

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель:	профессор, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физической газовой динамики ОИВТ РАН Голуб Виктор Владимирович
Официальные оппоненты:	профессор, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией перспективных технологий горения ФГАОУ ВО «Дальневосточного федерального университета», Минаев Сергей Сергеевич. доцент, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры химической физики ФГАОУ «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Аксенов Виктор Серафимович
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова г. Москва

Защита состоится ___ на заседании диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур, по адресу 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур: jiht.ru/science/dissert-council/.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан (Дата)

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
кандидат физико-математических наук

А.В.Тимофеев

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2023

Общая характеристика работы

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

Актуальность темы исследований

Использование ископаемых топлив ставит перед исследователями вопросы о возможности перехода на возобновляемые источники энергии как с точки зрения сокращения запасов, так и 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]. Превращение внутренней энергии водорода в механическую энергию движущегося транспортного средства на данный момент возможно путем использования двигателей внутреннего сгорания на водороде, либо с использованием топливных ячеек. Эксперименты по использованию водорода в двигателях внутреннего сгорания относятся ко времени создания двигателя внутреннего сгорания в принципе. На сегодняшний день производители транспортных средств, такие как Ford, Mazda, Nissan, Toyota, BMW, MAN и Changan, продолжают вести разработки двигателей внутреннего сгорания, работающие на водороде [6, 7, 8].

Водородные топливные ячейки на основе электрохимических принципов позволяют получать электрическую энергию без сжигания водорода. Одним из успешных инженерных решений, стабильно работающем на водородных топливных ячейках принято считать автомобиль производства марки Toyota [9].

С другой стороны, использование водорода в качестве топлива ставит более сложные задачи обеспечения безопасности эксплуатации транспортных средств. Высокая текучесть, низкая энергия инициирования и высокая температура сгорания приводят к росту рисков разрушения в аварийных случаях. С проблемами безопасности водородной энергетики в первую очередь столкнулась отрасль атомной энергетики. При авариях на атомных электростанциях основные разрушения приходились именно при воспламенении водорода, образовавшегося в

результате экзотермической химической реакции между цирконием и водяным паром. Эффективное и безопасное использование водорода в двигателях внутреннего сгорания и топливных ячейках легли в основу мотивации к написанию данной диссертации.

Разработанность темы исследований

На данный момент в мире накоплен большой опыт по исследованию горения водорода в трубах и каналах. Основными направлениями данных исследований можно обозначить задачи, посвященные замедлению или ускорению пламен, распространяющихся в каналах.

Одним из способов торможения фронта пламени на начальном этапе является использование теплопоглощающих элементов, пронизываемых для газа. Так, например, вопросы замедления фронта пламени с использованием проволочной сетки, перфорированной пластины, гофрированной пластины рассмотрено в работах [10, 11, 12, 13], использование акустически поглощающего материала для ослабления интенсивности детонационной волны – в работе [14]. Помимо этого, часто используется металлическая сетка [15, 16], гофрированный фильтрующий элемент, вспененная керамика [17], а также перфорированная металлическая пластина [18, 19, 20]. При этом основной механизм принцип работы подобного пламегасителя заключается в подавлении распространения пламени на ранней стадии его развития [21, 22] или, даже если происходит детонация, пламегаситель также может работать с хорошими характеристиками подавления [23, 24, 25]. При этом считается, что для эффективного торможения фронта пламени необходимо разработать такой высокоэффективный пламегаситель, который будет устойчивым к самому пламени из-за меньшего сопротивления потоку [26, 27]. В качестве критерия распространения тушения пламени используется критическое число Пекле, характеризующее отношение между интенсивностью переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью. Также этот критерий используется при анализе экспериментальных данных по прохождению пламени через отверстия и слои пористых материалов [28].

Однако, следует отметить, что расположение ячеистых и волокнистых материалов вдоль пути распространения пламени или поперёк канала способно ускорять фронт пламени до скорости звука в горючей смеси в зависимости от состава смеси, характеристик материала и геометрических параметров объёма [29]. Этот эффект вызван турбулизацией потока горючей смеси перед фронтом пламени, теплопроводностью по каркасу дисперсной среды и загромождением пространства. В качестве классического турбулизатора и ускорителя пламени в трубе принято считать спиралевидную вставку, получившую название спираль Щелкина [30, 31]. Однако подобные вставки не воздействуют на фронт пламени на начальной стадии, в которой может быть применен метод форкамерного или периферийного воспламенения [32, 33].

Экспериментальные исследования фронта пламени в трубах при использовании средств визуализации фронта в своем большинстве сводятся к теневой или шпирен визуализации

пламени в каналах прямоугольного сечения. Стоит отметить, что также используются ионизационные датчики или датчики давления для регистрации положения фронта пламени в пространстве. Подобным исследованиям посвящено большинство работ, проводимых международными научными группами, работающими в данной тематике, например [34, 35]. Данные исследования демонстрируют переходы от полусферического пламени к «пальцеобразному». Изучены скорости различных пламен и формы поверхности фронта в плоскости.

Известно, что механизмы неустойчивости фронта пламени зависят от стадии распространения фронта. Работа [36] посвящена трехмерной визуализации пламени в трубе. В работе [37] авторы проекта исследовали «пальцеобразное» пламя в больших объемах 4,5 куб. метра. Были получены скорости движения фронта в различных направлениях, а также вычислены характерные скорости роста неоднородностей на фронте пламени.

