаще речь идет об ультра-бедных водородно-воздушных смесях. В зависимости от концентрации водорода водородно-воздушные смеси классифицируются на ультра-бедные (от 4-6 об.% до 9-10 об.% водорода в водородно-воздушной смеси), бедные (менее 15 об.%), около стехиометрические (менее 29,6 об.%), стехиометрическая (29,6 об.%) и богатые (более 29,6 об.%)]. В другом случае рассматриваются зависимость динамики фронта бедного водородно-воздушного пламени от физических параметров зазора, таких как: толщина, теплопоглощение и наличие препятствий.

Так, в работе [38] описываются результаты экспериментов по изучению различных режимов горения бедных (4 – 20 об.% водорода в смеси) и стехиометрических (30 об.% водорода в смеси) смесей водорода с воздухом в плоском зазоре от 1 до 10 мм с внутренним покрытием металлическом сеткой с размером ячейки 6,5x6.5x0,6мм в один или два слоя и без сетки. Экспериментальная установка представляла из себя прямоугольный канал 900x200 мм, стенки которого были выполнены из органического стекла, а зазор между стенка изменялся сменными рамками из ПВХ. Органическое стекло позволило использовать метод теневой визуализации водородно-

воздушного пламени. Заполнение канала газом осуществлялось замещением воздуха из зазора предварительно смешанной горючей смесью, путем подачи газовой смеси под давлением.

Авторы обнаружили, что в гладком канале без препятствий (сетки) пламя не может достигнуть скорости звука и осуществить перехода горения в детонацию. Критическая толщина слоя для распространения детонации должна быть больше 0,4 размера детонационной ячейки. Кроме того, авторы исследовали механическую реакцию стенок из плексигласа и алюминия на внутреннее давление сгорания. Важно отметить, что авторами обнаружено, что в канале 1 мм, заполненном металлической сеткой на 100% объема, было зарегистрировано сильное воздействие конденсации пара, приводящее к локальному, а затем глобальному гашению пламени для стехиометрической смеси водород-воздух, а гашение бедных смесей водород-воздух происходит в диапазоне 6 – 12 об.% H<sub>2</sub> в зависимости от толщины слоя.

В работе [99] авторами используется аналогичная экспериментальная установка, расположенная вертикально. Таким образом существенное влияние оказывают гравитационные силы. Схема и принцип действия установки остались прежними. Было обнаружено явление распространения пламени в ультра-бедных смесях на расстояниях, достигаемых только при превышении критических значений скорости пламени. Предположение о том, что ультра-бедные смеси водорода с воздухом не могут сами по себе поддерживать горение, было опровергнуто. В экспериментах были использованы узкие зазоры шириной от 0,3 до 6 мм и объемом от 1 до 100 мл, в которых происходило горение смесей водорода и воздуха с содержанием водорода менее 6 об.%. В результате экспериментов было выяснено, что критическая скорость горения пламени в узких зазорах существенно выше, чем в широких. Отдельный интерес представляла форма фронта пламени. Фронт пламени представлял собой набор «пальцев», распространяющихся по несгоревшей смеси. Авторы отмечали разбиение

пальцев, а также обнаружили режим, когда «лидеры» двигались самостоятельно без бифуркаций.

В работе [37] описываются результаты экспериментов по исследованию поведения водородного пламени в двумерной геометрии. Использовались смеси водород-воздух (7–60 об.% H<sub>2</sub>) и водород-кислород (13–80% H<sub>2</sub>), сгорание которых происходило в зазоре между двумя прозрачными кварцевыми пластинами размером 500x500 мм, расстояние между которыми составляло 2, 4 и 6 мм. Экспериментальная установка заполнялась горючей смесью методом аналогичным работе [38], при этом после вытеснения газа рамка оборачивалась фольгой, допускающей выход газа во время горения. Воспламенение осуществлялось в центре. Для бедных водородно-воздушных смесей (<14 об.% H<sub>2</sub>) были получены отрицательные значения длины Маркштейна, что свидетельствует об увеличении динамики распространения фронта пламени. Результаты также показали, что ламинарная скорость горения сильно зависит от концентрации водорода и размера зазора. Была обнаружена ячеистая структура для смесей водород-воздух в результате двух неустойчивостей пламени: термодиффузионной и гидродинамической. Неустойчивость и увеличение площади пламени приводят к тому, что полученный коэффициент складчатости  $\Xi$  равен 1,2–1,5. Стоит отметить, что данное значение соотносится с теоретически предсказанным основе уравнения Сивашинского [100]. При этом значительного ускорения распространения фронта пламени, а тем более перехода горения в детонацию обнаружено не было.

В статье [101] исследуется влияние концентрации водорода и толщины канала на переход между режимами термоакустических колебаний. В первом режиме колебания давления не сильно влияют на пламя, которое плоско вытягивается и колеблется на определенной частоте до конца канала. Во время перехода к вторичному режиму передняя часть пламени становится более неустойчивой и приобретает характерную пальцеобразную форму. Авторы исследования также обратили внимание на влияние коэффициента

избытка горючего на переход от первичного к вторичному режиму. Критическое значение этого соотношения, при котором происходит переход, составляет 0,36, а критическое значение числа Маркштейна при данных геометрических условиях равно – 1,17. Отмечается, что число Маркштейна оказывается важным показателем для контроля перехода между режимами, поскольку оно монотонно убывает при уменьшении коэффициента избытка горючего. Было изучено влияние толщины камеры сгорания на колебания давления путем изменения ее толщины от 10 мм до 4 мм. Максимальное акустическое давление снижается при уменьшении толщины канала из-за увеличения вязких потерь. Для смесей с коэффициентом избытка горючего равного 0,25 первичные термоакустические колебания восстанавливаются при толщине канала 8 мм.

Работа [39] продолжает освещать серию исследований авторов. В работе используется аналогичная предыдущим работам экспериментальная установка. В работе [39] показаны обобщенные данные распространения водородно-воздушного пламени в плоском зазоре для более чем 300 экспериментов. Авторы обнаружили переход неустойчивого фронта пламени, подверженного гидродинамической неустойчивости Дарье – Ландау в пальцеобразное распространение фронта, присущее фильтрационным режимам горения.

В работе [102] опыты по горению водорода в тонком полузамкнутом слое проводились в открытом снизу прямоугольном канале длиной 2,5 м, имеющем прозрачные боковые стенки, сплошную стенку воспламенения и открытый конец. Канал помещался во взрывную камеру. Данные крупномасштабные исследования, по сравнению с вышеописанными, не позволили авторам столь тщательно приблизиться к визуализации фронта пламени, как в последующих работах. В работе [102] представлены результаты экспериментов по быстрому распространению пламени, переходу горения в детонацию и последующему распространению детонации. Также в данной работе показано взаимодействие быстрого пламени с различной

компоновкой препятствий. Кусок тонкой металлической сетки в перекрытом полузамкнутом плоском слое способствует переходу горения в детонацию для быстрых пламен. Распространение детонации наблюдалось в перекрытых и не загромождённых участках канала.

Изучение плоского пламени также проводится и с водород-кислородными смесями [103] и с углеводородными топливами [43]. Так, в работе [103] авторы провели исследование поведения предварительно смешанных пламен в узких параллельных пластинах, используя экспериментальные и численные методы. Целью исследования было изучение механизмов распространения пламени и зависимости его скорости от расстояния между пластинами. В результате исследования было обнаружено, что уменьшение расстояния между пластинами приводит к увеличению скорости пламени, что может привести к ускоренному распространению пламени и детонации. В работе [43] обнаружено, что скорость пламени зависит от размера зазора и что увеличение размера зазора может приводить к более нестабильному распространению пламени. В экспериментальной установке плоский зазор моделировался между стальной и стеклянной пластинами. Расстояние между пластинами варьировалось и задавалось с помощью регулировочного винта. Метод заполнения пространства горючими газами был аналогичен работам, за исключением, что выходная щель всегда оставалась открытой. Основным отличием горения смесей углеводородов с воздухом заключается в отсутствии явного распада фронта на отдельные элементы. Фронт бедной пропано-воздушной смеси, изученный в работе [104] распространяется в режиме спинового фронта.

Приведенные выше работы, показывают, что задача распространения фронта пламени в узком зазоре не теряет своей актуальности. Исследователями наблюдались как ускорения, так и замедления динамики фронта пламени. Уменьшение ширины плоского зазора приводит к ускорению фронта пламени, однако использование металлической сетки

приводило к замедлению пламени и приводило к полному гашению только при уменьшении зазора.

В [40] высказано предположение, что при горении в плоском зазоре эффекты влияния гравитационных сил на распространение фронта пламени минимизируются. При горении ультра-бедных смесей в плоских зазорах возникают режимы горения в виде разрозненных участков фронта пламени. Одним из таких проявлений исследователи считают [40] шаровые пламена, теоретически предсказанные Зельдовичем [105] и впервые обнаруженные Ronney [106, 107]. Шаровый режим горения, согласно [105] возможен при соблюдении равновесия между подводом горючего и отводом тепла и продуктов сгорания в неподвижной газовой смеси. На Рис. 18 показана схема неподвижного относительно несгоревшей смеси шара пламени [105].

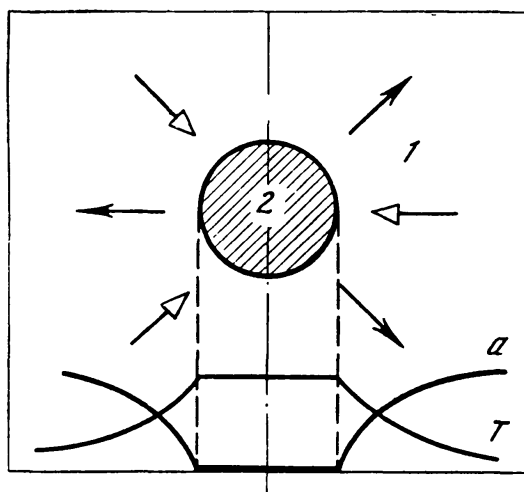


Рис. 18 – Неподвижный относительно горючей смеси шарик, на поверхности которого происходит сгорание по диффузионному механизму. Белые стрелки показывают подвод горючих веществ, черные стрелки – отвод тепла и продуктов сгорания. Внизу показаны распределения температуры и концентрации в радиальном направлении [105].

Условия существования очагов пламени чувствительны к составу смеси, потерям тепла, скорости диффузии недостающего компонента и скорости дрейфа. Шаровый режим горения в [105] описан в стационарном режиме в неподвижной горючей смеси.



Подобные элементы фронта пламени, полученные различными исследователями в плоском зазоре, наблюдаются в смесях с числом  $Le < 1$  и толщиной зазора порядка 4–7 мм при различных граничных условиях. В работе [108] шаровые пламена (Рис. 19а) наблюдаются при концентрации водорода в смеси 7 об.% и толщиной зазора 5 мм, верхняя пластина выполнена из кварцевого стекла, нижняя и боковые стенки из капролона. В той же работе обнаруженные структуры классифицируются именно как дрейфующие шаровые пламена. В серии работ по исследованию горения в узком зазоре [37, 36, 99, 38] используются две Plexiglass пластины, формирующие зазор через рамку из ПВХ, разрозненные элементы фронта наблюдаются в зазорах толщиной 4 мм и смесью 7 об.%, и они классифицируются как пальцеобразные пламена (Рис. 19б). В работе [36] показана зависимость режимов горения от толщины зазора и концентрации водорода в смеси. В работе [109] численно исследовались спорадические волны горения, приводящие к образованию элементов фронта пламени, классифицируемых как чашеобразные (Рис. 19в).

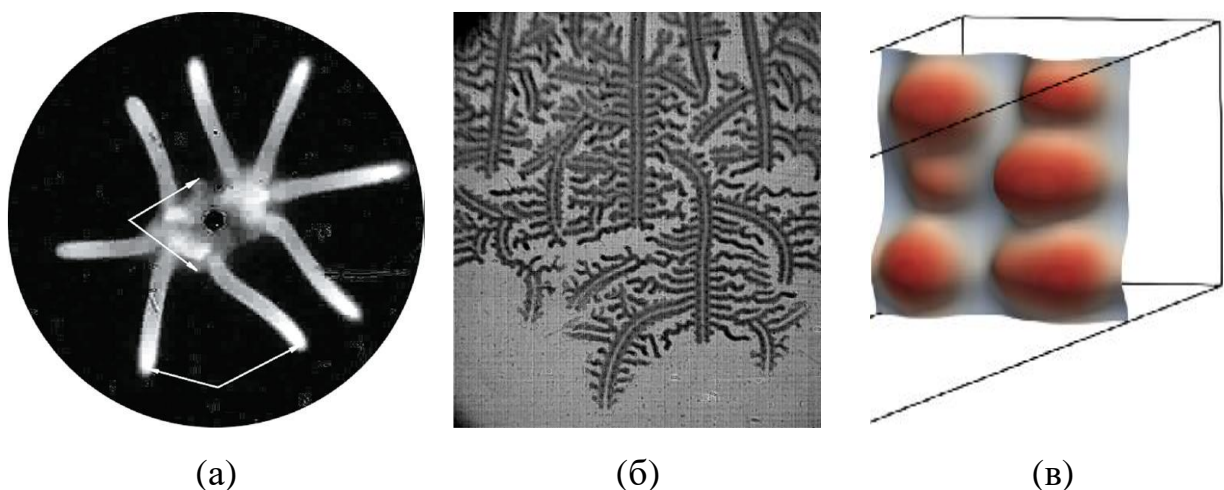


Рис. 19 – Изображения фронта пламени, полученные в работах различных исследователей: а – дрейфующие шаровые пламени в зазоре толщиной 5 мм при концентрации водорода 7,2 об.% в смеси [108], б – разветвляющиеся ячейки в зазоре толщиной 2 мм при концентрации водорода 10,5 об.% [99], в – изоповерхность температуры чашеобразного фронта пламени [109].

В настоящее время реальная форма фронта пламени в подобном режиме горения в литературе не определена. Шаровые пламена, как было показано, являются неподвижными и потребление горючего определяется только диффузией недостающего компонента. Пальцеобразными пламенами принято считать режимы распространения, когда зона реакции также существует на юбке [110]. В работе [99] бедные пламена, распространяющиеся в плоском зазоре, визуализировались теневым методом и характеризовались как пальцеобразное горение. Теневая визуализация регистрирует разницу плотностей и тем самым становится затруднительно отличить очаг пламени от пальцевого горения. Отмеченные в работе [99] многопальцевые структуры фронта пламени представляли собой очаг и след за ним, который мог возникать как из-за нагрева, так и от конденсации паров воды. Далее в данной работе отдельные элементы фронта пламени, показанные на Рис. 19, будем считать «колпачкообразными» пламенами.

В работе [99] показаны режимы горения «колпачкообразных» пламен, состоящих из одной или двух ячеек. В [111] режимы горения шароподобных пламен с одной ячейкой и двумя ячейками показаны как два устойчивых решения

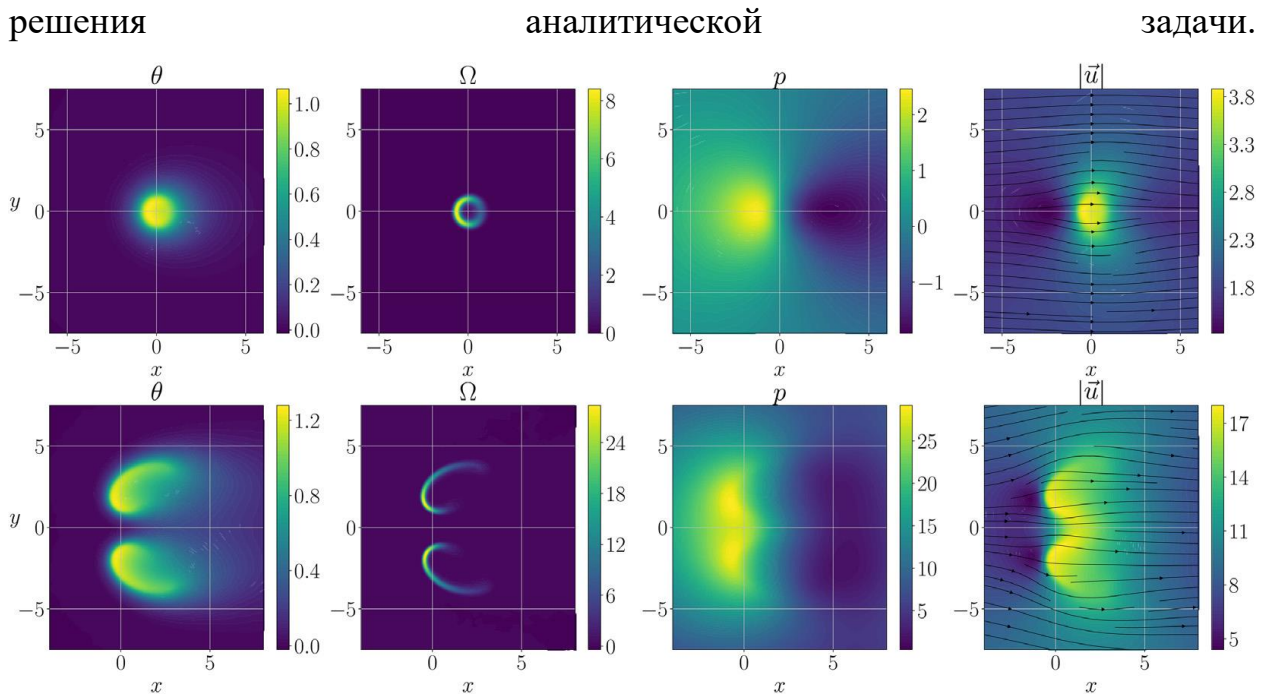


Рис. 20 – Расчетные изображения одноголового и двухголового очаговых пламен, полученных в работе [111].

«Колпачкообразное» пламя, состоящее из одной ячейки, представляет из себя замкнутую круглую зону реакции, описанную в [105], фронт из двух ячеек является двумя отдельными частями зоны реакции. Скорость шара пламени (Рис. 20 верхний ряд) более чем в 4 раза меньше, чем скорость двух ячейистой структуры. Столь низкая скорость, при которой существует шар пламени определяется скоростью диффузии горючего в смеси, так как подвод горючего в подветренную часть шара осуществляется только за счет механизма диффузии и скорости, с которой молекулы диффундируют в зону реакции. Определяющими механизмами существования очагов в обоих режимах являются соотношения выделения тепла и тепловых потерь [112, 113]. Более подробному теоретическому анализу образования очагов посвящена работа [44]. Анализ зависимостей между радиусом, скоростью, числом Льюиса и тепловыми потерями привел авторов к тому, что возникновение очагов следует рассматривать как экстремальный случай термодиффузионной неустойчивости при числах  $Le < 1$ .