Логическим продолжением исследований по горению в трубах и каналах является изучение влияния размеров каналов. Уменьшение размеров каналов для исследования распространения пламени характеризуется более высоким сопротивлением потока и более сильным тепловым взаимодействием между зоной горения и стенками канала по сравнению с традиционной камерой сгорания из-за значительно большего отношения поверхности к объему [38]. В серии работ по исследованию распространения пламени в тонких зазорах в водородно-воздушных смесях [39, 40, 41, 42] выявлены различные режимы горения в зависимости от концентрации водорода в смеси, толщины зазора и направления распространения пламени в вертикальной камере сгорания. Фронт пламени способен распадаться на отдельные участки, в зависимости от концентрации и зазора [43, 44]. В работе [45] представлены результаты экспериментального исследования распространения водородно-воздушных пламен в горизонтальном зазоре. Основным применяемым в работе [45] методом визуализации – регистрация следов паров воды. Искривление фронта пламени в поперечном сечении исследовалось в работе [46]. В той же работе показано искривление фронта пламени в зависимости от концентрации водорода и толщины плоского зазора. В работах [39, 46] проведен анализ безразмерных параметров, характеризующих смену режима горения и распад фронта пламени в зависимости от начальных условий: концентрации водорода и толщины зазора камеры сгорания. В [46] в качестве такого параметра было предложено модифицированное число Льюиса, в [39] основным параметром было определено число Пекле. При исследовании горения смесей водород-воздух [47] и углеводородов [48] фронт пламени не распадается на отдельные участки. Анализу режимов горения и распада фронта пламени посвящен также ряд расчетно-теоретических работ [49, 38].

Цели и задачи работы

В работе ставятся две цели. Первая – изучить влияние кольцевого воспламенения водородно-воздушных смесей в трубах и каналах: определить скорость фронта пламени при периферийном и центральном воспламенении. Провести сравнение полученных результатов: определить оптимальное соотношение площади пластины, формирующей кольцевую щель, и площади поперечного сечения канала, которое обеспечивает максимальную скорость фронта пламени на начальном этапе. Вторая цель – изучить динамику и режимы горения водородно-воздушных пламен в плоских зазорах: определить динамику и механизм распада фронта пламени в плоском зазоре, а также форму образующихся отдельных ячеек пламени, 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 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. Качественное и количественное сравнение динамики и структуры фронта пламени при периферийном и центральном воспламенении;
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.

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.

Построены аналитические модели «пальцеобразного» и «обратного пальцеобразного» пламен. Анализ моделей показал, что фронт «обратного пальцеобразного» пламени способен уменьшить эффект стука в двигателе внутреннего сгорания.

Впервые получены инфракрасные изображения водородно-воздушного пламени в плоском зазоре. Данные изображения позволили детально рассмотреть распад фронта пламени на начальном этапе и образование «колпачкообразных» пламен. 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

Полученные в работе результаты носят 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 более чувствительны к толщине зазора и концентрации смеси, и данный режим горения может проявляться в местах, где не поддерживается горение в виде связанной зоны реакции.

Методология и методы исследования

Поставленные в рамках диссертации задачи 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 по изображению 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 по материалам диссертации докладывались на международных и российских научных конференциях: XIV Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (4–13 сентября 2022 г., Алушта), 15th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, (25 – 28 июля 2021), XXXIX Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2024), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2021», Всероссийская конференция молодых ученых механиков (4–14 сентября 2024, г. Сочи, Россия), 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. Все эксперименты, их последующая обработка и подготовка результатов также проводились автором лично, либо при его активном участии.

Постановка задач, обсуждение результатов и выводов проводились совместно с научным руководителем профессором, доктором физико-математических наук Голубом В.В.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 4 научных статьи в рецензируемых научных изданиях, которые принадлежат журналам из списка ВАК РФ. (Список публикаций приведен в конце автореферата).

Соответствие специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

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 и объем диссертации

Диссертация включает введение, 2 главы, заключение, список литературы (129 наименований). Работа изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 4 таблицы.

Основное содержание работы

В работе представлены результаты по исследованию водородно-воздушных пламен, распространяющихся в трубах, каналах и плоских зазорах. Работа разделена на две главы, каждая из которых определяется рассматриваемой геометрией камеры сгорания. Первая глава посвящена исследованию пламени в круглых полуоткрытых трубах и закрытых каналах квадратного сечения, во второй главе рассматривается распространение пламени в плоских зазорах.

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, освещена степень разработанности темы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава начинается с раздела 1.1, посвященному обзору литературы. В обзоре приведены исследования по распространению фронта пламени в трубах и каналах. В современной литературе в достаточной мере исследованы режимы горения водородно-воздушных пламен в трубах. Существуют способы как ускорения распространения фронта пламени, так и его замедления. Классическим методом ускорения пламени в канале является спираль Щелкина. Однако эффект ускорения пламени достигается на расстоянии нескольких диаметров канала от точки инициирования при центральном воспламенении. Использование кольцевого или периферийного воспламенения может позволить сократить расстояние ускорения фронта пламени.

В разделе 1.2 описывается использованная в работе экспериментальная установка (Рис. 1) и методика проведения экспериментов.

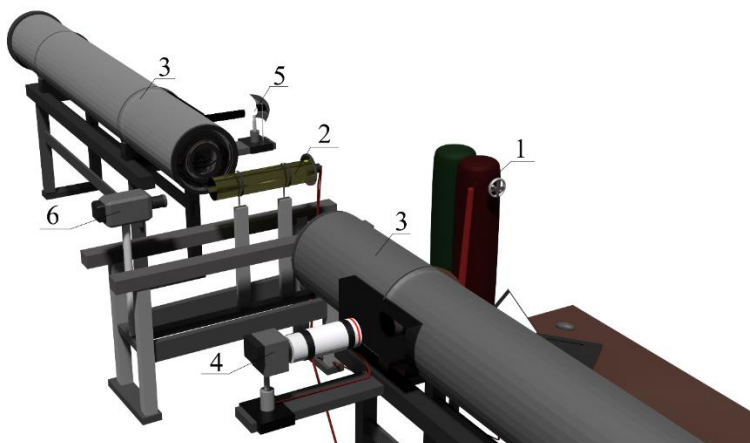


Рис. 1 Экспериментальный стенд. 1 – емкость с водородно-воздушной смесью, 2 – полукрытый канал круглого сечения, 3 - теневой прибор ИАБ-451, 4 - высокоскоростная видеокамера, 5 – источник света, 6 – высокоскоростная инфракрасная камера.

Все эксперименты в работе проводились с использованием предварительно перемешанных газовых смесей. Смесь подготавливалась с использованием газового пульта, оснащенного приборами измерения давления. Объемная концентрация заданной смеси определялась согласно парциальным давлениям каждого компонента смеси при подготовке смеси в закрытом сосуде объемом 40 л. Газовые смеси поступали в камеры сгорания, выполненные в виде открытой трубки (Рис. 2 а) с круглой пластиной, формирующей кольцевой зазор и в закрытый канал квадратного сечения (Рис. 2 б) с квадратной пластиной, формирующей зазор периферийного воспламенения.

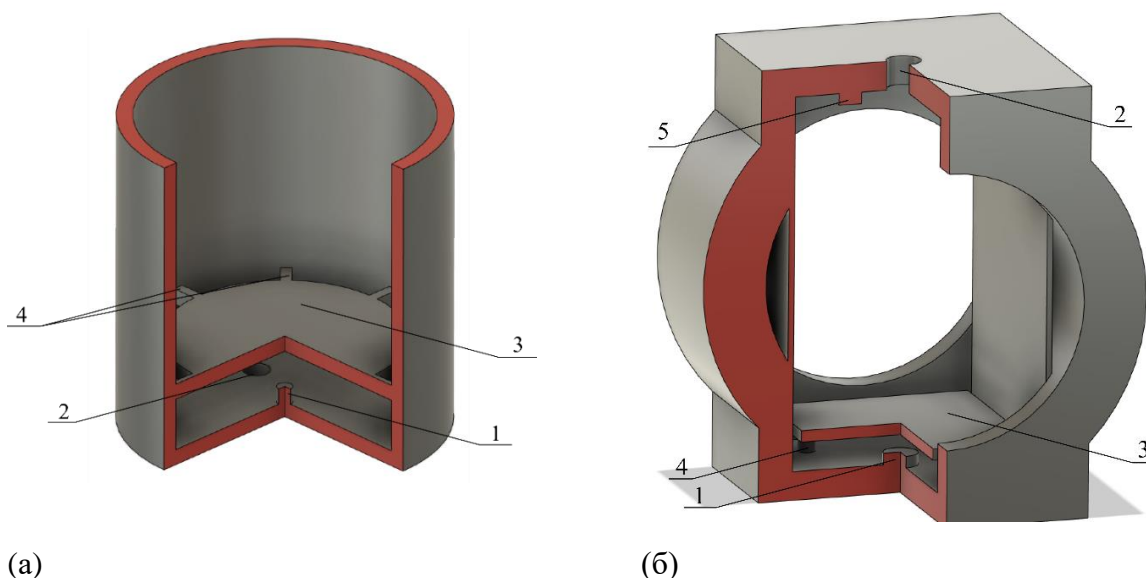


Рис. 2 Схематичное изображение трубки с открытым концом (а), закрытая камера сгорания (б) с пластиной (3) для периферийного воспламенения. Вид в разрезе. Грани секций окрашены в красный цвет. 1 – свеча зажигания, 2 – впускное отверстие впрыска газа, 3 – пластина, 4 – крепящие пластину штифты, 5 – датчик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

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.%. расстояние от свечи зажигания до пластины, формирующей периферийное воспламенение составляет 5 мм.

На Рис. 3 показаны теньевые (сверху) и инфракрасные (снизу) изображения фронта пламени, распространяющегося в трубе при центральном (слева) и кольцевом (справа) воспламенении.