Увеличение концентрации горючего приводит к переходу от «колпачкообразного» режима горения к дефлаграционному. При этом на поверхности фронта пламени возникают пальцеобразные ячейки, показанные на

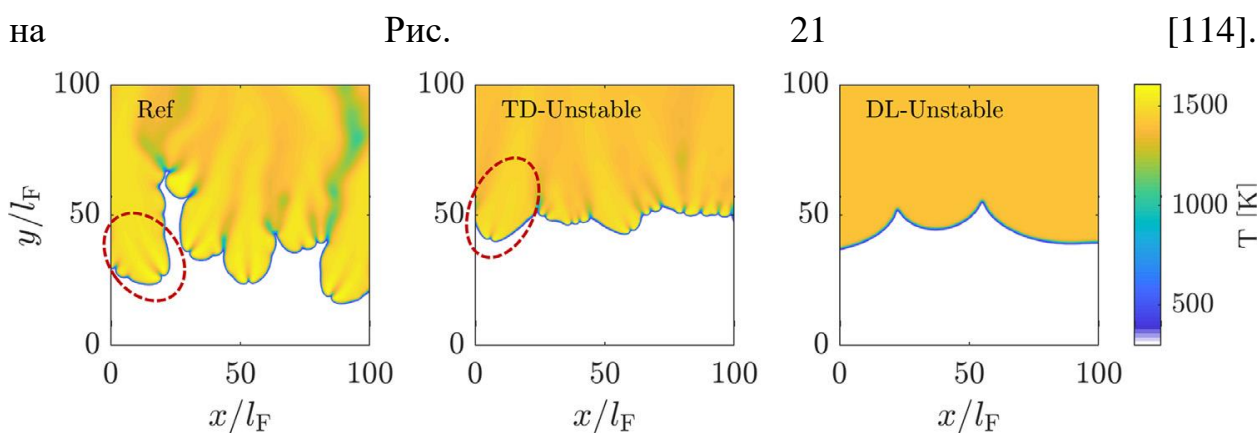


Рис. 21 – Расчетная картина образования пальцеобразных ячеек на фронте пламени [114].

В той же работе [114] качественно описан механизм образования пальцеобразных ячеек. Данная устойчивая структура образуется при слиянии двух отдельных ячеек, образовавшихся на фронте пламени под действием термодиффузионной неустойчивости. Вогнутость в центре пальцеобразной ячейки возникает из-за того, что диффузия горючего происходит в пару опережающих выступов, но является недостаточной для потребления топлива вогнутостью. Расчеты проводились с учетом термодиффузионной неустойчивости и без нее. При расчетах без термодиффузионного механизма подобных пальцеобразных структур не образовывалось. Учитывая, что фронт пламени, испытывает постоянные теплопотери в стенки, данная структура остается устойчивой на протяжении всего процесса распространения фронта. В целом, вопрос существования устойчивых пальцев на фронте пламени относится к задаче Стефана и имеет аналитическое обоснование [115].

В приведенных выше работах проведен анализ режимов горения в плоских зазорах. Данная задача рассматривается как с точки зрения определения безразмерных параметров, приводящих к образованию отдельных элементов фронта, так и существует фрактальный анализ следов паров воды с бифуркациями. Однако форма зоны реакции и механизм образования отдельных ячеек пламен не были показаны экспериментально.

## 2.2 Экспериментальное исследование образования отдельных ячеек пламени в плоских зазорах

Для того чтобы экспериментально показать образование «колпачкообразных» пламен была спроектирована и собрана экспериментальная установка, показанная на Рис. 22.

Плоский зазор формировался между круглым стеклом марки КИ диаметром 120 мм и пластиной, изготовленной методом 3D-печати. Толщиной пластины задается и варьируется толщина плоского зазора. Поверх изготовленной пластины помещался диск из органического стекла. Дополнительный диск из органического стекла снижал вероятность влияния микро-шероховатостей, являющихся следствием процесса трехмерной печати. Диаметр камеры сгорания, равно как и диаметр всех пластин, составлял 100 мм.

Экспериментальная установка подключалась через штуцер (6 Рис. 22) к баллону с газовой смесью. Искровой разрядник (5 Рис. 22) подключался к импульсному источнику высокого напряжения.

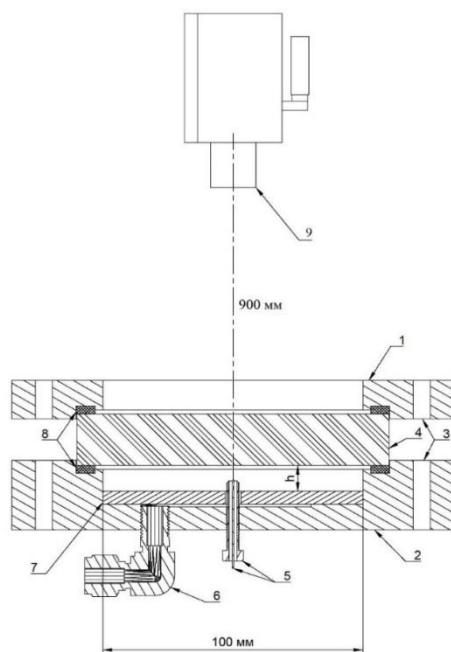


Рис. 22 – Экспериментальная установка: 1 – прижимной фланец, 2 – нижний фланец (основание), 3 – отверстия крепления фланцев между собой, 4 –

стекло КИ, 5 – искровой воспламенитель, 6 – газовый штуцер, 7 – пластина, формирующая исследуемый зазор толщиной  $h$ , 8 – резиновые уплотнители, 9 – инфракрасная камера.

Для создания необходимой водородно-воздушной смеси с объемным содержанием водорода от 7 до 20 об.% использовался газовый пульт на Рис. 1. Последовательность создания предварительно перемешанных смесей является аналогичной, описанной в Главе 1 диссертации.

Перед проведением экспериментов установка предварительно вакуумировалась с помощью вакуумного насоса до давления разрежения 100 Па. После вакуумирования сборка заполнялась газовой смесью до необходимого давления, также контролируемого вакуумметром и манометрами с пульта. Заполнение плоского зазора производилось предварительно перемешанной водородно-воздушной смесью.

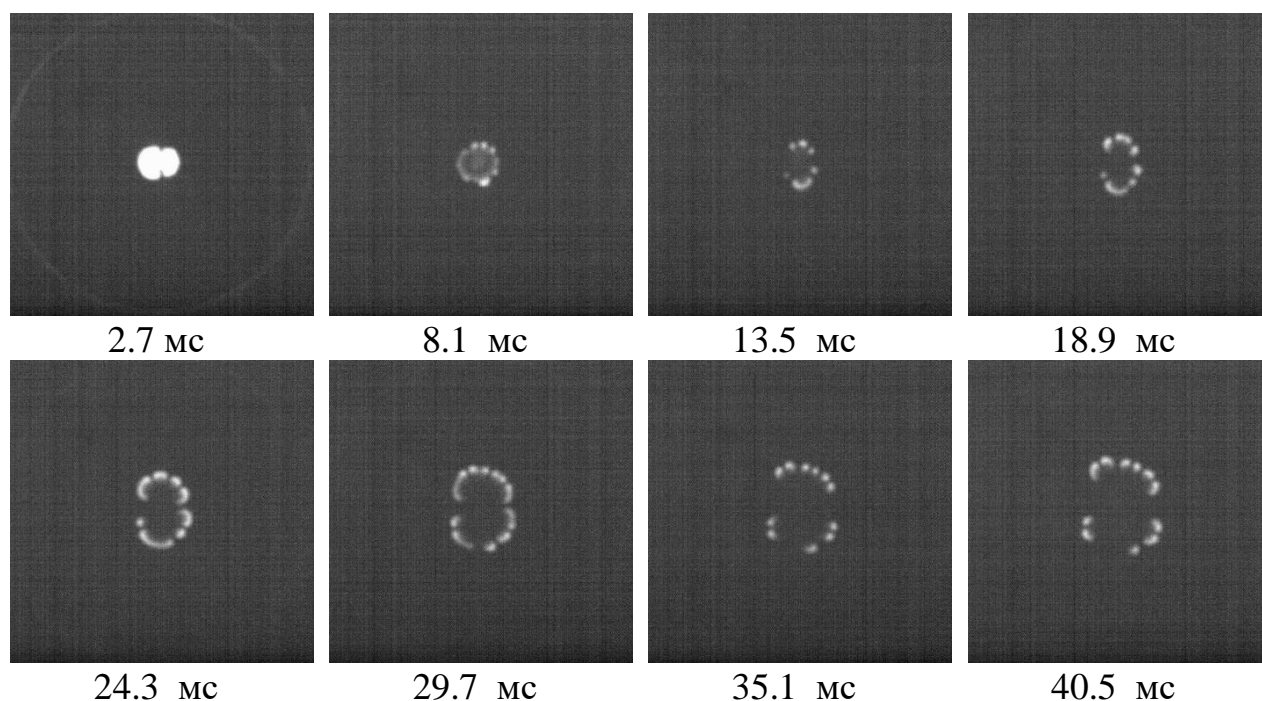
После заполнения горючей смесью производилось зажигание искровым разрядником (5 на Рис. 22). Одновременно с зажиганием подавался синхроимпульс на запуск высокоскоростной инфракрасной камеры.

Визуализация осуществлялась инфракрасной камерой Infratec ImageIR 8300 (9 на Рис. 22), расположенной над экспериментальной сборкой. Частота кадров составляла до 1200 кадров в секунду, время экспозиции – от 5 до 50 мкс в зависимости от исследуемой газовой смеси, разрешение матрицы камеры –  $640 \times 512$  пикселей в формате полного кадра и  $640 \times 200$  при работе в режиме повышенной скорости записи.

### 2.3 Экспериментальные результаты

Колпачкообразный режим горения в работах различных исследователей достигался при концентрации водорода порядка от 7 об.% до 11 об.% и при толщине зазора 3–5 мм. В хронологии проведения данного исследования первыми были проведены эксперименты по горению водородно-воздушных смесей с концентрацией водорода 10 об.% в зазорах толщиной 3 и 5 мм. Высокая скорость распространения пламени не позволила детально рассмотреть начальный этап формирования колпачкообразных пламен, поэтому впоследствии были проведены эксперименты с 7 об.% водородно-воздушной смесью в зазорах толщиной 4 и 5 мм. Во всех экспериментах давление в камере сгорания равнялось атмосферному, начальная температура комнатная.

На Рис. 23 показана серия инфракрасных изображений в различные моменты времени в смеси с 10 об.% содержанием водорода в зазоре толщиной 3 мм.



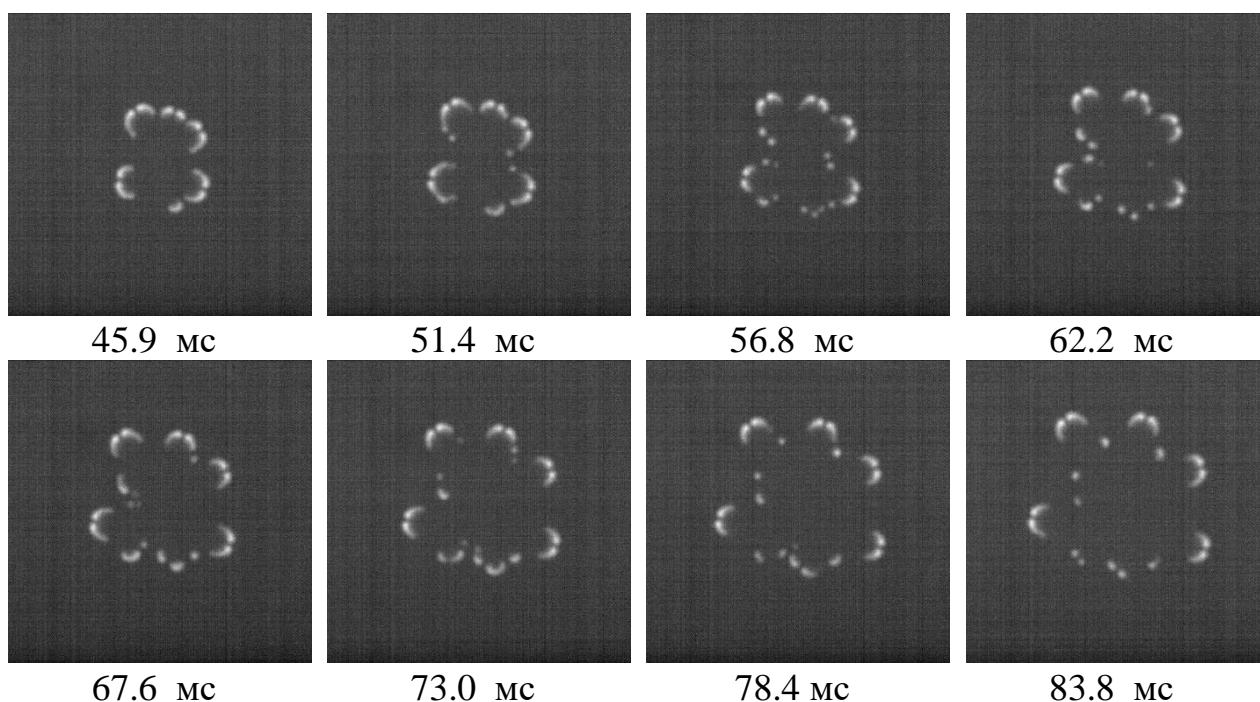
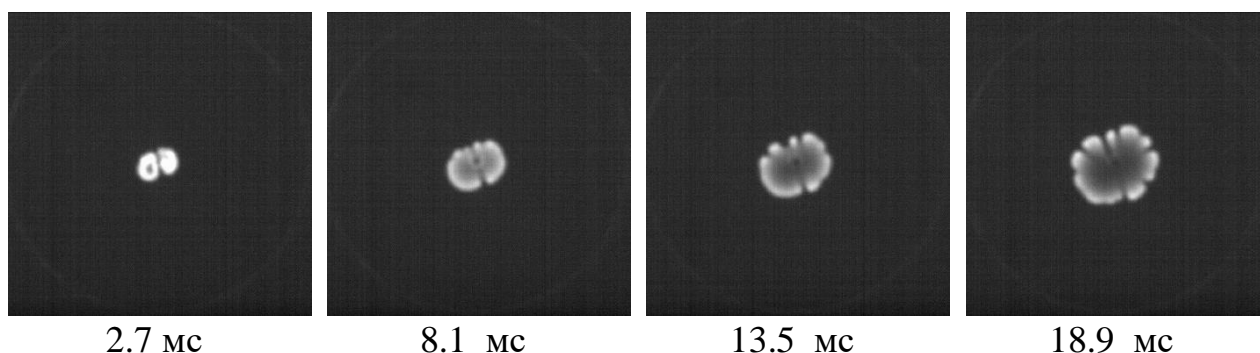


Рис. 23 – Серия инфракрасных изображений распространяющегося пламени в смеси с 10 об.% содержанием водорода в зазоре толщиной 3 мм в различные моменты времени.

Инфракрасные снимки на Рис. 23 получены при скорости съемки 370 кадров в секунду и времени экспозиции 50 мкс. На начальном этапе сразу после инициирования искровым разрядом с энергией 50 мДж образуется неразрывный фронт пламени. В момент времени 8,1 мс фронт пламени распадается на «колпачкообразные» ячейки.

В зазоре толщиной 5 мм фронт пламени 10 об.% водородно-воздушной смеси распадается на отдельные ячейки в момент времени 18,9 мс (Рис. 24). Размер и количество ячеек возрастают в связи с общим увеличением тепловыделения





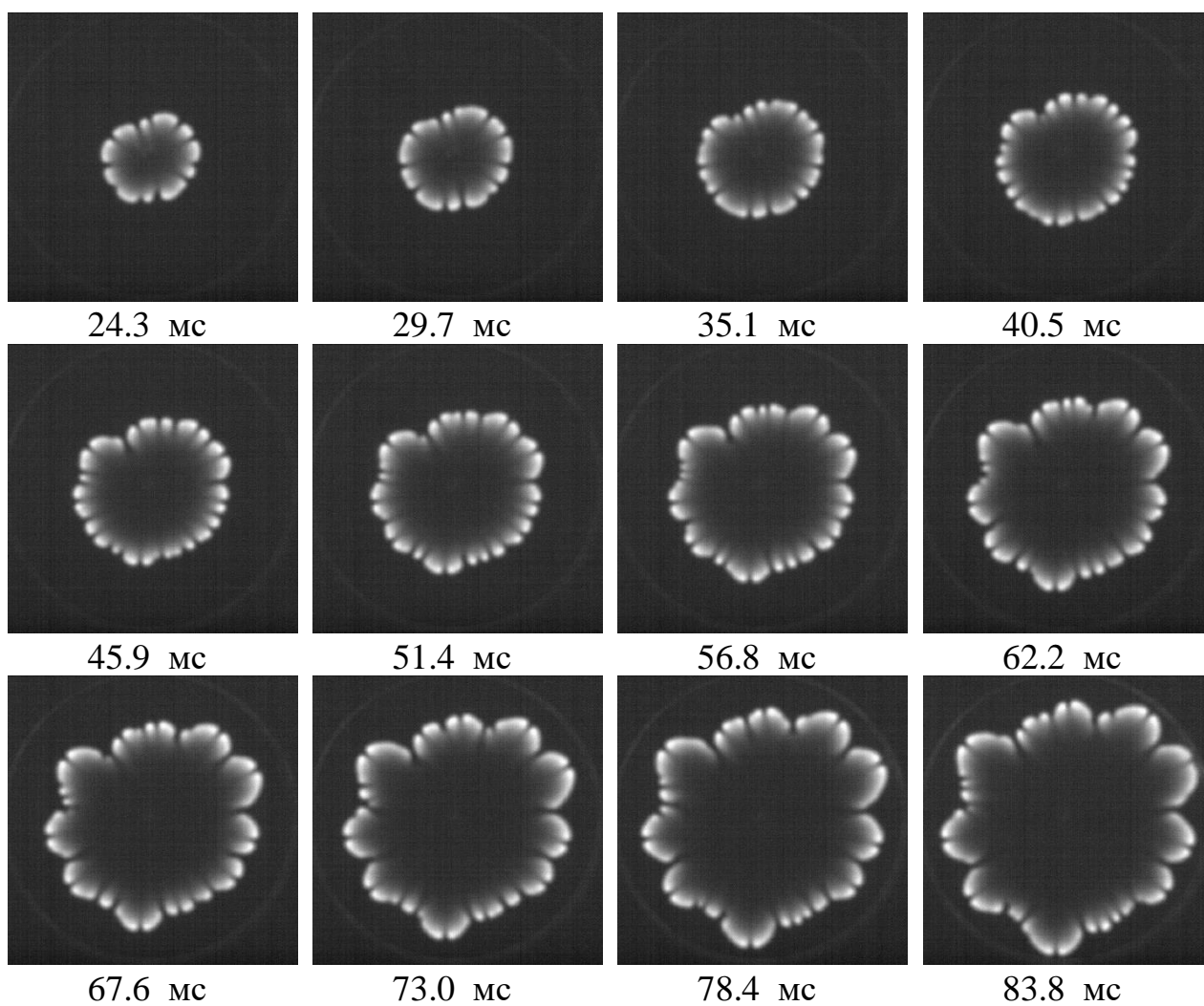


Рис. 24 – Серия инфракрасных изображений распространяющегося пламени в смеси с 10 об.% содержанием водорода в зазоре толщиной 5 мм в различные моменты времени.

На приведенных выше инфракрасных изображениях хорошо видны ячейки пламени, однако механизм их образования остается невыясненным. Ширина и высота каждого кадра на Рис. 23 и Рис. 24 составляют 100 мм. Для регистрации этапов распада неразрывного пламени инфракрасная камера Infratec ImageIR 8300 может быть переведена из режима полнокадровой съемки в режим ограниченного числа задействованных линий матрицы, что приводит к увеличению скорости съемки до 1200 кадров в секунду. Увеличение скорости съемки и уменьшение концентрации водорода в смеси позволило получить изображения фронта пламени до и после его распада на «колпачкообразные» ячейки. На Рис. 25 показана серия инфракрасных

изображений в различные моменты времени в смеси с 7 об.% содержанием водорода в зазоре толщиной 4 мм. В зазоре толщиной 3 мм горючая смесь не воспламенялась.

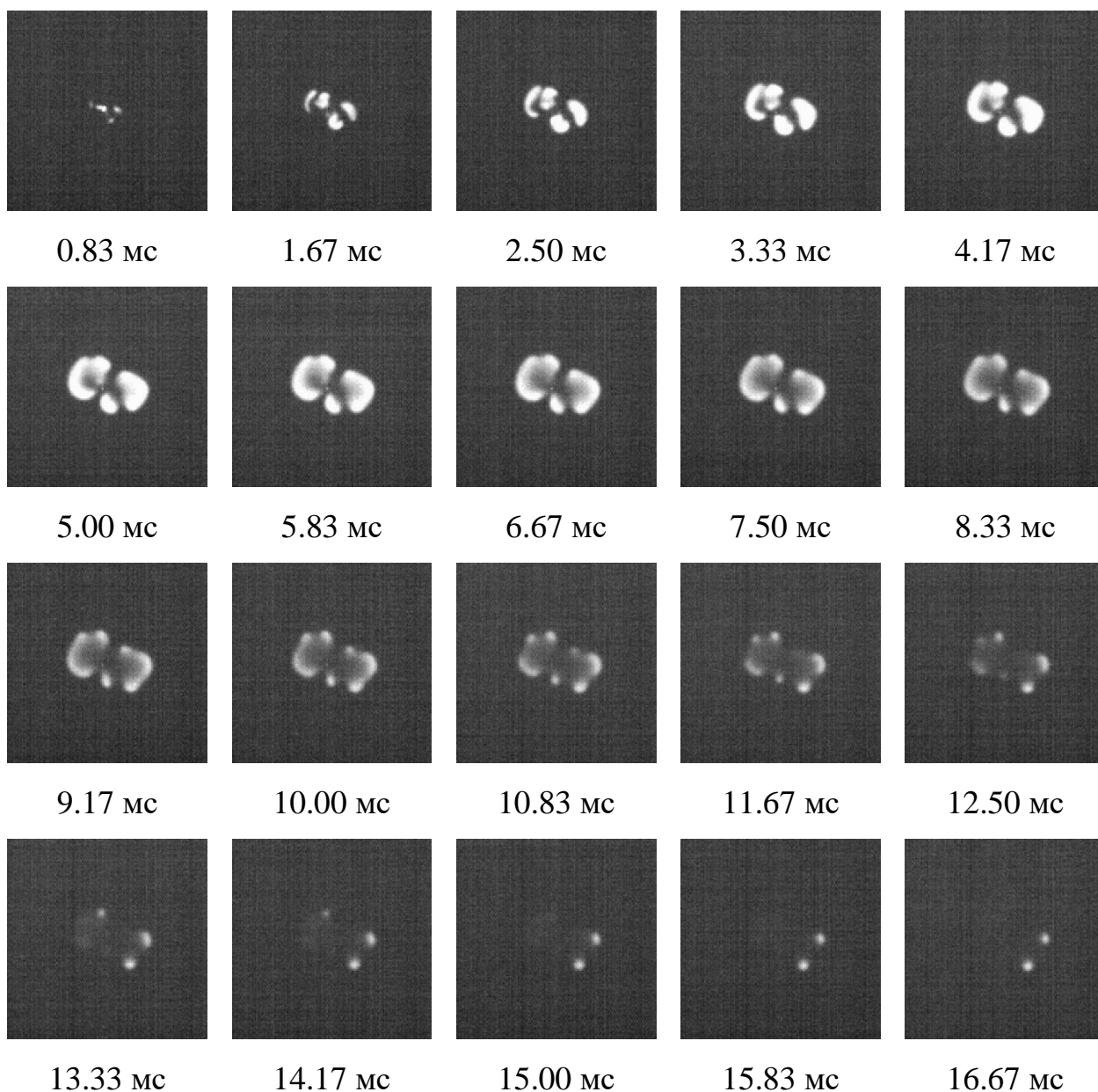
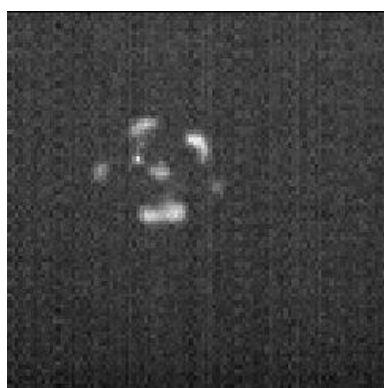


Рис. 25 – Серия инфракрасных изображений распространяющегося пламени в смеси с 7 об.% содержанием водорода в зазоре толщиной 4 мм в различные моменты времени.

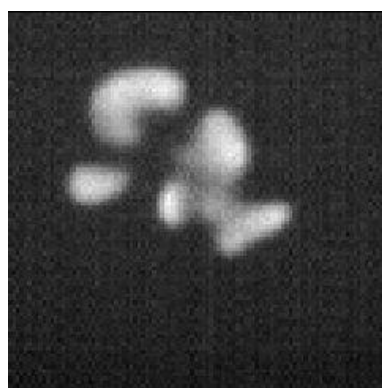
Изображения получены при скорости съемки 1200 кадров в секунду. Размер каждого изображения составляет 38 мм. Как видно из Рис. 25, сразу после искрового зажигания регистрируются отдельные участки фронта

пламени с максимальным периметром головной части вдоль направления движения 13 мм. В момент времени 10 мс начинается распад участков фронта на «колпачкообразные» ячейки пламени. Инфракрасная визуализация камерой Infratec ImageIR 8300 осуществляется на длинах волн от 1,5 до 5,7 мкм. Основным параметром, регистрируемым камерой, является светимость паров воды, как продуктов сгорания водорода [116], поэтому на инфракрасных изображениях колпачки представимы в виде отдельных ярких пятен. Фронт пламени искривляется по сечению зазора, поэтому максимальная интенсивность свечения достигается на расстоянии от головной части фронта. Линейный размер колпачков составляет около 3 мм. Впоследствии колпачки самопроизвольно затухают в момент времени 110 мс.

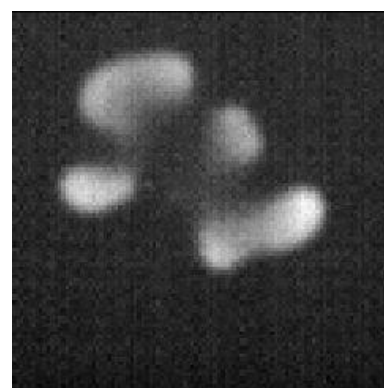
В зазоре толщиной 5 мм в 7 об% водородно-воздушной смеси количество колпачков после распада фронта увеличивается. На Рис. 26 показаны инфракрасные изображения фронта пламени в различные моменты времени.



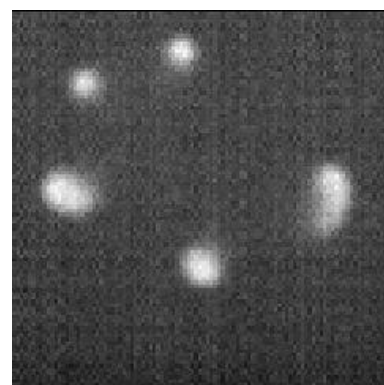
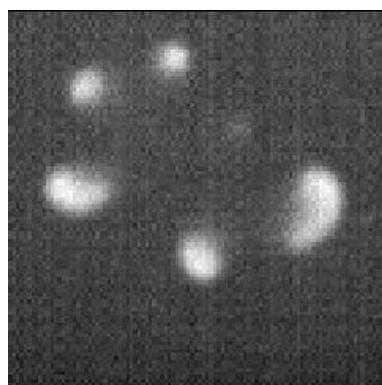
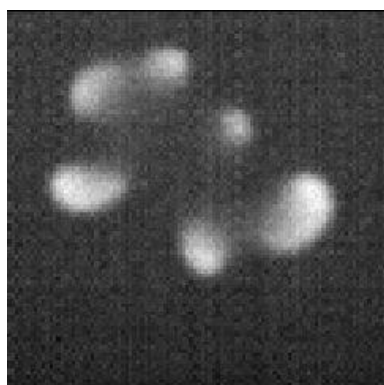
1,7 мкс



9,2 мкс



16,7 мкс



24,2 мкс

31,7 мкс

39,2 мкс

Рис. 26 – Серия изображений ячеек пламени 7 об% водородно-воздушной смеси в зазоре 5 мм в различные моменты времени.

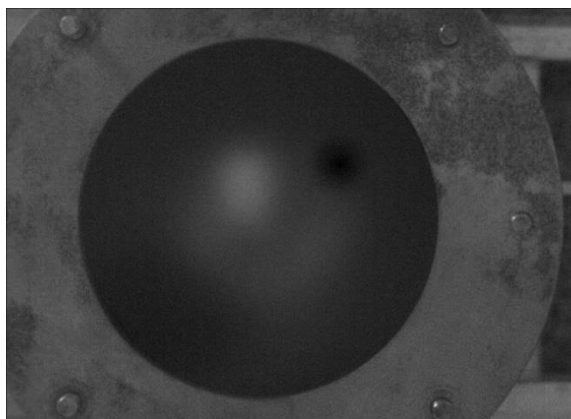
Аналогично горению 10 об.% водородно-воздушной смеси при увеличении зазора возросло общее выделение тепла. В процессе горения смеси потребление горючего пропорционально ширине зазора. Поэтому образование колпачков возникло из нескольких отдельных участков неразрывного фронта и суммарное количество колпачков увеличилось. Максимальный размер фронта до распада составляет 19 мм, суммарный периметр образовавшихся колпачков составляет 20 мм. Относительный рост длины поверхности зоны реакции не изменился.

#### **2.4 Динамика фронта пламени и образовавшихся отдельных ячеек**

Оценка скорости и динамики изменения размеров «колпачкообразных пламен» потребовала создания специальной компьютерной программы обработки инфракрасных изображений, в связи с тем, что смещение фронта и колпачков пламени между кадрами слабо различимо человеческим глазом, а ошибка определения границ фронта пламени в несколько пикселей приводит к значительному увеличению абсолютной погрешности. Метод бинаризации изображения хорошо распознает границы объектов на инфракрасном изображении [116]. Суть метода заключается в том, что точки (пиксели) на изображении, ярче порогового значения (коэффициента бинаризации) заменяются на логическую единицу, а пиксели меньшей яркости приобретают значение логического нуля. Таким образом формируется бинарное изображение белых объектов на черном фоне. Инфракрасные изображения строятся на основе поля значений интенсивности свечения, зарегистрированных матрицей камеры. Эта особенность позволяет использовать метод бинаризации без применения каких-либо предварительных фильтраций шумов на изображении. Поэтому данный

метод был выбран в качестве основного для распознавания границ фронта и колпачков пламени.

Сперва была определена погрешность в распознавании границ методом бинаризации. В экспериментальную установку помещался нагретый металлический прямоугольник с известными линейными размерами. Инфракрасное изображение установки и металлического прямоугольника показаны на Рис. 27. Масштабирующий коэффициент мм/пиксель во всех сериях экспериментов рассчитывался из изображения установки (Рис. 27а), полученного при времени экспозиции 2525 мкс. В связи с возможным смещением оси камеры и оси установки в разных сериях данное значение получалось для каждой серии экспериментов заново. Диаметр окна составляет 100 мм. По трем точкам изображения круглого окна строилась окружность и вычислялся ее диаметр в пикселях. По известному реальному диаметру и полученному количеству пикселей определялось значение масштабирующего коэффициента. Данная процедура повторялась не менее 10 раз для обеспечения возможности определения погрешности методом вычисления выборочного стандартного отклонения [85], аналогичным определению погрешности в Главе 1. На Рис. 27б показано изображение нагретого тела в зазоре установки в масштабе один к одному при времени экспозиции 50 мкс. Данное время экспозиции использовалось в большинстве экспериментов по исследованию формирования колпачков пламени.



(а)



(б)

Рис. 27 – Инфракрасные изображения экспериментальной установки: а – изображение установки при времени экспозиции 2525 мкс; б – изображение нагретого тела внутри установки при времени экспозиции 50 мкс.

Размер матрицы инфракрасной камеры составляет  $640 \times 512$  пикселей. На расстоянии 900 мм при использовании объектива с фокусным расстоянием 50 мм границы объекта оказываются размытыми (Рис. 28а). Распознанные границы на таком изображении представляют собой ступенчатую линию, показанную на Рис. 28б при коэффициенте бинаризации 0,5.

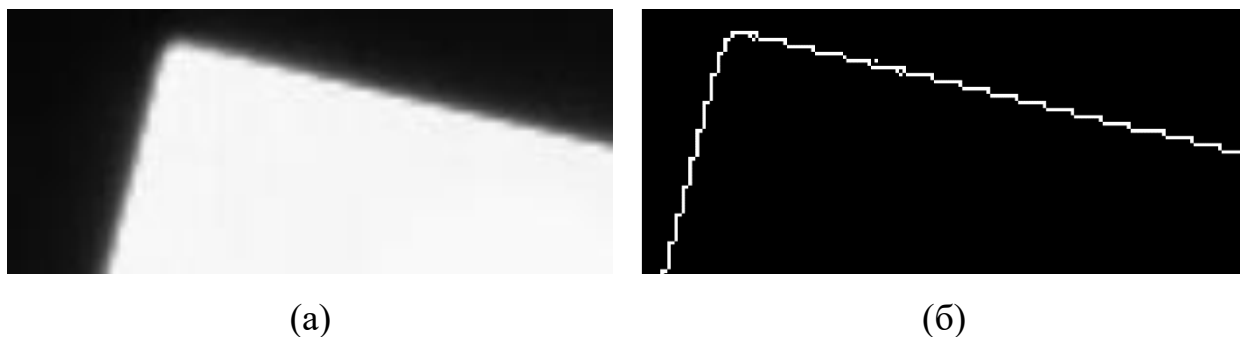


Рис. 28 – Приближенное инфракрасное изображение нагретого тела (а) и его границы, распознанные при коэффициенте бинаризации 0,5 (б).

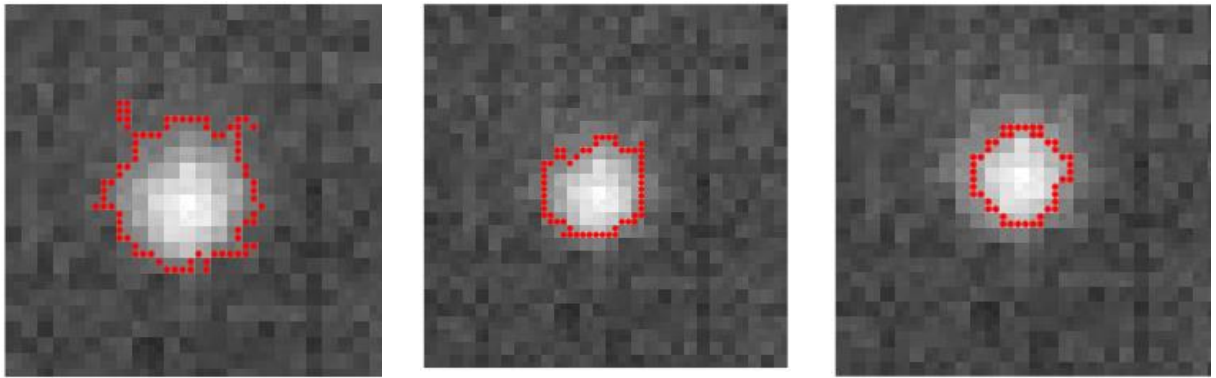
Линейные размеры металлического прямоугольника составляют  $12,7 \pm 0,03$  мм и  $57,1 \pm 0,03$  мм. Периметр этого тела составляет  $139,6 \pm 0,03$  мм. Периметр изображения, полученного после компьютерной обработки, составляет от 181,3 до 157,5 мм при коэффициенте бинаризации от 0,1 до 0,9. При коэффициенте бинаризации равном 0,5 периметр составил 161,4 мм. Масштабирующий коэффициент был получен из изображения на Рис. 27а и составил  $0,1234 \pm 0,0003$  мм/пиксель.

Поскольку алгоритм считает периметр фигуры как сумму граничных пикселей этой фигуры, то длина любой прямой, измеренная алгоритмом, равняется сумме длин её проекций. Таким образом периметр получается завышенным. Несложно подсчитать, что для прямоугольника периметр, подсчитанный данным методом, может завышаться до  $\sqrt{2}$  раз. Для

прямоугольника, повернутого на  $30^\circ$ , как на рис. 14, периметр должен завывшаться в 1,37 раза. В настоящей работе исследовались в основном округлые фронты, поэтому важно подсчитать, во сколько раз алгоритм завывает длину окружности. Как известно, длина единичной окружности равняется  $\pi$ , в то время как удвоенная сумма длин её проекций равняется 4. То есть длина окружности, найденная алгоритмом, завывается в  $\frac{4}{\pi}$  раз.

Периметр распознанного прямоугольного изображения, рассчитанный по координатам точек углов, равняется 144 мм, что составляет 3% ошибки от реального периметра прямоугольника. Условимся далее считать эту величину погрешностью распознавания границ фронта при использовании метода бинаризации.