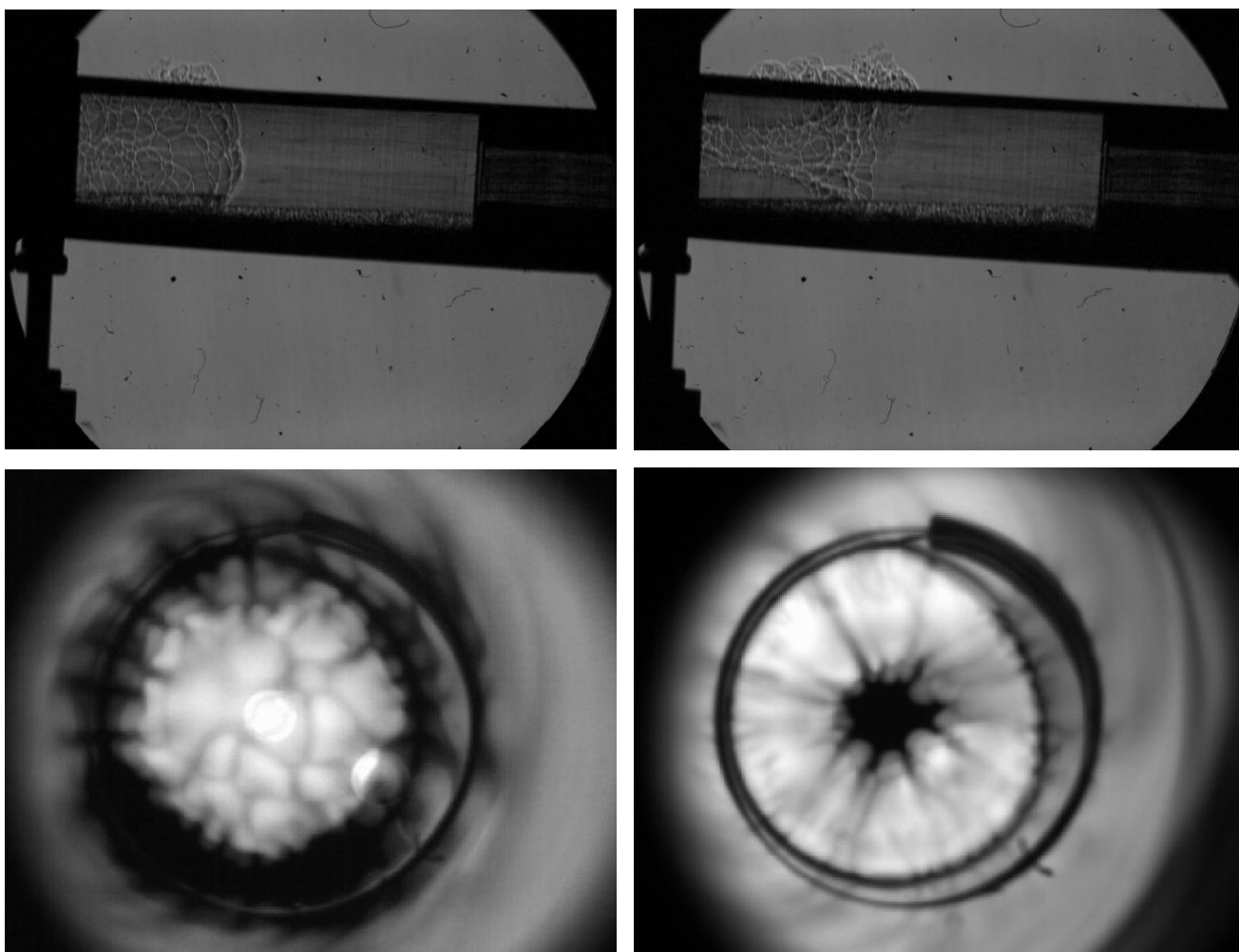


Рис. 3 Изображения фронта пламени при центральном (сверху слева) и кольцевом (сверху справа) воспламенении при теньевой визуализации поперек трубы, и при центральном (снизу слева) и кольцевом (снизу справа) воспламенении при инфракрасной визуализации вдоль трубы.

По экспериментам, представленным на Рис. 3 был выявлен режим «обратного пальцеобразного» пламени по аналогии с классическим «пальцеобразным» пламенем,

распространяющимся в трубе. Фронт «обратного пальцеобразного» пламени имеет вогнутую форму по направлению распространения. В завершении раздела описываются методы компьютерной обработки полученных изображений.

Раздел 1.3 посвящен построению аналитической модели «обратного пальцеобразного» пламени. Аналитическая модель «обратного пальцеобразного» пламени построена на основе модели «пальцеобразного» пламени, описанного в работах [50, 51]. При построении аналитической модели в качестве основных различий между режимами распространения «пальцеобразного» и «обратного пальцеобразного» пламен являлись граничные условия. 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. Низкая скорость распространения фронта пламени, как следствие малое число Маха позволяют рассматривать задачу в приближении несжимаемости газа [52].

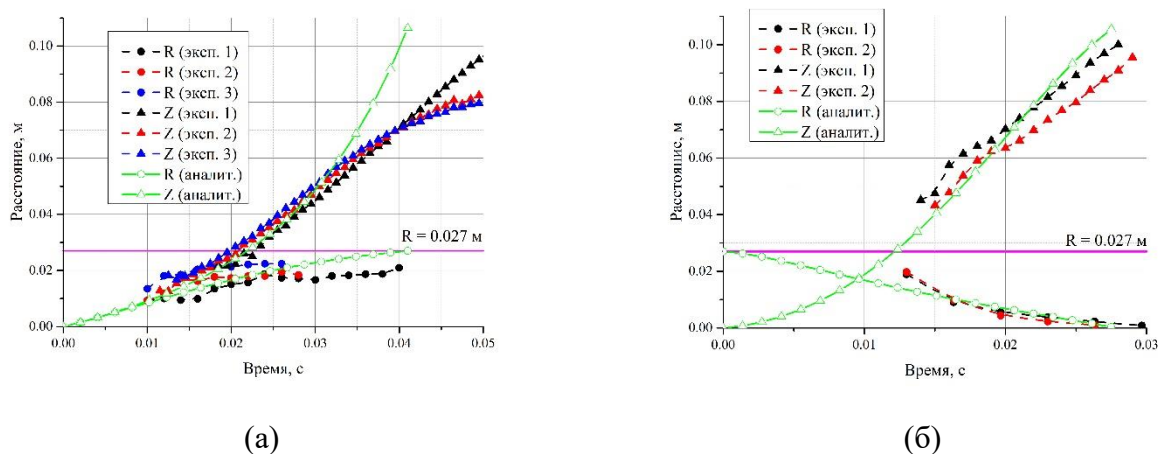


Рис. 4 Экспериментальные и теоретические зависимости положения «кончика» и «юбки» пламени 12 об.% смеси в полуоткрытом канале круглого сечения при центральном (а) и кольцевом (б) воспламенении.