Дополнительная ошибка может возникать при изменении коэффициента бинаризации. У ярких объектов на инфракрасном изображении граница объекта оказывается размытой. Для движущихся объектов помимо аппаратного размазывания, связанного с размерами матрицы камеры, может возникать размытие, связанное с движением объекта, например колпачка или фронта пламени. Увеличение коэффициента бинаризации приводит к удалению пикселей с границы объекта, что приводит к неточному распознаванию. На Рис. 29 показаны инфракрасные изображения одного и того же колпачка пламени с наложенными поверх изображения границами, показанными красными точками, распознанными при значениях коэффициента бинаризации 0,4, 0,5 и 0,6.



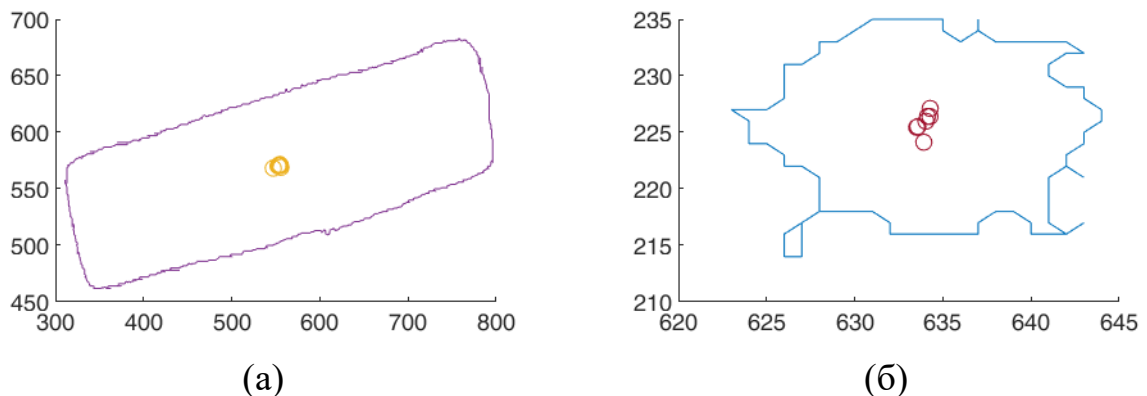
(а),  $k_b=0.4$

(б),  $k_b=0.5$

(в),  $k_b=0.6$

Рис. 29 – Изображение колпачков пламени с наложенными поверх границами (красный), распознанными методом бинаризации при различном коэффициенте бинаризации  $k_b$ , равном: а – 0,4; б – 0,5; в – 0,6.

По изображениям на Рис. 29 видно, что при увеличении коэффициента бинаризации возникает как уменьшение выделенной границы, так как большее число пикселей оказываются меньше порогового значения, так и изменение его формы. Исходя из данной картинке наиболее подходящим будет коэффициент между 0,4 и 0,5. Ошибка, обусловленная изменением коэффициента бинаризации, может быть получена исходя из предположения о постоянстве центра объекта на изображении. Центр границ равняется среднему значению координат распознанных границ. На Рис. 30 показаны границы и их центры прямоугольника и колпачка пламени.



(а)

(б)

Рис. 30 – Границы и точки центров масс объектов на инфракрасном изображении: а – границы прямоугольника, полученные при коэффициенте бинаризации 0,1 и точки его центра, полученный при коэффициентах



бинаризации от 0,1 до 0,9 с шагом 0,05; б – границы колпачка, распознанные при коэффициенте бинаризации 0,5 и точки его центра, полученные при коэффициентах бинаризации от 0,3 до 0,7 с шагом 0,05.

Координаты центра прямоугольника составляют  $553,46 \pm 1,85$  и  $570,58 \pm 0,81$  пикселей по оси ординат и абсцисс, соответственно. Координаты центра колпачка равняются  $631,96 \pm 0,31$  и  $225,85 \pm 0,95$ . Границы прямоугольника, распознанные при коэффициенте бинаризации равном 0,1 плохо описывают реальные границы объекта, однако распознавание границ колпачка при таком коэффициенте невозможно вовсе в виду сильного влияние фоновых шумов. Относительная погрешность выше, все же, при распознавании границ колпачка и составляет 0,5%.

Суммарная ошибка складывается из погрешности определения границ методом бинаризации и влияния коэффициента бинаризации на форму распознанной границы. Относительная ошибка при обработке изображений составляет 3,5%.

Динамика движения колпачков пламени может быть оценена как по скорости движения точки на границе колпачка, так и по скорости движения центра колпачка, так как на инфракрасных изображениях он представим в виде окружности с максимальной интенсивностью свечению в центре. В данной работе скорость движения «колпачкообразных» пламени оценивалась по смещению его центра на изображении, а скорость движения фронта до распада оценивалась по скорости движения точек на его наветренной стороне. Погрешность при определении координат «колпачкообразных» пламен оценивалась вариацией коэффициента бинаризации и усреднения центра масс. При варьировании коэффициента бинаризации от 0,3 до 0,7 с шагом 0,05 количество полученных точек центра равнялось 8. По набору данных средних значений рассчитывалось и выборочное стандартное отклонение [85]. Ошибка определения границ фронта пламени до распада

определялась аналогично с помощью усреднения выбранных точек, однако точки на распознанном изображении выбирались вручную при постоянном коэффициенте бинаризации равном 0,5. Выбор точек на наветренной стороне фронта повторялся трижды. На Рис. 31 показаны распознанные границы фронта пламени и «колпачкообразных» ячеек при распространении пламени в смеси с 7 об.% содержанием водорода в зазоре толщиной 4 мм. Относительно малое число распознанных точек привело к увеличению погрешности при определении границ фронта пламени до распада на графиках на Рис. 32 и Рис. 33.

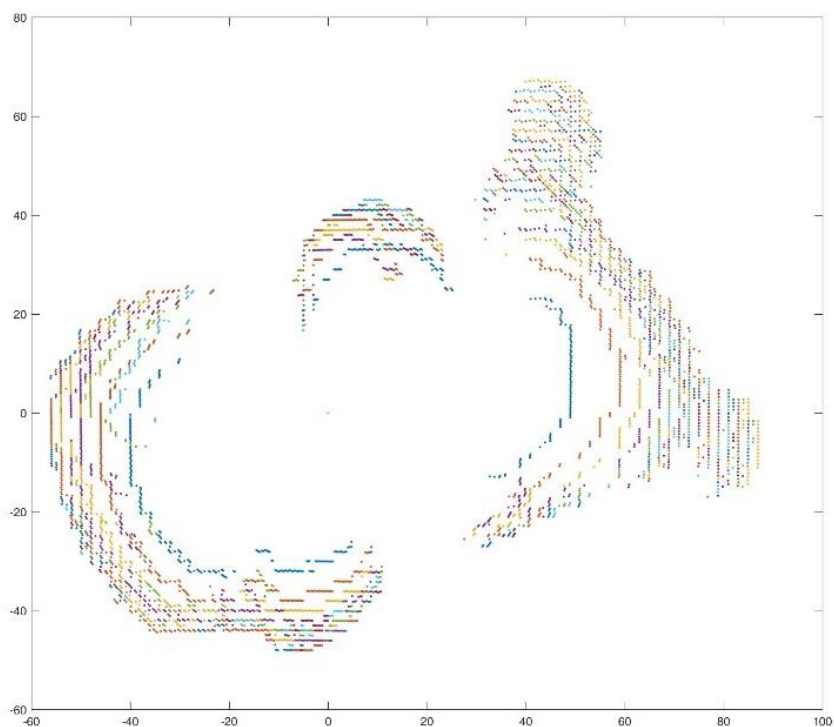


Рис. 31 – Распознанные границы фронта пламени и «колпачкообразных» ячеек при распространении пламени в смеси с 7 об.% содержанием водорода в зазоре толщиной 4 мм. Каждая кривая соответствует отдельному инфракрасному кадру. Масштаб представлен в пикселях.

На Рис. 32 показан график зависимости скорости распространения фронта пламени и колпачков от времени в 7 об.% водородно-воздушной смеси в зазоре толщиной 4 мм, соответствующий изображениям на Рис. 25 с указанием погрешностей, полученных методами, описанными выше. В момент времени от 10 до 12 мс участок неразрывного фронта разваливается на колпачки. До этапа распада фронт двигался со средней скоростью 0,4 м/с. После распада фронта на колпачки средняя скорость движения каждого колпачка не превышала 0,2 м/с. Средняя скорость колпачков в 2 раза меньше средней скорости участка фронта пламени перед распадом.

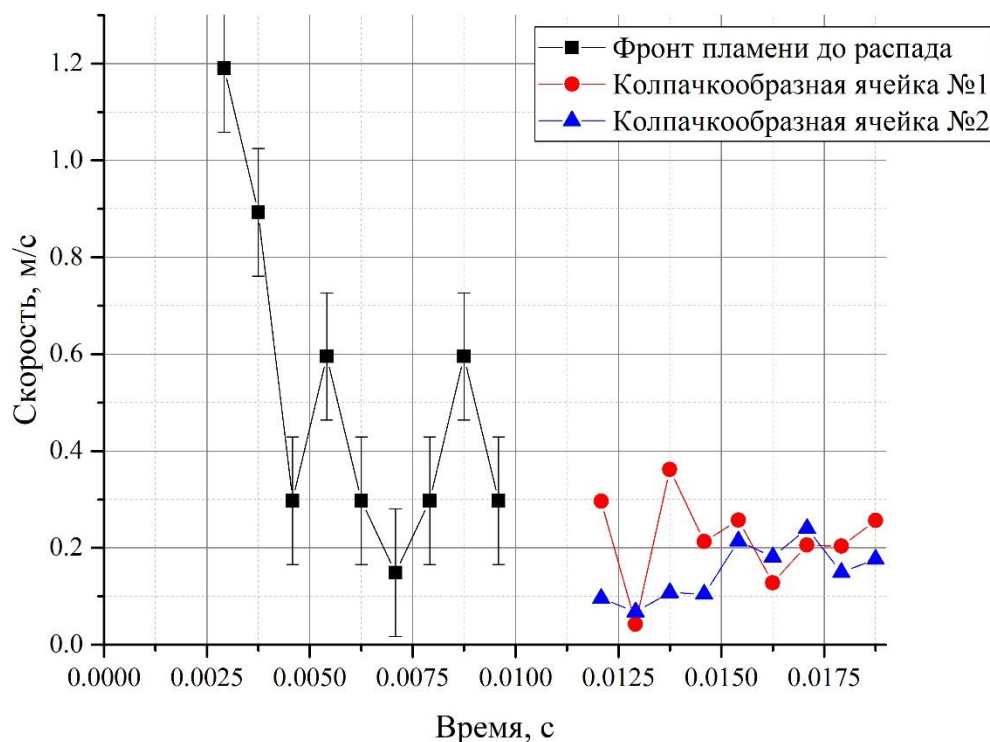


Рис. 32 – Скорость фронта пламени и «колпачкообразных» пламен в зависимости от времени для 7 об% водородно-воздушной смеси в зазоре 4 мм.

На Рис. 33 показан график скорости фронта пламени до распада на «колпачкообразные» пламена и скорость движения колпачков пламени после распада при горении 7об.% водородно-воздушной смеси в зазоре толщиной

5 мм. Метод определения координат и погрешностей аналогичен предыдущему эксперименту. Наблюдается замедление при распространении пламени в «колпачкообразном» режиме в 2,55 раза.

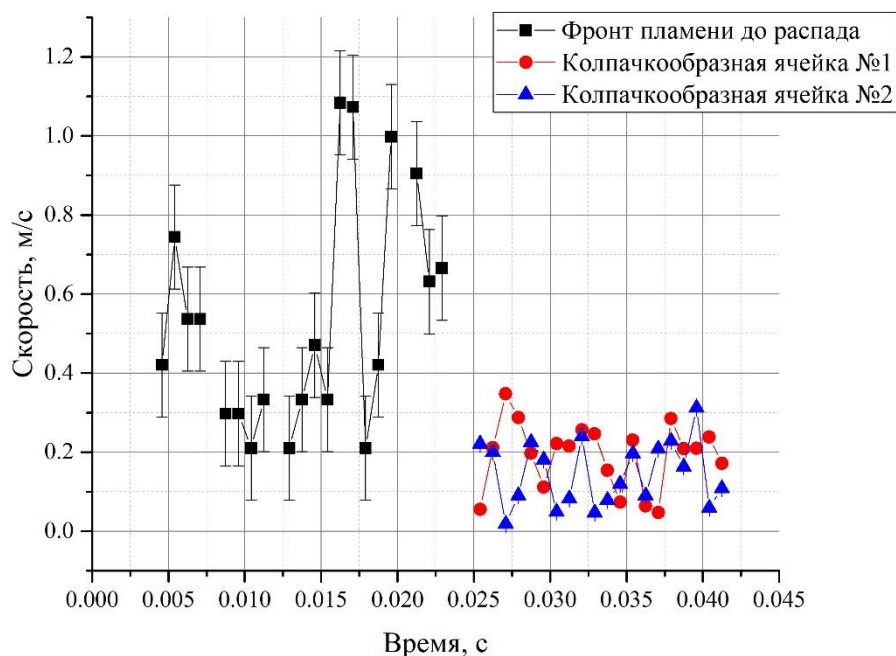


Рис. 33 – Скорость фронта пламени и «колпачкообразных» пламен в зависимости от времени для 7 об% водородно-воздушной смеси в зазоре 5 мм.

Горение смеси с 10 об.% содержанием водорода в водородно-воздушной смеси в зазорах толщиной 3 и 5 мм сопровождается образованием «колпачкообразных» пламен, состоящих из сдвоенных ячеек. Более того, горение данной более богатой смеси сопровождается более интенсивным излучением, позволяющим произвести распознавание всех кадров методом бинаризации с последующей определением точек на фронте пламени вручную. В качестве координат фронта пламени до распада и координаты ячеек принималась точка на наветренной стороне. На Рис. 34 показаны распознанные границы фронта пламени до распада и «колпачкообразных» ячеек пламени с 10 об.% содержанием водорода в зазоре толщиной 3 мм.

Высокая плотность точек позволила провести определение точек, соответствующих кончикам пламени с точностью, впоследствии не превышающей размер точек на графиках.

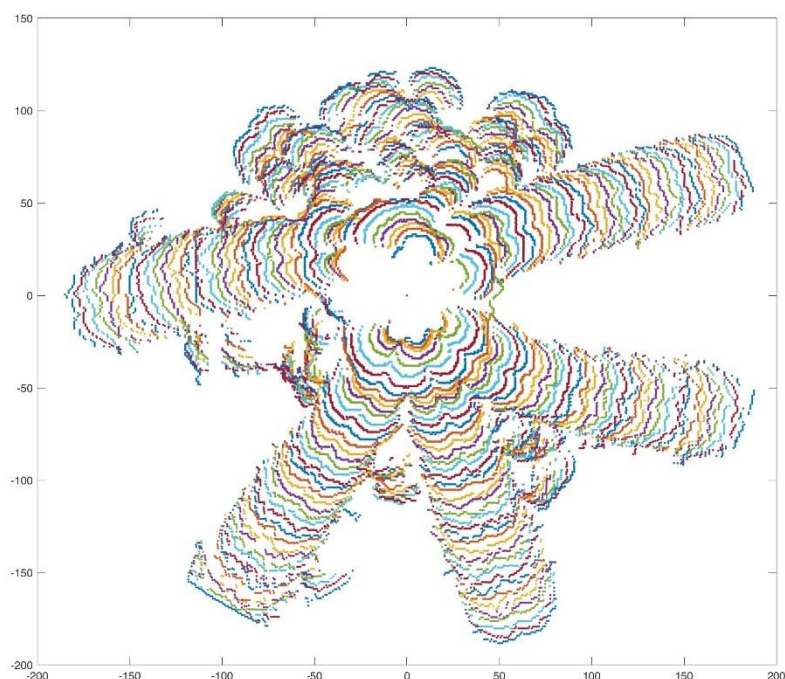
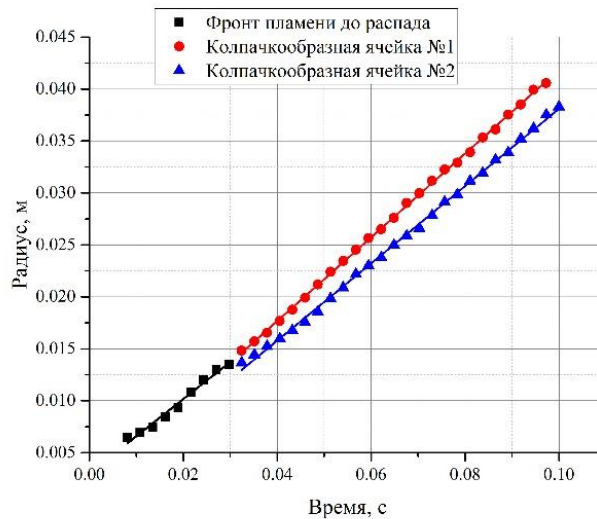
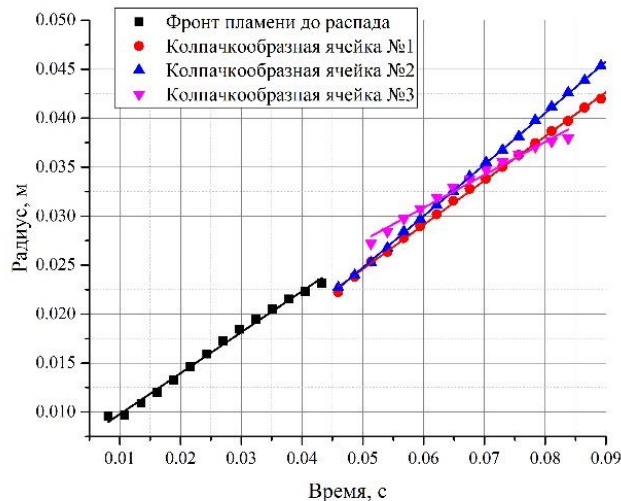


Рис. 34 – Распознанные границы фронта пламени и колпачкообразных ячеек при распространении пламени в смеси с 10 об.% содержанием водорода в зазоре толщиной 3 мм. Каждая кривая соответствует отдельному инфракрасному кадру. Масштаб представлен в пикселях.

График зависимости радиуса фронта пламени до распада и ячеек пламени показаны на Рис. 35. На том же графике представлена линейная аппроксимация.



(а)



(б)

Рис. 35 – Графики зависимости радиуса от времени при горении 10 об.% водородно-воздушной смеси в зазорах: (а) – 3 мм, (б) – 5 мм

Скорость распространения фронта пламени 10об.% водородно-воздушной смеси в зазоре толщиной 3 мм (Рис. 35а) до распада составляет 0,36 м/с, а скорость движения «колпачкообразных» ячеек после распада составляет 0,4 и 0,37 м/с. В зазоре толщиной 5 мм (Рис. 35б) скорость неразрывного фронта составила 0,42 м/с. Исследуемый участок фронта распался на 3 ячейки, две из которых двигались до гашения о стенку со

скоростью 0,52 и 0,45 м/с. Третья ячейка самопроизвольно затухла, двигаясь с замедлением и средней скоростью 0,34 м/с.

В смеси с 10 об.% содержанием водорода скорость ячеек пламени выше скорости распространения неразрывного фронта до его распада. Это связано с тем, что концентрация горючего в смеси является достаточной для поддержания горения, однако фронт пламени, испытывает теплопотери в стенки камеры сгорания. «Колпачкообразная» форма фронта пламени позволяет потреблять больше горючего в близлежащей зоне. Горения вокруг ячеек в зазоре толщиной 3 мм не наблюдается, так как каждая ячейка потребляет большой объем топлива вокруг себя, определяя тем самым зону, из которой за счет диффузии был поглощен водород.

## **2.5 Механизм распада фронта пламени и форма образовавшихся ячеек.**

Рассмотрим механизм распада неразрывного фронта пламени. На начальной стадии на форму отдельных участков неразрывного фронта пламени может оказывать влияние искровой разряд и возмущения, вносимые контактами искрового промежутка. В экспериментах с 7 об.% содержанием водорода в смеси искровой разрядник представлял собой два проводника диаметром 0,5 мм, расположенных на расстоянии 1,5 мм. Центральное отверстие в пластине 5 на Рис. 22 выполнено в форме овала с осями 2 и 3 мм. Энергия инициирования составляет 50 мДж. Интенсивность волны сжатия в данной постановке эксперимента обратно пропорционально квадрату радиуса. Расстояние от искрового промежутка до верхней и нижней стенок зазора составляет 2 мм. На Рис. 36 показаны теневые изображения возмущений, сгенерированных искровым разрядом в воздухе. Возмущения затухают в области радиусом не более 4 мм.

Если считать, выделение тепла при горении сжатой горючей смеси достаточно быстрым, к начальной энергии искры добавляется от 0,3 до 0,5 Дж. С учётом дополнительной энергии радиус стартового сжатия увеличивается до 10–15 мм, что соответствует радиусу начала распада пламени на отдельные «колпачкообразные» ячейки.



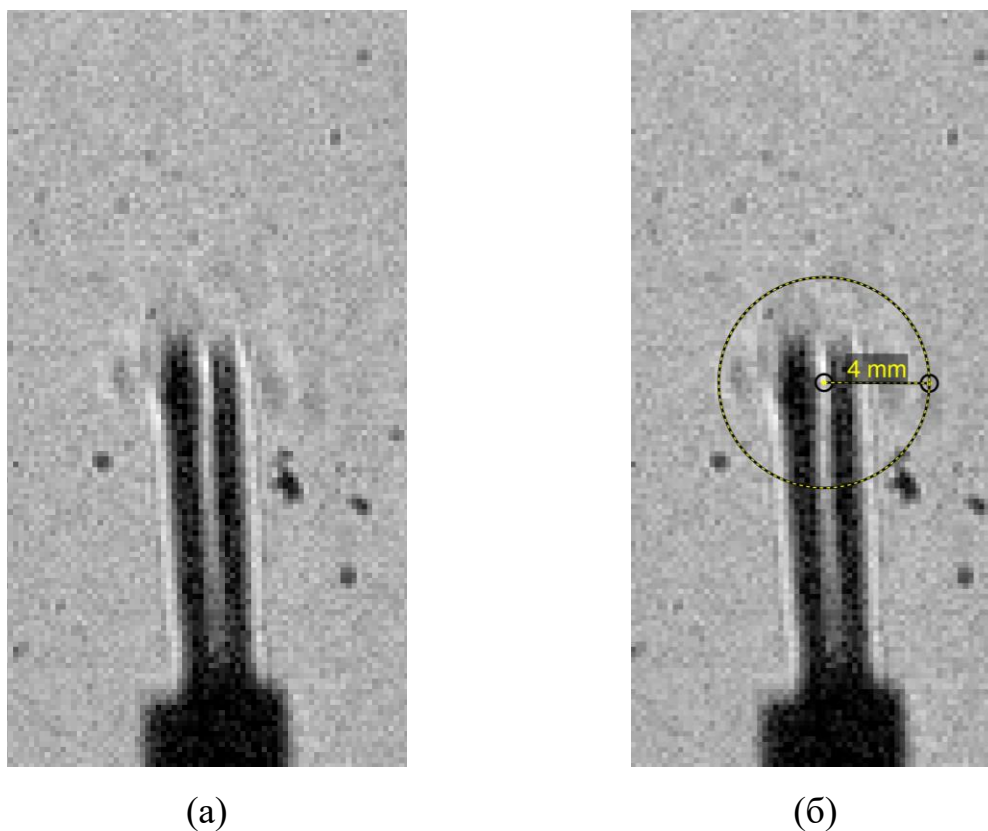


Рис. 36 – Теневые изображения возмущений, сформированных искровым разрядом: а – оригинальное изображение, б – изображение с выделенной областью возмущений

Для понимания механизма распада неразрывного фронта пламени на отдельные «колпачкообразные» ячейки необходимо определить механизм распространения образовавшихся ячеек.

Дрейфующее шарообразное пламя поддерживает горение в замкнутой сферической зоне реакции за счет диффузии недостающего компонента [105]. Это накладывает ограничение на скорость дрейфа, последняя не должна быть выше скорости диффузии молекул водорода в бедных водородно-воздушных смесях. Скорость диффузии водорода не превышает 0,02 м/с [117] при температуре 293 К и давлении 101325 Па.

Скорость распространяющихся «колпачкообразных» пламен в зазоре толщиной 4 мм при концентрации водорода в водородно-воздушной смеси 7 об.% достигает 0,2 м/с. То есть, скорость движения фронта пламени в 10

раз превышает скорость диффузии водорода, что свидетельствует о том, что реакция на подветренной стороне происходить не может. Колпачок пламени движется быстрее, чем молекулы водорода способны диффундировать к подветренной стороне. Всплывающие пламена, полученные как экспериментально, так и описанные теоретически в [37] двигаются со скоростью 0,2-0,3 м/с в 6 об.% водородно-воздушной смеси. При этом зона реакции, определяемая по концентрации радикала ОН [118, 119], существует только по направлению всплывания пламени (Рис. 37а).

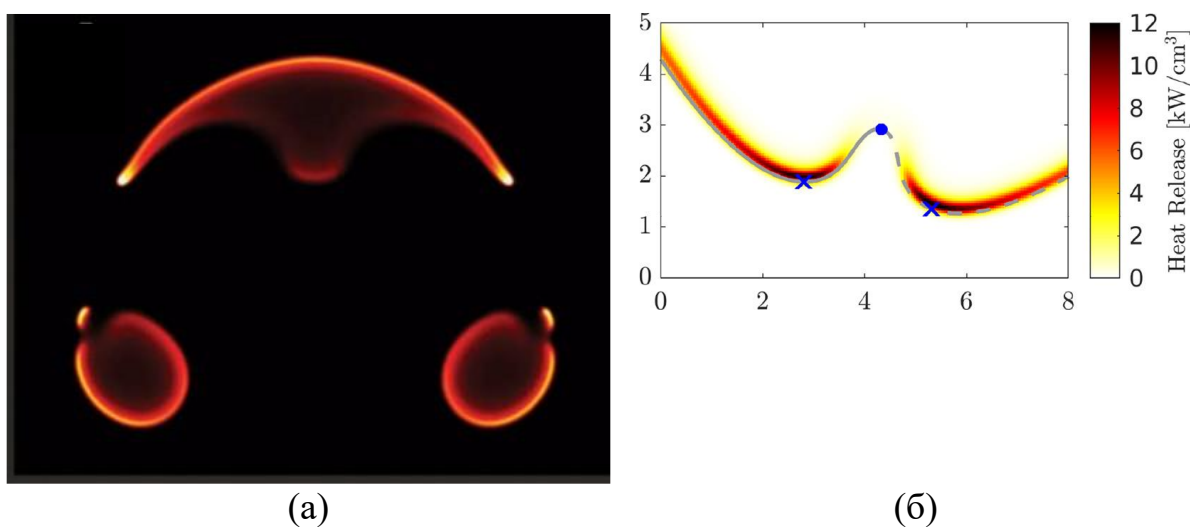


Рис. 37 – (а) – Формирование «колпачкообразной» структуры фронта пламени на ранней стадии конвективного движения ядра пламени, численно полученное распределение радикалов ОН [118]; (б) – пространственное распределение тепловыделения и изолинии в разные моменты времени [114].

Как видно из изображений на Рис. 25 и Рис. 26 колпачки пламени образуются на выпуклых краях первоначальных участков фронта пламени. В этих точках выполняются два условия, необходимых для неустойчивости горения. На выпуклой части фронта температура принимает максимально возможное значение [114]. Также выпуклая зона окружена наибольшим количеством несгоревшей смеси вокруг. В связи с малым содержанием горючего в смеси прирост скорости пламени, связанный с диффузией водорода больше падения скорости от потерь тепла на вершине колпачка. Таким образом, образование колпачков является следствием

термодиффузионной неустойчивости пламени. При этом фронт пламени непрерывно контактирует со стенками и возникает постоянная потеря тепла, приводящая к искривлению фронта. Выделение тепла, и, как следствие, температура на выпуклых участках фронта, больше, чем на вогнутых (Рис. 37б). Следовательно, образование отдельных колпачков пламени происходит при локальном затухании фронта пламени в вогнутостях, как показано на схеме Рис. 38.

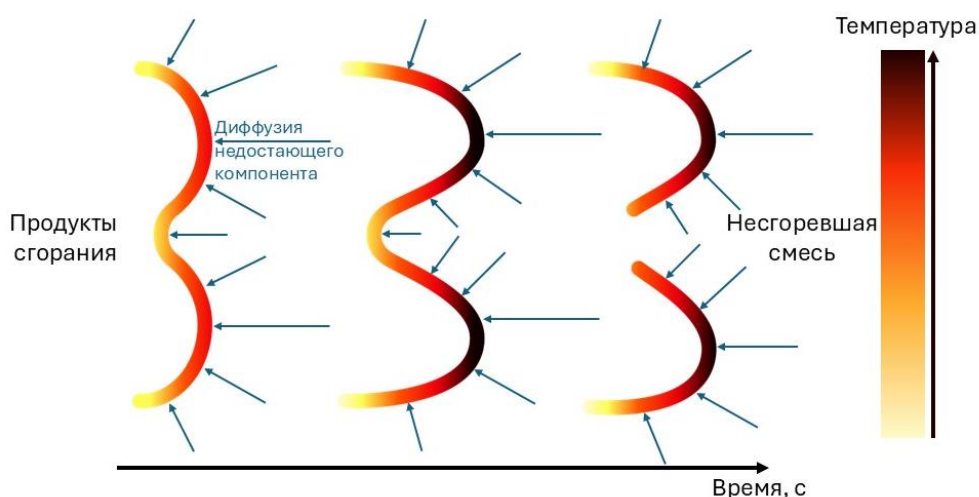


Рис. 38 – Схема распада фронта пламени. Градиентным цветом показана температура на фронте пламени, синими стрелками показан подвод недостающего реагента.

Изменение скорости фронта сопровождается и изменением его линейных размеров. Критерием, связывающим форму и скорость неразрывного фронта пламени, является коэффициент складчатости, как показано для сферического пламени [116] и для пламен, распространяющихся в плоском зазоре [41]. Коэффициент складчатости является отношением площади искривленного фронта пламени к площади гладкой сферы аналогичного среднего радиуса. В случае, когда фронт пламени распространяется между стенками плоского зазора, он искривляется как в направлении движения, так и по толщине зазора. Однако полученные инфракрасные кадры не демонстрируют искривления фронта в поперечном сечении камеры сгорания. Поэтому условимся считать фронт пламени

прямым по толщине зазора и рассматривать его линейный размер на изображении в качестве длины зоны реакции. При этом, как было показано ранее, непосредственно зона реакции располагается с наветренной стороны по направлению распространения, как отдельных участков фронта, так и колпачков пламени. Поэтому в качестве длины зоны реакции примем половину периметра замкнутых структур ячеек пламени на инфракрасных изображениях.

На Рис. 39 показано изменение длины фронта от времени в 7 об% водородно-воздушной смеси в зазоре 4 мм для одного участка дефлаграционного фронта, распадающегося на 2 «колпачкообразных» пламени. Периметр фронта пламени колпачков представлен на графике как сумма периметров всех отдельных колпачков. Максимальный размер фронта неразрывного пламени составил 25 мм. Распавшись на отдельные колпачки, периметр фронта пламени составил 18 мм, что в 1,3 раза меньше, чем размер неразрывного участка.

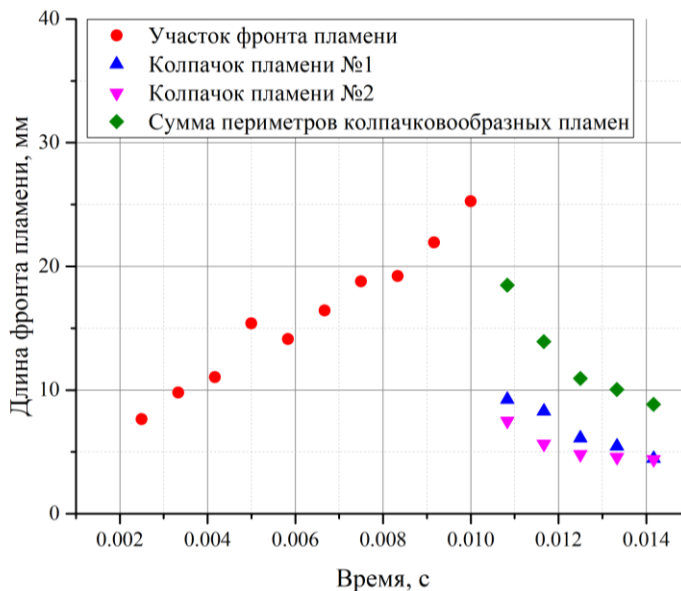


Рис. 39 – Периметр фронта пламени 7об.% водородно-воздушной смеси в зазоре толщиной 4 мм

Достигнув максимального размера, неразрывный участок фронта пламени не мог расширяться далее из-за нехватки горючего в смеси, однако отдельные колпачки, обладающие меньшим периметром фронта, могут продолжать горение. Общее потребление горючего и скорость движения колпачков уменьшается.

С увеличением концентрации водорода в смеси в различных экспериментах возникают бифуркации фронта пламени: «колпачкообразные» пламена разветвляются на несколько отдельных ячеек. На Рис. 40 показана сумма всех кадров с Рис. 24 на одном изображении. Данный рисунок дает четкое представление о распространении колпачков пламени, так как показывает, что между отдельными колпачками на протяжении всего процесса остается зона, в которой не происходит горения. Данные зоны без горения характеризуются диффузией горючего в колпачки. При увеличении зазора возрастает площадь фронта пламени, как следствие растет поток недостающего компонента к фронту пламени и увеличивается тепловыделение. Потери же тепла, в данном случае, определяются характеристиками стенок экспериментальной установки, моделирующей плоский зазор, и остаются неизменными при увеличении толщины зазора.

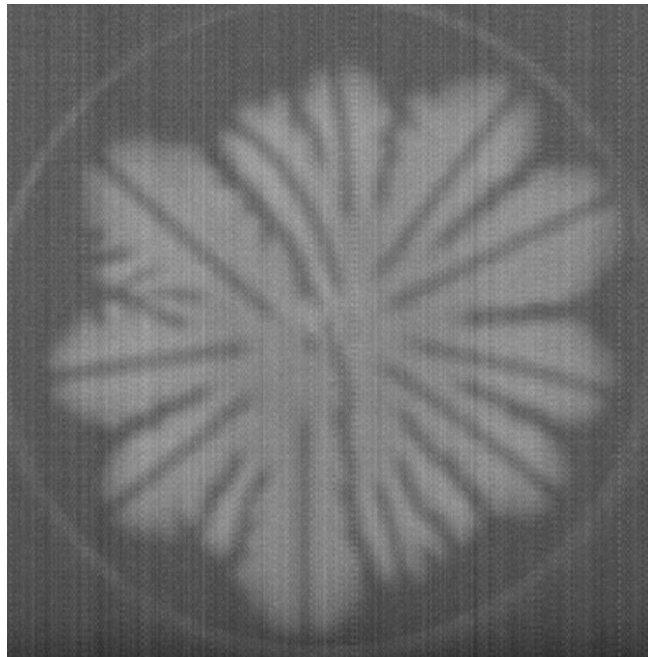


Рис. 40 – Сумма всех кадров на одном изображении.

В работе [36] была представлена карта режимов горения в плоских зазорах в зависимости от толщины зазора и объемной концентрации водорода в водородно-воздушной смеси (Рис. 41).

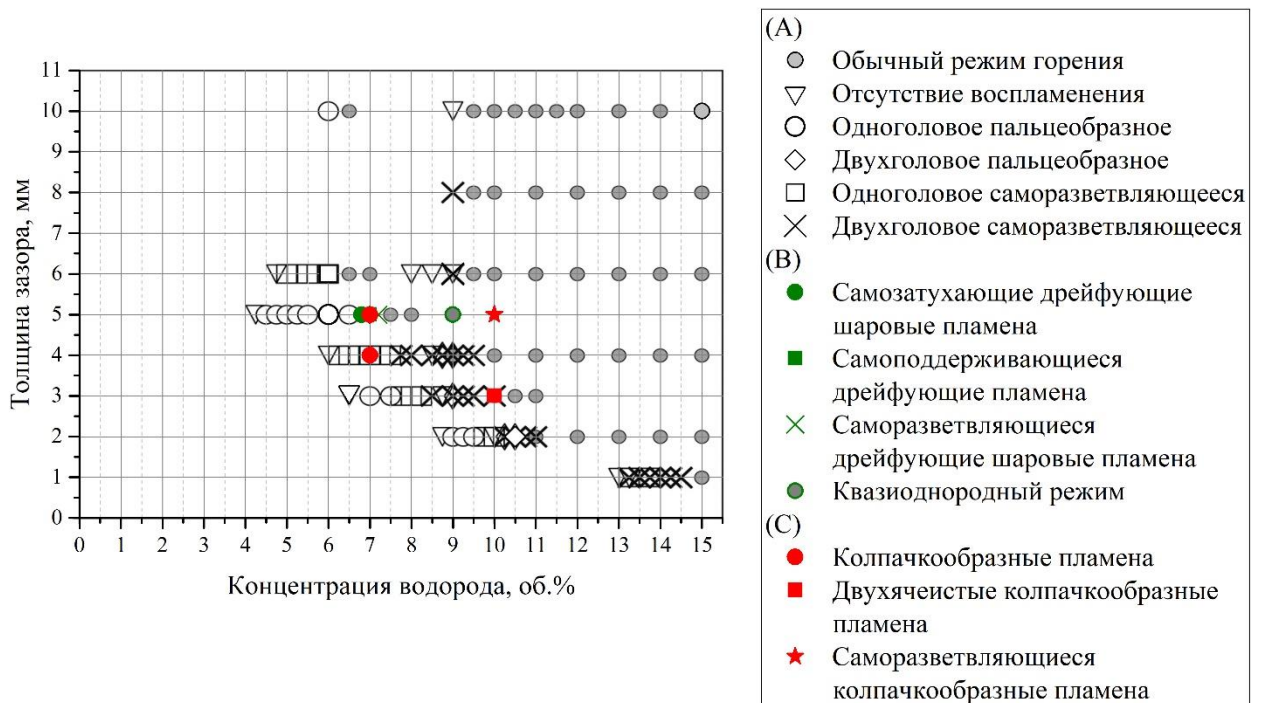


Рис. 41 – Карта режимов горения в зависимости от концентрации водорода и толщины зазора: (A) – данные работы [36], дополненная результатами работы (B) – [108] и результатами данной работы – (C).