Заметна разница расчетной и экспериментально полученной скорости распространения на более позднем этапе в случае «пальцеобразного пламени» Рис. 4 а. Это 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. Более того, это предположение подтверждается графиком на Рис. 4 б, на котором показана динамика распространения «обратного пальцеобразного» фронта пламени. 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.

В закрытой камере Рис. 2 б, моделирующей канал прямоугольного сечения, проводились эксперименту по распространению пламени в 15 об.% водородно-воздушной смеси. Более высокую скорость распространения фронта пламени можно наблюдать при распространении «обратного пальцеобразного» пламени, полученного при кольцевом (периферийном для канала квадратного сечения) воспламенении. Средняя скорость «обратного пальцеобразного» пламени, распространяющегося в 15 об.% смеси в 1,4 раза выше скорости «пальцеобразного» пламени. В закрытом канале измерялось давление с помощью датчика динамического давления, установленного в закрытом торце камеры, противоположном точке инициирования. Периферийное воспламенение обеспечивает более высокий темп роста давления. Начиная с 30 мс наблюдается значительная скорость роста распространения «обратного пальцеобразного» пламени в отличие от классического «пальцеобразного», так что время достижения максимального давления в первом случае меньше на 10 мс.

На ограниченной длине до 3 калибров (диаметров канала) 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.

В разделе 1.5 проводилось экспериментальное изучение воздействия ширины кольцевого зазора на динамику распространения фронта пламени. Предыдущее аналитическое решение было построено, исходя из предположения, что воспламенение происходит в кольцевой области с нулевой шириной. В реальных условиях канала зажигание осуществляется в форкамере, расположенной перед пластиной. К моменту воспламенения форкамера в исследуемом канале заполнена продуктами сгорания при повышенном давлении, которое зависит от ширины зазора. Давление в форкамере определяет скорость выхода продуктов сгорания, что, в свою очередь, задает начальную осевую скорость пламени. Таким образом, уменьшение ширины зазора уменьшает площадь поперечного сечения, но увеличивает скорость кольцевой зажигающей струи.

Вместо закрепленной на металлические штифты пластины в канал помещались специальные пластины, изготовленные методом 3D-печати, диаметром меньше внутреннего диаметра трубы. В качестве основного параметра, определяющего размер щели, использовалось отношение σ/S в процентах, где σ — это площадь пластины, создающей кольцевую щель, а S — площадь поперечного сечения канала. Положение и форма фронта пламени фиксировались с помощью теневой визуализации.

Для анализа влияния ширины кольцевого зазора на распространение пламени при кольцевом воспламенении была проведена серия экспериментов с водородно-воздушными смесями, содержащими 15 и 20 об.% водорода, при ширине кольцевого зазора 0.5, 1, 1.5, 2, 3 и 4.5 мм, что соответствует значениям σ/S равным 96.3, 92.7, 89.2, 85.7, 79.0 и 69.4% соответственно. В качестве сравнения также проводились эксперименты при центральном воспламенении для каждой смеси. На Рис. 5 а представлены зависимости положения фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 об.% вдоль оси трубы от времени при центральном и кольцевом воспламенении.

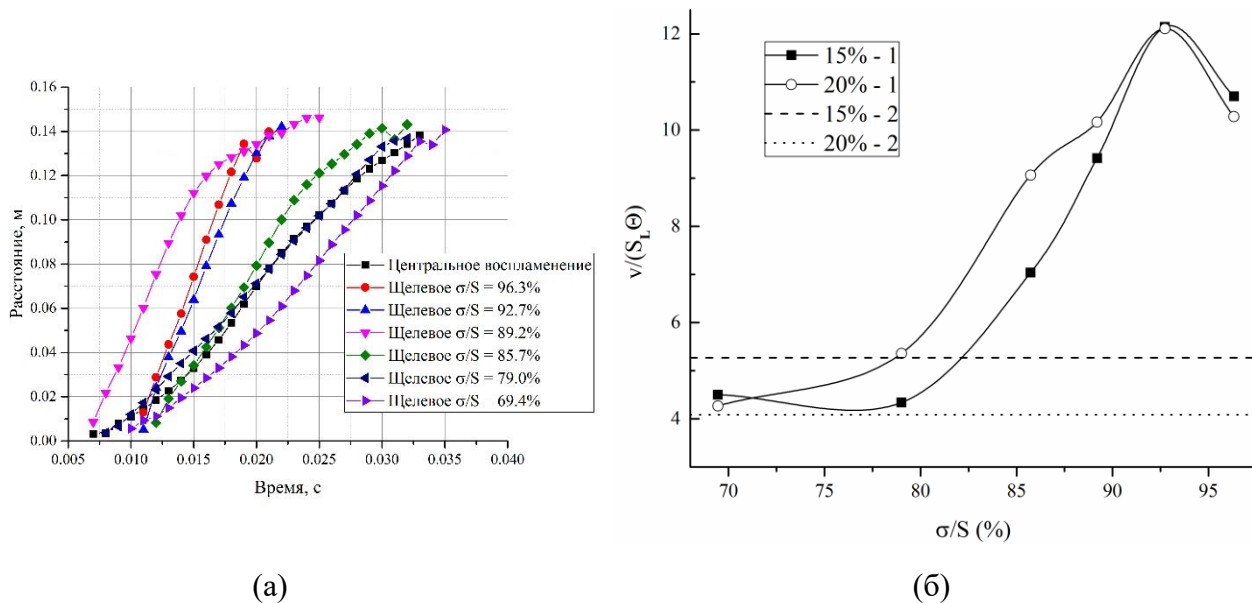


Рис. 5 (а) – зависимости положения фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 об.% вдоль оси трубы от времени при центральном и кольцевом воспламенении; (б) – зависимость максимальной приведенной скорости распространения фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 и 20 об.% вдоль оси трубы от степени перекрытия (1). Горизонтальные линии (2) соответствуют максимальной приведенной скорости при центральном зажигании.

На Рис. 5 б представлены значения максимальной осевой скорости фронта пламени в канале при центральном и кольцевом воспламенении – v , нормированные на скорость плоского пламени: $S_L \cdot \theta$.

Выявлено, что влияние степени перекрытия на скорость фронта пламени немонотонно и имеет максимум при величине $\sigma/S=92.7\%$. «Схлопывание» фронта «обратного пальцеобразного» пламени приводит к его замедлению по причине резкого уменьшения площади фронта пламени и, как следствие, уменьшению потребления горючего. Обнаружено, что в смеси с содержанием водорода 15 об.% замедление 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.

Раздел 1.5 завершает описание исследований горения водородно-воздушных смесей в трубах и каналах при центральном и периферийном воспламенении. Краткие выводы по главе обозначают преимущество периферийного воспламенения перед центральным как с точки зрения достижения максимальной скорости фронта пламени, так и его замедления на конечном этапе, позволяющим сократить эффект стука в двигателе внутреннего сгорания.

Глава 2 описываемой работы посвящена экспериментальному исследованию распространения водородно-воздушных пламени в плоских зазорах. В **разделе 2.1** приведен обзор литературы, посвященный исследованию режимов горения ультра-бедных водородно-воздушных смесей, когда фронт пламени распространяется в виде разрозненных участков. В работе [45] высказано предположение о распространении пламени в виде «дрейфующих шаров», в работе [39] аналогичный режим горения относят к «пальцеобразным» пламенам. В данной работе подобные режимы горения условимся определять как «колпачкообразные», согласно термину, обозначенному в [53]. Обзор литературы в достаточной мере определяет мотивацию и задачи, поставленные при исследовании горения бедных и ультра-бедных водородно-воздушных пламен с концентраций водорода от 7 до 20 об.% в тонких зазорах толщиной от 3 до 10 мм.

В **разделе 2.1** описана экспериментальная установка, использованная в данной работе, показанная на Рис. 6.

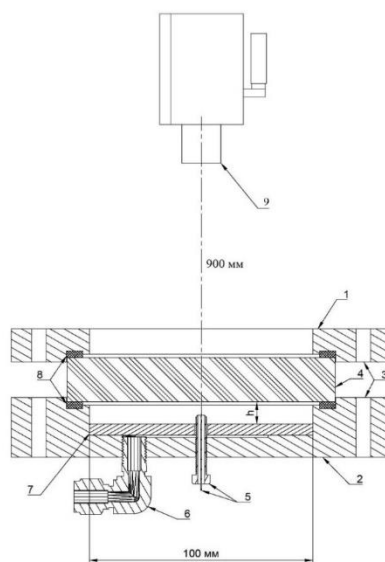


Рис. 6 Экспериментальная установка: 1 – прижимной фланец, 2 – нижний фланец (основание), 3 – отверстия крепления фланцев между собой, 4 – стекло КИ, 5 – искровой воспламенитель, 6 – газовый штуцер, 7 – пластина, формирующая исследуемый зазор толщиной h , 8 – резиновые уплотнители, 9 – инфракрасная камера.

Экспериментальная установка представляет собой цилиндрическую горизонтальную камеру сгорания с соотношением высоты к диаметру не более, чем 1 к 10, что позволяет ее считать плоской. Плоский зазор формируется 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 помещается диск из органического стекла толщиной 3 мм. Дополнительный диск из органического стекла снижает вероятность влияния микро-шероховатостей, являющихся следствием процесса трехмерной печати. Диаметр камеры сгорания, равно как и диаметр всех пластин, составляет 100 мм. Визуализация процесса осуществляется с помощью инфракрасной камеры, расположенной вертикально на высоте 900 мм над камерой сгорания.

Результаты экспериментов по горению 7 – 10 об.% водородно-воздушных смесей в плоских зазорах толщиной от 3 до 5 мм представлены в **разделе 2.2**. На Рис. 7 показана серия инфракрасных изображений горения 10 об.% водородно-воздушной смеси в зазоре толщиной 3 мм. Серия кадров в различные моменты времени иллюстрирует распад фронта пламени на отдельные ячейки.

При увеличении концентрации водорода в смеси и толщины зазора в различных экспериментах возникает большее число ячеек при распаде фронта пламени. Общее выделение тепла пропорционально количеству горючего в смеси, которое растет либо с увеличением концентрации, либо с увеличением объема, то есть толщины зазора камеры сгорания постоянного диаметра.