Карта на Рис. 41 дополнена результатами работы [108] и результатами данного исследования. Режимы распространения пламени в виде «колпачкообразных» ячеек зафиксированы различными исследователями при относительно схожих параметрах. Естественное влияние на переход между режимами оказывают материалы, используемые исследователями и обладающие различными характеристиками теплопроводности и теплоёмкости.

Основным критерием термодиффузионной неустойчивости, описанной Зельдовичем [120], является число Льюиса. Число Льюиса в основном представимое в виде отношения коэффициента температуропроводности газа к коэффициенту диффузии хорошо работает для описания свободно распространяющегося фронта пламени. В данной задаче существенные потери тепла определяются именно стенками ячейки. Так, в работе [36] отмечается, что в смесях с концентрацией водорода от 4 до 15 об.% число Льюиса меняется незначительно: от 0,31 до 0,34, однако наблюдаемые режимы горения разительно отличаются. В той же работе представлен вывод, что число Льюиса не определяет режим распространения пламени. Существует подход, при котором оценивается критическое число Льюиса, исходя из числа Зельдовича [121, 44]. Однако в работе [50] сказано, что число Зельдовича получено в предположении отсутствия теплопередачи к стенкам сосуда, по которому распространяется пламя. Вышесказанное приводит к тому, что критическое число Льюиса, привычное для анализа свободно распространяющегося пламени не подходит для определения границы развития неустойчивого распространения фронта пламени в плоском зазоре. Данное расхождение отмечается и в современных работах. В работе [41] предложен метод расчета эффективного числа Льюиса для пламен, распространяющихся между стенками плоского зазора, однако и он не адаптирован для предсказания распада фронта пламени в тонких зазорах.

По экспериментальным изображениям были определены скорости распространения связного фронта пламени до распада и его периметр (Таблица 4). На основе данного набора параметров с учетом толщины фронта пламени и толщины зазора камеры сгорания был предложен критерий, сохраняющий близкие значения при распаде фронта пламени:  $K_{\text{decay}} = \frac{vL\delta_T}{\chi h}$ , где  $v$  – скорость фронта пламени в момент распада,  $L$  – периметр фронта пламени,  $\delta_T$  – толщина фронта пламени,  $\chi$  – температуропроводность газовой смеси,  $h$  – толщина зазора камеры сгорания. На основе скорости и периметра фронта пламени в момент распада и коэффициента температуропроводности было также построено число Пекле (столбец 4, Таблица 4).

Таблица 4. Параметры фронта пламени в момент распада и характеристики смеси

Параметры эксперимента	Периметр фронта $L$ , м	Скорость распространения $v$ , м/с	Температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$	Число Пекле $Pe = \frac{vL}{\chi}$	$K_{\text{decay}} = \frac{vL\delta_T}{\chi h}$
7 об.% $\text{H}_2$ , 4 мм	0,013	0,25	$2,6 \cdot 10^{-5}$	122	19.5
7 об.% $\text{H}_2$ , 5 мм	0,014	0,2	$2,6 \cdot 10^{-5}$	111	14.2
10 об.% $\text{H}_2$ , 3 мм	0,015	0,36	$2,9 \cdot 10^{-5}$	183	15.2
10 об.% $\text{H}_2$ , 5 мм	0,024	0,42	$2,9 \cdot 10^{-5}$	352	17.6

Из Таблица 4 видно, что величина  $K_{\text{decay}} = \frac{vL\delta_T}{\chi h}$  для распада фронта пламени в зазоре толщиной от 3 до 5 мм и концентрациях водорода в смеси 7 и 10 об.% принимают близкие значения в диапазоне от 14 до 20. Число Пекле



заметно меняется для каждого эксперимента (столбец 5, Таблица 4), поправка, вносимая отношением  $\frac{\delta_T}{h}$  меняет величину критерия до значений, лежащих в близком диапазоне.

Отметим, что в предложенном критерии  $K_{\text{decay}}$  используются параметры фронта пламени, когда в классическом числе Пекле в качестве характерной скорости принято считать нормальную скорость пламени, а характерным размером считают толщину плоского зазора. Эта особенность предложенного критерия позволяет предсказывать тенденцию к распаду конкретного участка фронта пламени на колпачкообразные ячейки. Так, медленные, стремящиеся к затуханию ячейки будут демонстрировать значения параметра меньше указанных в Таблица 4, а устойчивые быстрые ячейки после распада, например, наблюдаемые при распаде фронта 10 об.% смеси будут иметь значения параметра выше критических.

## 2.6 Инфракрасное излучение распространяющегося фронта пламени в плоском зазоре

Спектральные характеристики излучения газовых пламен сильно зависят от состава горящей смеси и геометрических характеристик объёма, в котором происходит сгорание. Ультрафиолетовое излучение пламени связано с колебательными переходами двухатомных радикалов OH, CH и CN [122]. Излучение в видимом спектре обычно вызвано радикалом CN и непрерывным спектром излучения частиц углерода [123, 124]. Инфракрасное излучение пламени обусловлено колебательными переходами в конечных продуктах сгорания, таких как H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> [125]. Особенностью бедного водородно-воздушного пламени является практически полное отсутствие излучения в видимой области спектра.

В пионерских работах, например [126], использовался метод спектрографии для определения излучения пламен. Развитие микроэлектроники привело к созданию многодетекторных инфракрасных матриц [127]. Одной из первых работ по визуализации водородно-воздушного пламени с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры можно считать работу Т. Моги [128]. Однако, приведённые в работе [128] ИК-изображения водородно-воздушного пламени сделаны с высоким временем экспозиции и не позволяют получить дополнительную информацию об излучении продуктов сгорания за фронтом пламени. То есть, часть потенциально полезной информации теряется. При правильном выборе времени экспозиции инфракрасная визуализация фронта пламени позволяет получить полутоновое изображение, интенсивность в каждой точке которого зависит от распределения интенсивности излучения по объёму и от формы фронта пламени. Интенсивность излучения зависит от различных факторов, однако основной определяющей величиной является температура на фронте водородно-воздушного пламени.

Для дальнейшего анализа требуются дополнительные предположения. Например, в работе [116] в предположении постоянных температуры и состава газа за фронтом глобально сферического пламени получена структура фронта. Предполагая осесимметричность фронта пламени, можно получить распределение интенсивности свечения вдоль радиуса. Для этого потребуется использовать преобразования, основанные на решении сингулярного интегрального уравнения Абеля [129]. Требование осесимметричности невыполнимо при свободном горении бедных смесей с содержанием водорода менее 30 об.% из-за неустойчивости фронта пламени [130].

Инфракрасная визуализация фронта пламени, распространяющегося в плоском зазоре, позволяет уйти от необходимости использования математических преобразований и даст возможность исследовать бедные смеси с содержанием водорода менее 30 об.%. При центральном воспламенении в плоском зазоре фронт пламени будет двигаться по плоскости вдоль радиуса с центром в точке инициирования. Расположенная перпендикулярно плоскости инфракрасная камера будет регистрировать движущийся фронт пламени, а также интенсивность излучения продуктов сгорания за ним. После прохождения фронтом пламени расстояния больше, чем высота зазора, фронт пламени касается стенок, гаснет и из сферического становится плоским, таким образом, между объективом камеры и продуктами сгорания отсутствует зона реакции. При такой постановке задачи инфракрасная камера вдоль направления распространения фронта пламени регистрирует излучение продуктов сгорания, то есть паров воды, зону реакции и излучение несгоревшей смеси.

Исследования инфракрасного излучения продуктов сгорания проводились с водородно-воздушными смесями с содержанием водорода 10, 15 и 20 об.%. при толщине зазора 3, 5, 7 и 10 мм. На Рис. 42 показаны инфракрасные изображения фронтов пламени.

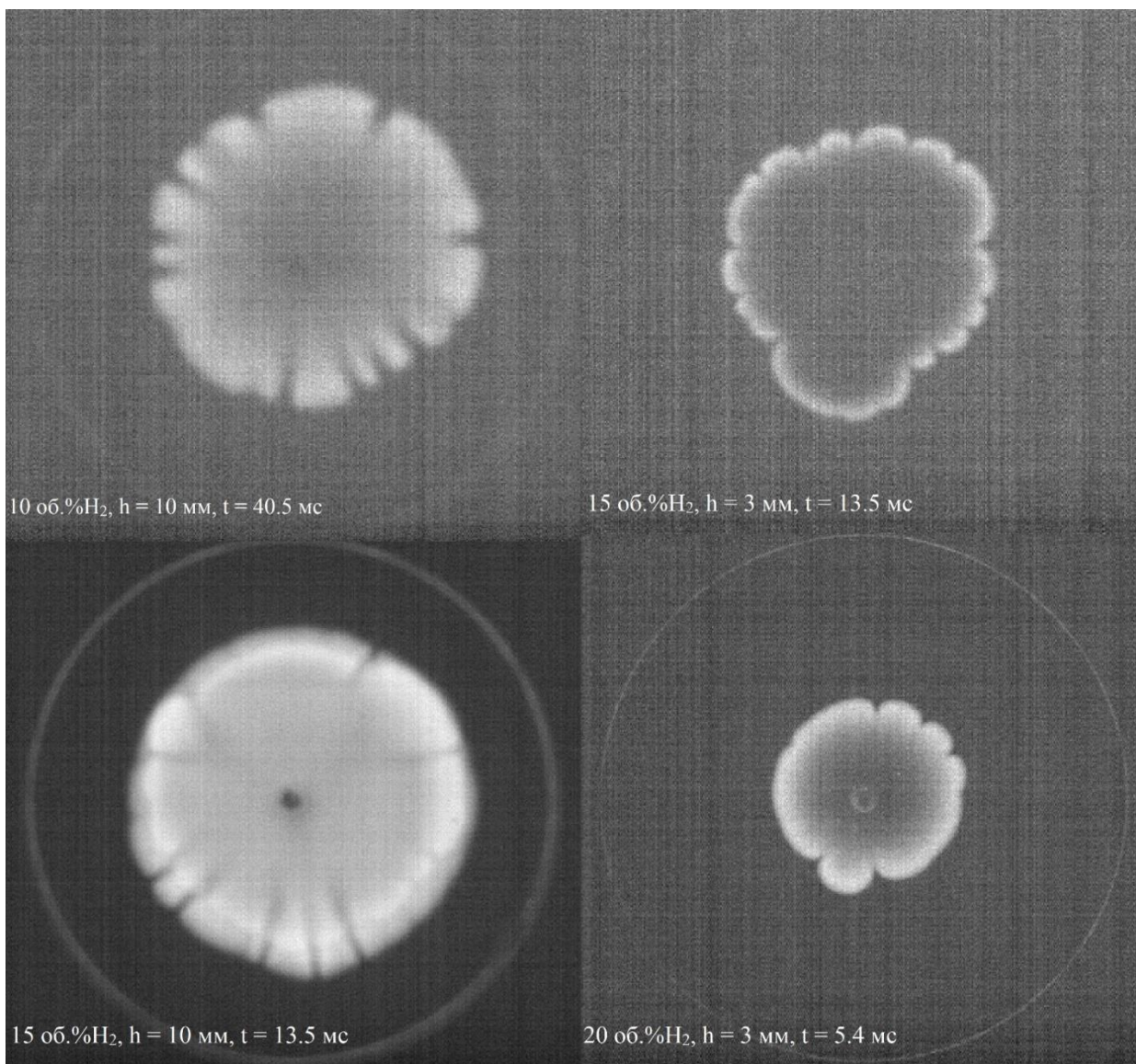


Рис. 42 – Инфракрасные изображения фронта водородно-воздушного пламени: сверху слева – 10 об.% содержания водорода в смеси, 10 мм толщина зазора, момент времени 50 мс, сверху справа – 15 об.% содержания водорода в смеси, 3 мм толщина зазора, момент времени 16.7 мс, снизу слева – 15 об.% содержания водорода в смеси, 10 мм толщина зазора, момент времени 16.7 мс, снизу справа – 20 об.% содержания водорода в смеси, 3 мм толщина зазора, момент времени 6.7 мс.

Использование инфракрасной камеры позволяет представить данные изображения в виде матрицы интенсивности излучения в Вт/м<sup>2</sup>. С помощью компьютерной программы, написанной в среде MatLab, были получены графики распределения интенсивности излучения вдоль радиуса. Из точки

инициирования по лучу выделялись полосы интенсивности излучения со смещением по углу. Полученные данные усреднялись по всем полученным лучам, что в итоге позволило построить зависимость интенсивности излучения от радиуса для каждого момента времени.

На Рис. 43 показан график распределения интенсивности излучения вдоль радиуса для различных моментов времени распространения водородно-воздушного фронта пламени с содержанием водорода 10 об.% в зазоре толщиной 10 мм.

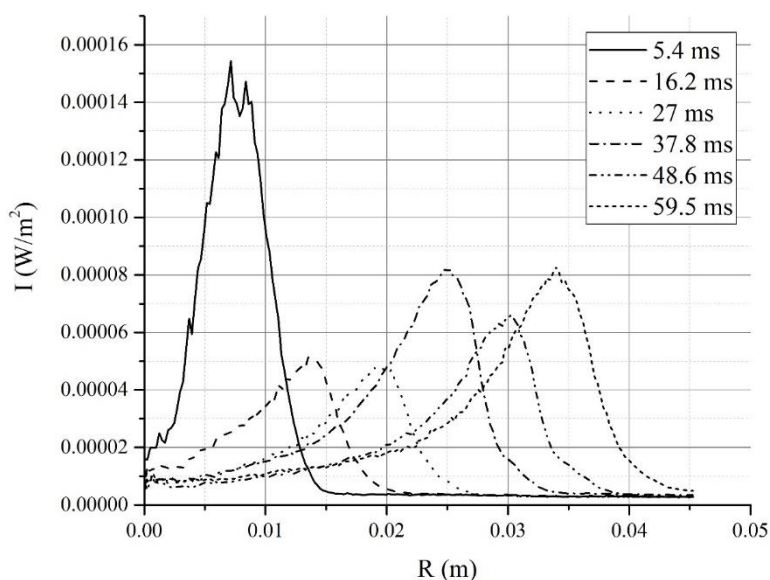


Рис. 43 – График распределения интенсивности излучения вдоль радиуса для различных моментов времени распространения водородно-воздушного фронта пламени с содержанием водорода 10 об.% в зазоре толщиной 10 мм.

На Рис. 43 пики интенсивности излучения соответствуют излучению продуктов сгорания в области, близкой к зоне реакции. По данному графику видно наличие существенного остывания продуктов сгорания, расположенных ближе к точке инициирования. Высокие значения интенсивности излучения на начальной стадии (5.4 мс) соответствуют моменту инициирования, когда фронт пламени еще являлся

полусферическим, так как точка инициирования в данной постановке эксперимента находится на нижней стенке ячейки.

На Рис. 44 показаны графики распределения интенсивности излучения вдоль радиуса для различных моментов времени распространения водородно-воздушного фронта пламени с содержанием водорода 15 об.% в зазорах толщиной 5, 7 и 10 мм соответственно.

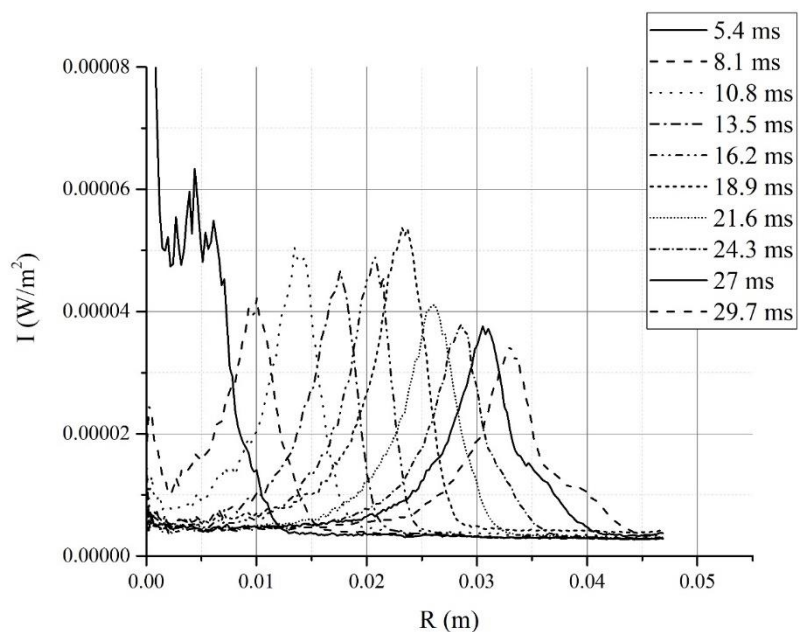


Рис. 44 – График распределения интенсивности излучения вдоль радиуса для различных моментов времени распространения водородно-воздушного фронта пламени с содержанием водорода 15 об.% в зазоре толщиной 5 мм.

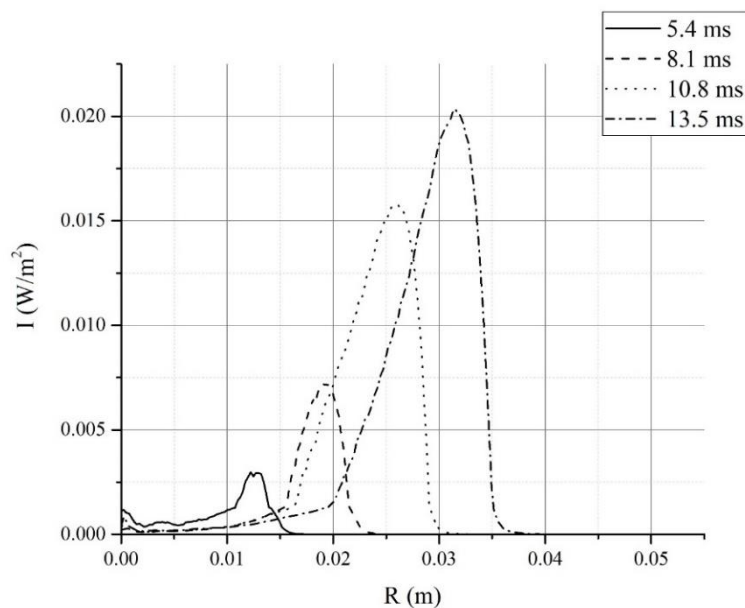


Рис. 45 – График распределения интенсивности излучения вдоль радиуса для различных моментов времени распространения водородно-воздушного фронта пламени с содержанием водорода 15 об.% в зазоре толщиной 7 мм.

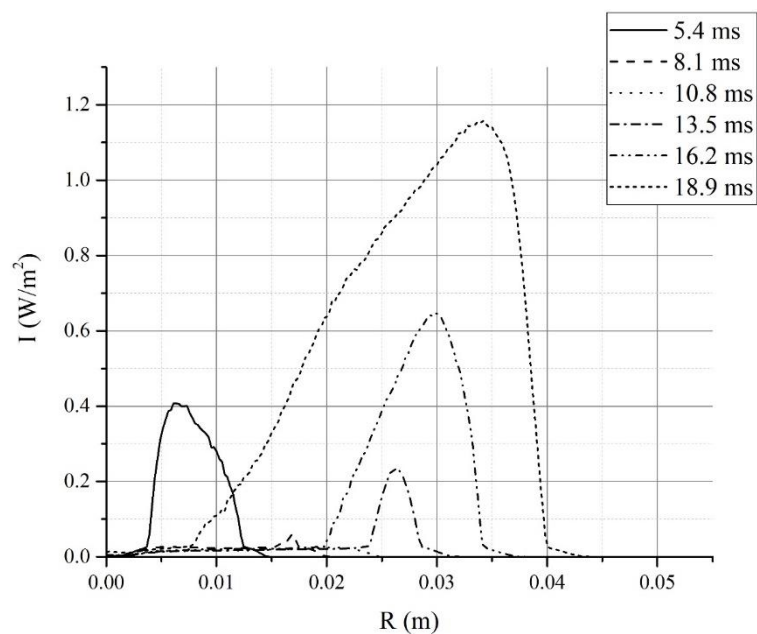


Рис. 46. – График распределения интенсивности излучения вдоль радиуса для различных моментов времени распространения водородно-воздушного фронта пламени с содержанием водорода 15 об.% в зазоре толщиной 10 мм.

На представленных графиках видно, что с увеличением толщины плоского зазора пики интенсивности излучения продуктов сгорания расширяются в сторону точки инициирования. Это свидетельствует о том, что остывание продуктов сгорания происходит медленнее. Более того, из-за адиабатического сжатия, интенсивность излучения продуктов сгорания 15 об.% смеси в зазоре толщиной 10 мм на радиусе 30 мм в момент времени 16.2 мс ниже, чем интенсивность излучения в момент времени 18.9 мс на том же радиусе. Рост давления в совокупности с возросшим тепловыделением приводит к большему нагреву продуктов сгорания. Аналогичный эффект отмечается и при сгорании смеси с 20 об.% содержанием водорода (Рис. 47 - 9).

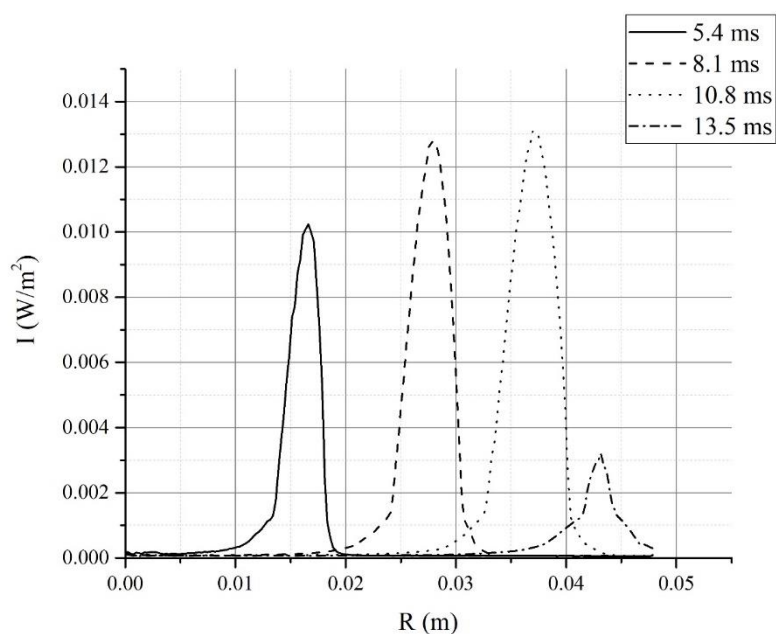


Рис. 47 – График распределения интенсивности излучения вдоль радиуса для различных моментов времени распространения водородно-воздушного фронта пламени с содержанием водорода 20 об.% в зазоре толщиной 3 мм.



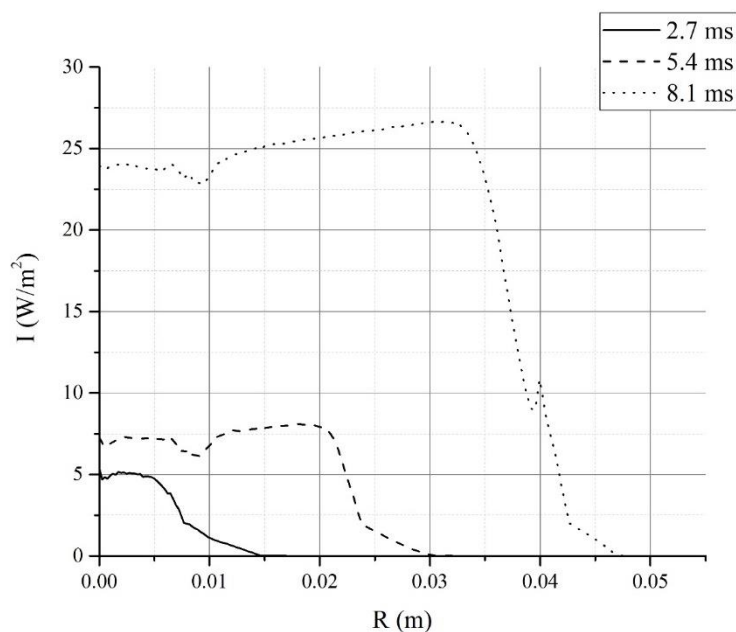


Рис. 48 – График распределения интенсивности излучения вдоль радиуса для различных моментов времени распространения водородно-воздушного фронта пламени с содержанием водорода 20 об.% в зазоре толщиной 10 мм.

Важно отметить также и рост скорости распространения фронта пламени в зависимости от толщины плоского зазора. На Рис. 49 представлен график зависимости среднего радиуса фронта пламени от времени при горении смесей с 10, 15 и 20 об.% в зазорах толщиной 3, 5, 7 и 10 мм.

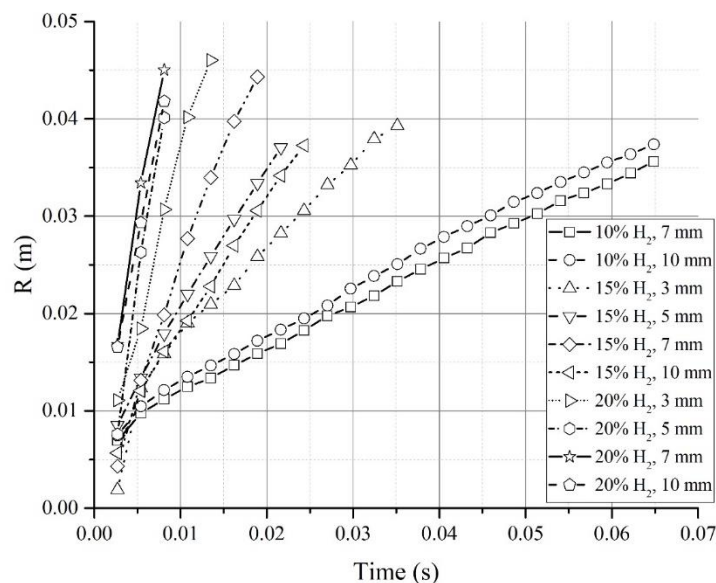


Рис. 49 – График зависимости среднего радиуса от времени смесей с 10, 15 и 20 об.% в зазорах толщиной 3, 5, 7 и 10 мм.

Выявлено, что интенсивность излучения продуктов сгорания, а как следствие, и их температура, зависят как от состава смеси, так и от толщины зазора. Во всех случаях постановки эксперимента теплопоглощение стенками остается неизменным, так как оно зависит лишь от физических свойств материала стенок. Увеличение концентрации горючего или увеличение толщины зазора приводит к увеличению среднего тепловыделения при сгорании. При уменьшении толщины зазора отмечается остывание продуктов сгорания за фронтом реакции.

Следует отметить и зависимость скорости распространения фронта пламени от толщины зазора. При увеличении толщины зазора при неизменной концентрации смеси скорость распространения фронта пламени увеличивается до 3 раз.

## **Выводы по Главе 2**

В Главе 2 данной работы приведены результаты исследования режимов горения, возникающих в плоских зазорах аналогичных ячейке Хеле-Шоу. Они обуславливаются соотношением между выделением и потерями тепла. При критических соотношениях фронт неразрывного пламени, образующийся после инициирования горения и движущийся по направлению от точки воспламенения испытывает сильное искривление и локальное затухание в областях вогнутости. Он распадается на отдельные колпачкообразные пламена, движущиеся также радиально. Между колпачками пламени наблюдаются зоны, где горения не происходит. Из данных зон недостающий компонент, а в случае бедных и ультрабедных пламен – это водород, диффундирует в колпачки пламени. Механизм распада фронта пламени соответствует термодиффузионной неустойчивости, так как потери тепла в стенки остаются постоянными. При увеличении концентрации горючего или увеличении толщины зазора количество колпачкообразных пламен растет и возникают режимы, когда колпачкообразные пламена могут состоять из двух ячеек, движущихся параллельно друг другу. По мере развития пламени наблюдается бифуркация колпачков, образуются новые колпачки пламени.

В экспериментах по распространению бедных и ультра-бедных водородно-воздушных пламен в плоских зазорах впервые получены инфракрасные изображения, которые позволили зарегистрировать процесс распада фронта пламени на отдельные ячейки. Локально затухающий фронт пламени разваливается на отдельные колпачкообразные ячейки, соответствующие выпуклым областям складчатого фронта пламени до его распада. Механизм образования отдельных колпачков пламени соответствует термодиффузионной неустойчивости.

Проанализирована форма фронта пламени колпачкообразных пламен в плоских зазорах. По аналогии с всплывающими пламенами и на основе

известной скорости диффузии водорода выявлено, что отдельные элементы фронта пламени распространяются в виде «колпачкообразных» ячеек. Высокая скорость распространения «колпачкообразных» пламен и низкая скорость диффузии водорода не могут дать возможности образования шаровых пламен.

Скорость «колпачкообразных» ячеек в 2.5 раза меньше скорости распространения фронта пламени до распада. Длина зоны реакции «колпачкообразных» пламени может быть ниже, либо практически равной длине зоны реакции неразрывного фронта до распада в зависимости от концентрации смеси.

Предложен критерий распада фронта пламени в плоском зазоре на основе скорости и периметра фронта пламени в момент его распада. Для смесей с концентрацией водорода 7 и 10 об. % в зазорах толщиной от 3 до 5 мм критерий сохраняет близкие значения при распаде фронта пламени.

Выявлено, что интенсивность излучения продуктов сгорания, а как следствие, и их температура, зависят как от состава смеси, так и от толщины зазора. Во всех случаях постановки эксперимента теплопоглощение стенками остается неизменным, так как оно зависит лишь от физических свойств материала стенок. Увеличение концентрации горючего или увеличение толщины зазора приводит к увеличению среднего тепловыделения при сгорании. При уменьшении толщины зазора отмечается остывание продуктов сгорания за фронтом реакции. Следует отметить и зависимость скорости распространения фронта пламени от толщины зазора. При увеличении толщины зазора скорость распространения фронта пламени увеличивается до 2 раз.

## **Заключение**

В данной работе представлены научные результаты в области исследования распространения водородно-воздушных пламен в различных геометриях. Эксперименты выявили структуру «обратного пальцеобразного» пламени при периферийном воспламенении водородно-воздушных смесей в трубах и каналах, которое распространяется с более высокой скоростью, чем классическое «пальцеобразное» пламя, полученное при центральном зажигании. Определено оптимальное соотношение площади пластины, формирующей кольцевую щель, и площади поперечного сечения канала, обеспечивающее максимальную скорость фронта пламени.

В плоских зазорах исследованы режимы горения, обусловленные соотношением между выделением и потерями тепла. Впервые получены инфракрасные изображения распада фронта пламени на отдельные «колпачкообразные» ячейки, соответствующие термодиффузионной неустойчивости. Проанализирована форма фронта пламени «колпачкообразных» ячеек, предложен критерий распада фронта пламени в плоском зазоре. Выявлено влияние толщины зазора на скорость распространения фронта пламени и температуру продуктов сгорания.

Общие выводы свидетельствуют о том, что периферийное воспламенение водородно-воздушных смесей в трубах и каналах позволяет достичь более высоких скоростей распространения пламени по сравнению с центральным воспламенением. В плоских зазорах наблюдается распад фронта пламени на отдельные «колпачкообразные» ячейки, что связано с термодиффузионной неустойчивостью. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов горения в двигателях внутреннего сгорания, камерах сгорания и других технических устройствах. Данная работа вносит значительный вклад в понимание механизмов распространения водородно-воздушных пламен в различных геометриях и открывает новые возможности для их практического применения.

## Список литературы

1. Chien F. и др. Dynamic planning, conversion, and management strategy of different renewable energy sources: a sustainable solution for severe energy crises in emerging economies // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – Т. 46, № 11. – С. 7745-7758.
2. Li P. и др. Experimental study on shock waves, spontaneous ignition, and flame propagation produced by pressurized hydrogen release through tubes with varying obstacle location // *Fuel*. – 2021. – № 290. – С. 120093.
3. Chen W.H. и др. A new design of catalytic tube reactor for hydrogen production from ethanol steam reforming // *Fuel*. – 2020. – № 281. – С. 118746.
4. ПЛАН мероприятий "Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года". – 2020. [Электронный ресурс]. Доступно по: <http://government.ru/docs/40703/>.
5. Chatti W. Moving towards environmental sustainability: information and communication technology (ICT), freight transport, and CO2 emissions // *Heliyon*. – 2021. – Т. 7, № 10.
6. White C.M., Steeper R. и Lutz A. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2006. – № 31. – С. 1292-1305.
7. Verhelst S. Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – № 39. – С. 1071-1085.
8. Haller J. и Link T. Thermodynamic concept for an efficient zero-emission combustion of hydrogen and oxygen in stationary internal combustion engines with high power density // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – № 44. – С. 27374-27387.

9. Yoshida T. и Kojima K. Toyota MIRAI fuel cell vehicle and progress toward a future hydrogen society // *The Electrochemical Society Interface*. – 2015. – Т. 24, № 2. – С. 45.
10. Palmer K. и Tonkin P. The quenching of flames by crimped ribbon flame arresters // *Fire Safety Science*. – 1960. – Т. 438.
11. Palmer K. и Tonkin P. The quenching of flames of various fuels in narrow apertures // *Combustion and Flame*. – 1963. – Т. 7. – С. 121-127.
12. Langford B., Palmer K. и Tonkin P. The performance of flame arresters against flames propagating in various fuel/air mixtures // *Fire Safety Science*. – 1961. – Т. 486.
13. Sun S. и др. Numerical simulation of detonation wave propagation and quenching process in in-line crimped-ribbon flame arrester // *Cogent Engineering*. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 1469377.
14. Шарыпов О. и Пирогов Е. О механизме ослабления и срыва газовой детонации в каналах с акустически поглощающими стенками // *Физика горения и взрыва*. – 1995. – Т. 31, № 4. – С. 532-559.
15. Jin K. и др. Experimental study on the influence of multi-layer wire mesh on dynamics of premixed hydrogen-air flame propagation in a closed duct // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – Т. 42, № 21. – С. 14809-14820.
16. Pang L. и др. A study on the characteristics of the deflagration of hydrogen-air mixture under the effect of a mesh aluminum alloy // *Journal of Hazardous Materials*. – 2015. – Т. 299. – С. 174-180.
17. Nie B. и др. The roles of foam ceramics in suppression of gas explosion overpressure and quenching of flame propagation // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011. – Т. 192, № 2. – С. 741-747.
18. Wei H. и др. Different combustion modes caused by flame-shock interactions in a confined chamber with a perforated plate // *Combustion and Flame*. – 2017. – Т. 178. – С. 277-285.

19. Zhou L. и др. Flame propagation and combustion modes in end-gas region of confined space // *Combustion and Flame*. – 2018. – Т. 190. – С. 216-223.
20. Wang C. и Wen J. The effect of a perforated plate on the propagation of laminar hydrogen flames in a channel—A numerical study // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – Т. 39, № 36. – С. 21335-21342.
21. Grossel S. Deflagration and detonation flame arresters. – John Wiley & Sons, 2010.
22. Kakutkina N.Y.A. и др. Flame propagation through the header of an in-line flame arrester // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2007. – Т. 43. – С. 391-404.
23. Bauer P. Experimental investigation on flame and detonation quenching: applicability of static flame arresters // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2005. – Т. 18, № 2. – С. 63-68.
24. Thomas G. и Oakley G. On practical difficulties encountered when testing flame and detonation arresters to BS 7244 // *Process Safety and Environmental Protection*. – 1993. – Т. 71. – С. 187-193.
25. Howard W. Flame arresters and flashback preventers // *Plant/Operations Progress*. – 1982. – № 4. – С. 203-208.
26. Asano S. и др. Visualization of behaviors of a propagating flame quenching for hydrogen–air gas mixture // *Journal of Visualization*. – 2010. – Т. 13. – С. 107-119.
27. Beauvais R., Mayinger F. и Strube G. Turbulent flame acceleration-mechanisms and significance for safety considerations // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 1994. – Т. 19, № 8. – С. 701-708.
28. Розовский Л. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – Москва: Химия, 1980.
29. Васильев А.А. Околопредельные режимы детонации в каналах с пористыми стенками // *Физика горения и взрыва*. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 101.