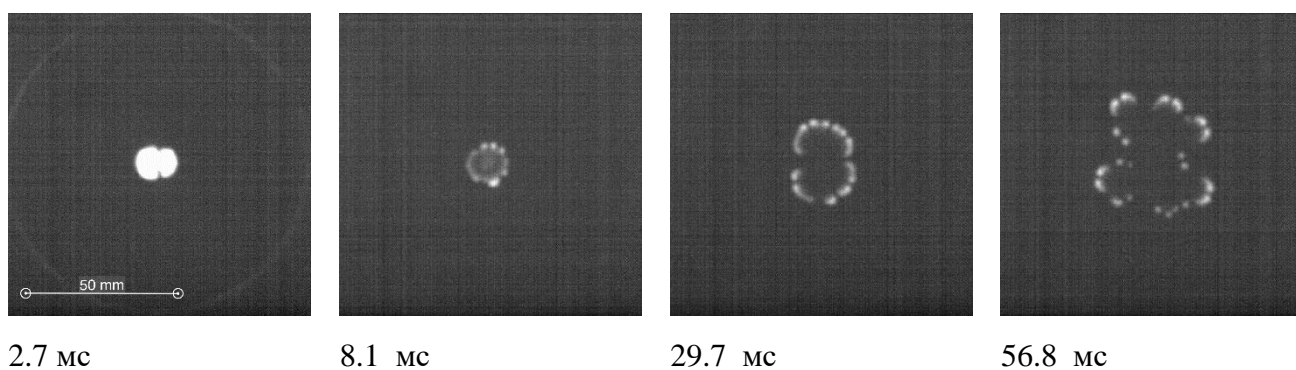
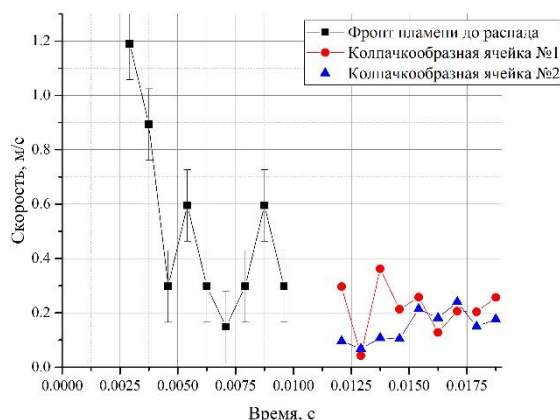


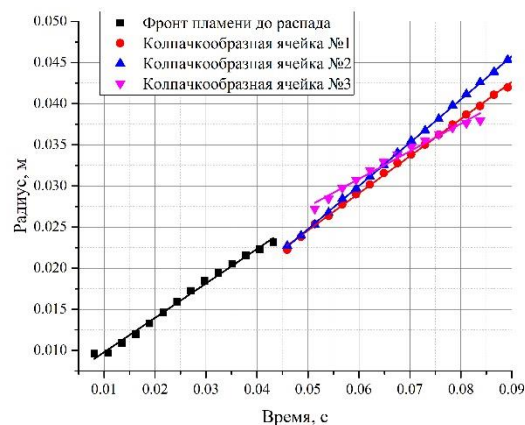
Рис. 7 Серия инфракрасных изображений распространяющегося пламени в смеси с 10 об.% содержанием водорода в зазоре толщиной 3 мм в различные моменты времени.

Раздел 2.3 посвящен обработке полученных экспериментально инфракрасных изображений. В нем описана методика обработки инфракрасных изображений с оценкой погрешности. Выявлено, что ошибка при определении координат фронта пламени не превышает 3.5%. Далее представлены графики скорости и координаты фронта и «колпачкообразных» ячеек пламени от времени для всех исследованных комбинаций концентрации и толщины зазора. На Рис. 8 а показан график скорости фронта пламени и «колпачкообразных» ячеек после распада

фронта, на Рис. 8 б показан график зависимости радиуса фронта пламени и ячеек после распада от времени (r-t диаграмма).



(а)



(б)

Рис. 8 (а) – График зависимости скорости фронта пламени и «колпачкообразных» пламен в от времени для 7 об% водородно-воздушной смеси в зазоре 4 мм; (б) – графики зависимости радиуса от времени при горении 10 об.% водородно-воздушной смеси в зазоре 5 мм. На графиках показаны фронт пламени до распада и отдельные ячейки, соответствующие своим кривым.

Обсуждению механизма распада фронта пламени на отдельные ячейки посвящен **раздел 2.4**. Форма «колпачкообразных» ячеек обусловлена скоростью их движения и скоростью диффузии водорода. По аналогии с формой фронта пламени, всплывающего в ультра-бедной смеси [54], был сделан вывод, о том что форма отдельного участка фронта пламени после распада представляет собой структуру, схожую с колпачком в виде параболоида вращения. Механизм образования «колпачкообразных» ячеек напрямую связан с термодиффузионной неустойчивостью. Термодиффузионная неустойчивость возникает при отсутствии баланса между диффузией недостающего компонента в зону реакции и отводом тепла. Верхняя и нижняя стенки плоской камеры сгорания приводят к постоянным теплотерям и, как следствие, искривлению фронта пламени. В работе [55] методами численного моделирования было показано, что температура в вогнутостях неустойчивого фронта пламени ниже, чем на выпуклостях. В соответствии с полученными экспериментальными изображениями был сделан вывод, что в плоском зазоре фронт пламени в вогнутостях угасает, оставляя лишь разрозненные «колпачкообразные» ячейки. Безразмерным критерием, определяющим влияние термодиффузионной неустойчивости, считается число Льюиса. Однако влияние потерь тепла в стенки данный критерий не учитывает. Поэтому в работе предложен новый безразмерный критерий, определяющий распад фронта пламени: $K_{\text{decay}} = \frac{vL\delta_T}{\chi h}$, где v – скорость фронта пламени в момент распада, L – периметр фронта пламени, δ_T – толщина фронта пламени, χ –

температуропроводность газовой смеси, h - толщина зазора камеры сгорания. Данный критерий показывает значения в близком диапазоне в момент распада фронта пламени с 7 об.% содержанием водорода в смеси в зазорах толщиной 4 и 5 мм и с 10 об.% содержанием водорода в смеси в зазорах толщиной 3 и 5 мм.