- 30.Щелкин К.И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. – Москва: Военное издательство министерства вооруженных сил союза ССР, 1949.
- 31.Chanut C. и др. Visualization of aluminum dust flame propagation in a square-section tube: comparison of schlieren, shadowgraphy and direct visualization techniques // *Journal of Visualization*. – 2020. – Т. 23. – С. 885-894.
- 32.Yu Z. и др. Premixed flame propagation of methane/carbon monoxide/air in a closed tube with an obstacle // *Combustion Science and Technology*. – 2021. – Т. 193, № 15. – С. 2724-2740.
- 33.Krivosheyev P., Penyazkov O. и Sakalou A. Analysis of the final stage of flame acceleration and the onset of detonation in a cylindrical tube using high-speed stereoscopic imaging // *Combustion and Flame*. – 2020. – Т. 216. – С. 146-160.
- 34.Golub V. и др. Propagation of a hemispherical flame over a heat-absorbing surface // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2019. – Т. 37, № 2. – С. 2583-2589.
- 35.Alexeev M.M., Semenov O.Y. и Yakush S.E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates // *Combustion Science and Technology*. – 2019. – Т. 191, № 7. – С. 1256-1275.
- 36.Escanciano J.Y., Kuznetsov M. и Veiga-López F. Characterization of unconventional hydrogen flame propagation in narrow gaps // *Physical Review E*. – 2021. – Т. 103, № 3. – С. 033101.
- 37.Kuznetsov M., Tengah G.J.S. и Yanez J. Experimental study of 2d-instabilities of hydrogen flames in flat layers // *Proc. of 25th ICDER*. – 2015. – С. 6.
- 38.Kuznetsov M. и Grune J. Experiments on combustion regimes for hydrogen/air mixtures in a thin layer geometry // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Т. 44, № 17. – С. 8727-8742.

39. Kuznetsov M., Yanez J., Grüne J., López F.V. и Sánchez-Sanz M. Flame Propagation Near the Limiting Conditions in a Thin Layer Geometry // International Conference on Hydrogen Safety. Conference paper. – 2019. – С. 1-12.
40. Москалев П.В., Денисенко В.П. и Кириллов И.А. Классификация и динамика ультрабедных водородно-воздушных пламен в горизонтальных цилиндрических ячейках Хеле-Шоу // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 164, № 1. – С. 117.
41. Ballossier Y., Boivin P. и Almarcha C. Three dimensional shapes of hydrogen-air flames within millimetric Hele Shaw cells // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Т. 60. – С. 333-341.
42. Gu G.H.J., Han W. и Wang C. Propagation of hydrogen–oxygen flames in Hele-Shaw cell // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Т. 46, № 21. – С. 12009-12015.
43. Jang H.J., Jang G.M. и Kim N.I. Unsteady propagation of premixed methane/propane flames in a mesoscale disk burner of variable-gaps // Proceedings of the Combustion Institute. – 2019. – Т. 37, № 2. – С. 1861-1868.
44. Yanez J., Kagan L., Sivashinsky G. и Kuznetsov M. Modeling of 2D self-drifting flame-balls in Hele-Shaw cells // Combustion and Flame. – 2023. – Т. 258. – С. 113059.
45. Zhenzhong Y., Jiakai W., Hongli Y., Huawei Z. и Jianlun X. Diagnosis and control of abnormal combustion of hydrogen internal combustion engine based on the hydrogen injection parameters // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Т. 47, № 35. – С. 15887-15895.
46. Luo Q. и Sun B. Inducing factors and frequency of combustion knock in hydrogen internal combustion engines // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Т. 41, № 36. – С. 16296-16305.

- 47.Szwaja S. Dilution of fresh charge for reducing combustion knock in the internal combustion engine fueled with hydrogen rich gases // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Т. 44, № 34. – С. 9017-19025.
- 48.Li Y. и др. Effects study of injection strategies on hydrogen-air formation and performance of hydrogen direct injection internal combustion engine // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Т. 44, № 47. – С. 26000-26011.
- 49.Li Y. и др. Influence of the equivalence ratio on the knock and performance of a hydrogen direct injection internal combustion engine under different compression ratios // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Т. 46, № 21. – С. 11982-11999.
- 50.Zeldowitsch J.B. и Frank-Kamenetzki D.A. A theory of thermal propagation of flame // Dynamics of curved fronts. – Academic Press, 1988. – С. 131-140.
- 51.Zeldovich I.B. и Kompaneets A.S. Theory of Detonation. – Academic Press, 1960.
- 52.Shen T., Li M. и Xiao H. Propagation of premixed hydrogen-air flame initiated by a planar ignition in a closed tube // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Т. 47, № 7. – С. 4903-4915.
- 53.Dong J. и др. An experimental study on the effect of the flaring rate on flame dynamics in open pipes // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Т. 47, № 9. – С. 6365-6376.
- 54.Дицент В. и Щелкин К. Быстрое горение в шероховатых трубах // Журнал физической химии. – 1945. – Т. 19, № 4. – С. 221-227.
- 55.Zhang B. The influence of wall roughness on detonation limits in hydrogen–oxygen mixture // Combustion and Flame. – 2019. – Т. 169. – С. 333-339.
- 56.Zhang B. и Liu H. The effects of large scale perturbation-generating obstacles on the propagation of detonation filled with methane–oxygen mixture // Combustion and Flame. – 2017. – Т. 182. – С. 279-287.

57. Thomas G.O. и Williams R.L. Detonation interaction with wedges and bends // *Shock Waves*. – 2002. – Т. 11. – С. 481-492.
58. Medvedev S.P. и др. Deflagration-to-detonation transition in air-binary fuel mixtures in an obstacle-laden channel // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. – 2010. – Т. 4. – С. 70-74.
59. Dorofeev S.B. и др. Effect of scale on the onset of detonations // *Shock Waves*. – 2000. – Т. 10, № 2. – С. 137-149.
60. Golovastov S., Mikushkin A. и Golub V. Deflagration-to-detonation transition in spiral channels // *Technical Physics*. – 2017. – Т. 62. – С. 1496-1499.
61. Шамшин И.О. и др. Быстрый переход горения в детонацию в спиралевидных трубках // *Горение и взрыв* – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 29-50.
62. Rakotoarison W., Pekalski A. и Radulescu M. Detonation transition criteria from the interaction of supersonic shock-flame complexes with different shaped obstacles // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2020. – Т. 64. – С. 103963.
63. Emami S. и др. LES of flame acceleration and DDT in hydrogen–air mixture using artificially thickened flame approach and detailed chemical kinetics // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2015. – Т. 40, № 23. – С. 7395-7408.
64. Xiao H. и Oran E. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in hydrogen-air mixture in a channel with an array of obstacles of different shapes // *Combustion and Flame*. – 2020. – Т. 220. – С. 378-393.
65. Liu D., Liu Z. и Xiao H. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in narrow channels filled with stoichiometric hydrogen-air mixture // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – Т. 47, № 20. – С. 11052-11067.
66. Ivanov M.F. и др. Hydrogen–oxygen flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in three-dimensional rectangular channels with no-slip

- walls // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2013. – Т. 38, № 36. – С. 16427-16440.
67. Kagan L., Gordon P. и Sivashinsky G. An asymptotic study of the transition from slow to fast burning in narrow channels // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2015. – Т. 35, № 1. – С. 913-920.
68. Kagan L. и Sivashinsky G. On the transition from deflagration to detonation in narrow tubes // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2010. – Т. 84. – С. 423-437.
69. Demir S. и др. Towards a predictive scenario of a burning accident in a mining passage // *Combustion Theory and Modelling*. – 2017. – Т. 21, № 6. – С. 997-1022.
70. Yang X. и др. An experimental study on premixed syngas/air flame propagating across an obstacle in closed duct // *Fuel*. – 2020. – Т. 267. – С. 117200.
71. Gamezo V., Ogawa T. и Oran E. Numerical simulations of flame propagation and DDT in obstructed channels filled with hydrogen–air mixture // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – Т. 31, № 2. – С. 2463-2471.
72. Toliás I.C. и др. Best practice guidelines in numerical simulations and CFD benchmarking for hydrogen safety applications // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Т. 44, № 17. – С. 9050-9062.
73. Zhu S. и др. A review of the pre-chamber ignition system applied on future low-carbon spark ignition engines // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Т. 154. – С. 111872.
74. Benajes J. и др. Evaluation of the passive pre-chamber ignition concept for future high compression ratio turbocharged spark-ignition engines // *Applied Energy*. – 2019. – Т. 248. – С. 576-588.
75. Xiao H. и др. An investigation of premixed flame propagation in a closed combustion duct with a 90 bend // *Applied Energy*. – 2014. – Т. 134. – С. 248-256.

76. Frolov S.M., Aksenov V.S., Shamshin I.O. Shock wave and detonation propagation through U-bend tubes // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – Т. 31, № 2. – С. 2421-2428.
77. Cao Y. и др. Effect of ignition location on external explosion in hydrogen–air explosion venting // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – Т. 42, № 15. – С. 10547-10554.
78. Yu M. и др. Experimental study on explosion characteristics of syngas with different ignition positions and hydrogen fraction // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Т. 44, № 29. – С. 15553-15564.
79. Luo X. и др. Effects of ignition location, obstacles, and vent location on the vented hydrogen-air deflagrations with low vent burst pressure in a 20-foot container // *Fuel*. – 2020. – Т. 280. – С. 118677.
80. Dai T., Zhang B. и Liu H. On the explosion characteristics for central and end-wall ignition in hydrogen-air mixtures: A comparative study // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – Т. 46, № 60. – С. 30861-30869.
81. Elyanov A., Golub V. и Volodin V. Premixed hydrogen-air flame front dynamics in channels with central and peripheral ignition // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – Т. 47, № 53. – С. 22602-22615.
82. Володин В., Голуб В. и Ельянов А. Горение водородно-воздушных смесей в канале при кольцевом воспламенении // *Теплофизика высоких температур*. – 2022. – Т. 60, № 6. – С. 957-960.
83. Leblanc L. и др. Dynamics of unconfined spherical flames: Influence of buoyancy // *Physics of Fluids*. – 2013. – Т. 25, № 9.
84. Саламандра Г.Д., Баженова Т.Б. и Набоко И.М. Формирование детонационной волны при горении газа в трубах // *Журнал технической физики*. – 1959. – Т. 29, № 11. – С. 1354.
85. Митин И. и Русаков В. Анализ и обработка экспериментальных данных: Учебно-методическое пособие для студентов младших курсов. – Москва: Физический факультет МГУ, 2002.

86. Kornilov V. Experimental research of acoustically perturbed Bunsen flames. – Eindhoven, 2006.
87. Несжимаемая жидкость // Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – М., Наука, 1986. – Гл. 2. – С. 36-48.
88. Valiev D., Akkerman V., Kuznetsov M., Eriksson L., Law C. и Bychkov V. Influence of gas compression on flame acceleration in the early stage of burning in tubes // Combustion and Flame. – 2013. – Т. 160, № 1. – С. 97-111.
89. Bychkov V., Akkerman V.Y., Fru G., Petchenko A. и Eriksson L.E. Flame acceleration in the early stages of burning in tubes // Combustion and Flame. – 2007. – Т. 150, № 4. – С. 263-276.
90. Akkerman V., Law C.K. и Bychkov V. Self-similar accelerative propagation of expanding wrinkled flames and explosion triggering // Physical Review E. – 2011. – Т. 83, № 2. – С. 026305.
91. Golub V. и др. Propagation of a hemispherical flame over a heat-absorbing surface // Proceedings of the Combustion Institute. – 2019. – Т. 37, № 2. – С. 2583-2589.
92. Chigier N. и Gemci T. A review of micro propulsion technology // 41st Aerospace sciences meeting and exhibit. – 2003. – С. 670.
93. Boretti A. A market opportunity in power generation for hydrogen energy storage systems // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Т. 49. – С. 166-172.
94. Wang J. System integration, durability and reliability of fuel cells: Challenges and solutions // Applied Energy. – 2017. – Т. 189. – С. 460-479.
95. Xiao H., Makarov D., Sun J. и Molkov V. Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct // Combustion and Flame. – 2012. – Т. 159, № 4. – С. 1523-1538.

96. Kurdyumov V.N. и Matalon M. Self-accelerating flames in long narrow open channels // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2015. – Т. 35, № 1. – С. 921-928.
97. Gao L., T.A. T., Cai T. и Tenkolu G. Experimental analysis and multi-objective optimization of flame dynamics and combustion performance in methane-fueled slit-type combustors // *Applied Energy*. – 2024. – Т. 355. – С. 122365.
98. Golovastov S., Bivol G., Kuleshov F. и Golub V. Influence of polyurethane foam on flame front propagation of hydrogen-air and acetylene-air mixtures in an open channel // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2022. – Т. 77.
99. Veiga-López F., Kuznetsov M., Martínez-Ruiz D., Fernández-Tarrazo E., Grune J. и Sánchez-Sanz M. Unexpected propagation of ultra-lean hydrogen flames in narrow gaps // *Physical Review Letters*. – 2020. – Т. 124, № 17. – С. 174501.
100. Sivashinsky G. Nonlinear analysis of hydrodynamic in laminar flames. I. Derivation of basic equations // *Dynamics of Curved Fronts*. – Academic Press, 1988. – С. 459-488.
101. Veiga-López F., Martínez-Ruiz D., Kuznetsov M. и Sánchez-Sanz M. Thermoacoustic analysis of lean H<sub>2</sub>-air premixed flames in thin layers // *Proceedings of the 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. – 2019.
102. Grune J., Sempert K., Kuznetsov M. и Jordan T. Experimental investigation of fast flame propagation in stratified hydrogen–air mixtures in semi-confined flat layers // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2013. – Т. 26, № 6. – С. 1442-1451.
103. Fernández-Galisteo D., Kurdyumov V. и Ronney P. Analysis of premixed flame propagation between two closely-spaced parallel plates // *Combustion and Flame*. – 2018. – № 190. – С. 133-145.



104. Смирнова И.В. Неустойчивое распространение пламени в плоском узком канале: дис... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05. – Сургут, 2014. – 126 с.
105. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б. Математическая теория горения и взрыва. – Москва: Издательство "Наука", 1980.
106. Ronney P.D. Near-limit flame structures at low Lewis number // *Combustion and Flame*. – 1990. – Т. 82, № 1. – С. 1-14.
107. Ronney P.D., Wu M.S., Pearlman H.G. и Weiland K.J. Experimental study of flame balls in space: Preliminary results from STS-83 // *AIAA Journal*. – 1998. – Т. 36, № 8. – С. 1361-1368.
108. Moskalev P., Denisenko V. и Kirillov I. Classification and Dynamics of Ultralean Hydrogen–Air Flames in Horizontal Cylindrical Hele–Shaw Cells // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2023. – Т. 137, № 1. – С. 104-113.
109. Sereshchenko E., Fursenko R. и Minaev S. Numerical study of sporadic combustion waves in straight channels of different diameters // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2023. – Т. 39, № 2. – С. 1945-1955.
110. Bychkov V. Flame acceleration in the early stages of burning in tubes // *Combustion and Flame*. – 2007. – Т. 150, № 4. – С. 263.
111. Domínguez-González A., Martínez-Ruiz D. и S.-S. M. Stable circular and double-cell lean hydrogen-air premixed flames in quasi two-dimensional channels // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2023. – Т. 39, № 2. – С. 1731-1741.
112. Володин В., Голуб В. и Ельянов А. Исследование распространения водородно-воздушного пламени в плоском зазоре методом инфракрасной визуализации // *Теплофизика высоких температур*. – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 322-329.

113. Elyanov A. и др. Decay of a hydrogen-air flame front to cup-like cells in a narrow horizontal gap // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2024. – Т. 191. – С. 1872-1882.
114. Berger L., Grinberg M., Jürgens B., Lapenna P.E., Creta F., Attili A. и Pitsch H. Flame fingers and interactions of hydrodynamic and thermodiffusive instabilities in laminar lean hydrogen flames // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2023. – Т. 39, № 2. – С. 1525-1534.
115. Couder Y. Growth patterns: from stable curved fronts to fractal structures // *Chaos, Order, and Patterns*. – 1991. – С. 203-227.
116. Bivol G. и др. 3D surface of an unstable hydrogen–air flame // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2021. – Т. 121. – С. 110265.
117. Biennial Report On Hydrogen Safety, Chapter I: Hydrogen Fundamentals.
118. Volodin V.V., Golub V.V., Kiverin A.D., Melnikova K.S., Mikushkin A.Y. и Yakovenko I.S. Large-scale dynamics of ultra-lean hydrogen-air flame kernels in terrestrial gravity conditions // *Combustion Science and Technology*. – 2021. – Т. 193, № 2. – С. 225-234.
119. Володин В., Голуб В., Киверин А., Микушкин М.К.А. и Яковенко И. Динамика очагов горения в ультрабедных водородно-воздушных смесях в крупных масштабах в условиях земной гравитации // *Горение и взрыв*. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 53-59.
120. Zeldovich Y.B. *Theory of Combustion and Detonation of Gases*. – Acad. Sci. USSR, 1944.
121. Clarke A. Calculation and consideration of the Lewis number for explosion studies // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2002. – Т. 80, № 3. – С. 135-140.
122. Gaydon A. *The spectroscopy of flames*. – Chapman and Hall Ltd, 1974. – С. 411.

123. Попов Ю. О влиянии пульсаций температуры на излучение пламени и методе обращения спектральных линий // Теплофизика высоких температур. – 1980. – Т. 18, № 2. – С. 383.
124. Луизова Л., Смирнов Б., Хахаев А. и Чугин В. Излучательные свойства пламени свечи // Теплофизика высоких температур. – 1990. – Т. 28, № 5. – С. 897.
125. Руднев Б. и Повалихина О. Анализ особенностей излучения пламени в камере сгорания дизельных двигателей // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2007. – № 19. – С. 80.
126. Burrows M. Radiation processes related to oxygen–hydrogen combustion at high pressures // Proceedings of the Combustion Institute. – 1965. – Т. 10, № 1. – С. 207.
127. Ferrari M. и Quaresima V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application // Neuroimage. – 2012. – Т. 63, № 2. – С. 921.
128. Kim W., Mogi T. и Dobashi R. Flame acceleration in unconfined hydrogen/air deflagrations using infrared photography // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2013. – Т. 26, № 6. – С. 1501.
129. Sizikov V.S. и др. Direct and inverse problems of infrared tomography // Applied Optics. – 2016. – Т. 55, № 1. – С. 208.
130. Elyanov A.E. и др. Propagation dynamics uncertainty analysis of a premixed laminar unstable hydrogen-air flame // Process Safety and Environmental Protection. – 2022. – Т. 164. – С. 50.