Инфракрасные изображения, полученные в ходе исследования, помимо пространственного положения фронта пламени несут информацию об интенсивности излучения продуктов сгорания. В разделе 2.5, завершающем работу, проанализировано остывание продуктов сгорания за фронтом пламени в смесях с 10, 15 и 20 об.% содержанием водорода в зазорах толщиной от 3 до 10 мм. На Рис. 9 представлены графики распределения интенсивности излучения вдоль радиуса для различных моментов времени распространения водородно-воздушного фронта пламени с содержанием водорода 10 и 20 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.

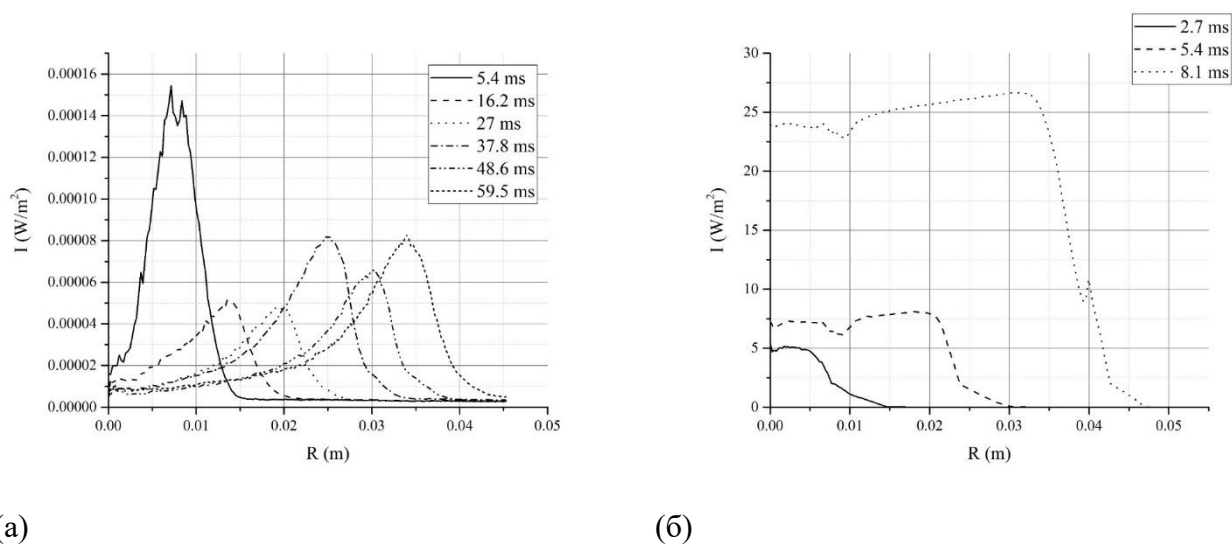


Рис. 9 График распределения интенсивности излучения вдоль радиуса для различных моментов времени распространения водородно-воздушного фронта пламени с содержанием водорода (а) – 10 об.%, (б) – 20 об.% в зазоре толщиной 10 мм.

Основные результаты и выводы исследования

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.

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. Получено, что при увеличении толщины зазора скорость распространения фронта пламени увеличивается до 2 раз.

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. 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. 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. Шамшин И.О. и др. Быстрый переход горения в детонацию в спиралевидных трубках // Горение и взрыв – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 29-50.
32. 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.
33. Володин В.В., Голуб В.В. и Ельянов А.Е. Горение водородно-воздушных смесей в канале при кольцевом воспламенении // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60, № 6. – С. 957-960.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. Kuznetsov M. и др. Flame Propagation Near the Limiting Conditions in a Thin Layer Geometry // International Conference on Hydrogen Safety. Conference paper. – 2019. – С. 1-12.
43. Володин В.В., Голуб В.В. и Ельянов А.Е. Исследование распространения водородно-воздушного пламени в плоском зазоре методом инфракрасной визуализации // Теплофизика высоких температур. – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 322-329.
44. 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.
45. Москалев П.В., Денисенко В.П. и Кириллов И.А. Классификация и динамика ультраабедных водородно-воздушных пламен в горизонтальных цилиндрических ячейках Хеле-Шоу // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 164, № 1. – С. 117.
46. 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.
47. 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.

48. 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.
49. Yanez J. и др. Modeling of 2D self-drifting flame-balls in Hele-Shaw cells // *Combustion and Flame*. – 2023. – Т. 258. – С. 113059.
50. Bychkov V. и др. Flame acceleration in the early stages of burning in tubes // *Combustion and Flame*. – 2007. – Т. 150, № 4. – С. 263-276.
51. 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.
52. Valiev D. и др. 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.
53. 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.
54. Volodin V.V. и др. 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.
55. Berger L. и др. 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.

Список публикаций автора по теме исследования

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, № 7, С.77-89.
4. **Elyanov A.**, Golub V., Volodin V., Alekhovich P., 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.