

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Идрисов Дмитрий Владимирович

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ПРОСКОКА
ПЛАМЕНИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО
ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Матвеев Сергей Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент

Самара - 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	13
1.1 Перспективы использования водорода в энергетике и транспорте	13
1.2 Кинетические механизмы окисления метано-водородных смесей.....	26
1.3 Влияние добавок водорода в метано-воздушную смесь на характеристики нормальной скорости распространения пламени	32
1.4 Расчетно-экспериментальные исследования процессов горения метано-водородных смесей в модельных камерах сгорания.....	40
Заключение по первой главе	53
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И СТЕНДЫ	55
2.1 Доработка экспериментального стенда для исследования метано-водородного топлива	55
2.1.1 Воздушная магистраль	56
2.1.2 Топливная система.....	58
2.1.3 Обеспечение безопасности стенда	63
2.2 Разработка конструкции модельной камеры сгорания	65
2.3 Установка для измерения нормальной скорости распространения пламени	76
2.4 Установка по определению границы устойчивой работы	79
Заключение по второй главе	82
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ.....	84
3.1 Выбор и валидация базового кинетического механизма окисления метано-водородного топлива	85

3.2 Совершенствование базового кинетического механизма горения метано-водородного топлива	92
3.3 Расчетно-экспериментальное исследование зависимостей нормальной скорости распространения пламени метано-водородных топлив от состава, температуры и давления	104
3.4 Формирование и валидация зависимостей нормальной скорости распространения пламени от параметров рабочего процесса камер сгорания.....	108
Заключение по третьей главе	113
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ПРОСКОКА ПЛАМЕНИ В ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКОЙ МЕТАНО-ВОДОРОДО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ.....	115
4.1 Экспериментальное исследование границ проскока пламени в горелочном устройстве с предварительной подготовкой метано-водородо-воздушной смеси и закруткой потока.....	115
4.2 Математическая модель для определения проскока пламени при горении метано-водородных топлив.....	122
4.3 Отработка метода определения проскока пламени в горелочном устройстве с предварительной подготовкой метано-водородо-воздушной смеси и закруткой потока	128
Заключение по четвертой главе.....	136
ГЛАВА 5 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСКОКА ПЛАМЕНИ ПРИ СЖИГАНИИ МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В МОДЕЛЬНОЙ И ПОЛНОРАЗМЕРНОЙ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТАНОВОК.....	138
5.1 Расчетно-экспериментальное исследование проскока пламени при сжигании метано-водородного топлива в модельной камере сгорания.....	138

5.2 Моделирование проскока пламени при сжигании метано-водородного топлива в камере сгорания газотурбинной установки ГТЭ-65	146
Заключение по пятой главе	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	159

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одной из глобальных проблем является изменение климата, вызванное увеличением доли парниковых газов в атмосфере Земли. В связи с этим в последнее время в России и за рубежом большое внимание уделяется вопросу снижения выбросов углекислого газа (CO_2) авиационными газотурбинными двигателями (ГТД) и созданными на их базе наземными газотурбинными установками (ГТУ), а также промышленными энергетическими установками (ГТЭ). Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) в 2016 году утверждена схема сокращения выбросов углерода в авиации (CORSIA). Использование альтернативных видов топлива, в частности, водорода и метано-водородных смесей, позволит существенно уменьшить выбросы CO_2 , которые сейчас составляют в среднем 500 г CO_2 на 1 кВт*час. В обозримом будущем планируется снизить эмиссию CO_2 до 340 г, а в перспективе до 100 г на 1 кВт*час.

Также важной задачей является нормировка вредных выбросов. Одним из основных источников загрязнения окружающей среды являются транспортные системы, в частности, авиационные ГТД и созданные на их базе ГТУ. В соответствии со стандартами ИКАО основными нормируемыми компонентами являются оксиды азота (NO_x), оксиды углерода (CO), несгоревшие углеводороды (C_xH_y) и сажа. Мероприятия по снижению образования вредных выбросов в основном сводятся к разработке малоэмиссионных камер сгорания (КС), в которых используется метод сжигания бедных предварительно подготовленных смесей. Однако, при этом возникают проблемы устойчивого горения, а именно, сужаются границы по бедному срыву пламени.

Использование добавок водорода (H_2) в топливо позволяет решить проблему устойчивого горения для бедных смесей. Но при этом возникает ряд проблем, в частности, риск проскока пламени в зону подготовки топливовоздушной смеси. Создание оптимальной схемы процесса сгорания с

использованием водорода в качестве добавки к основному (углеводородному) топливу является актуальным предметом исследований в обозримой перспективе, ввиду экологических преимуществ водорода.

Для проектирования новых малоэмиссионных КС, стабильно работающих на метано-водородных топливах, необходимо достоверно определять границы устойчивой работы камер сгорания, в частности, условия возникновения проскока пламени в горелочное устройство. Решение данной задачи возможно при использовании методов вычислительной газовой динамики. Однако, в настоящее время математические модели горения метано-водородного топлива верифицированы только в узком диапазоне исследуемых параметров. Также, недостаточно и экспериментальных результатов исследований горения метано-водородо-воздушных смесей в различных условиях применительно к сложным техническим устройствам, что не позволяет качественно верифицировать математические модели.

Таким образом, формирование базы экспериментальных данных и разработка метода определения проскока пламени при горении метано-водородного топлива в камерах сгорания авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок *являются актуальными*.

Степень разработанности темы.

Исследования в области использования водорода в транспортном секторе и энергетике активизировались в 70-х годах прошлого столетия. За рубежом основоположниками данных исследований являлись Н.К. Abdel-Aal, J.O'M. Bockris, W.J.D. Escher, С. Marchetti, A.R. Martinez, Т. Ohta, W. Seifritz, W.D. Van Vorst, Т.N. Vezirođlu, К.Н. Weil и R.M. Zweig. В нашей стране разработкой технологий использования водорода для авиационных и автомобильных двигателей, а также энергетических установок занимались Н.Д. Кузнецов, В.А. Легасов, А.Н. Подгорный, М.А. Стырикович, А.Н. Проценко и другие.

Существенный вклад в изучение фундаментальных проблем горения водорода и метано-водородных топлив внесли российские и иностранные

ученые: F.H.V. Coppens, T. Boushaki, E.J.K. Nilsson, M. Frenklach, A.A. Коннов, В.Р. Кузнецов, В.А. Сабельников, А.М. Старик, Н.С. Титова и другие. Проведенные исследования позволили для определенных условий и параметров процесса горения провести валидацию различных моделей окисления водородного и метано-водородного топлива с учетом полученных экспериментальных данных.

Проблемы, возникающие при использовании метано-водородного топлива в реальных камерах сгорания и их элементах, отражены в экспериментальных и расчетных исследованиях R.K. Cheng, R.S. Barlow, S.M. Guo, В.А. Imteyaz, Ю.И. Цыбизова, А.Н. Дубовицкого и других. В этих работах показано, что обогащение топлива водородом оказывает существенное воздействие как на химические, так и на физические процессы, происходящие в камерах сгорания. Однако применительно к процессам горения метано-водородных топлив имеющихся экспериментальных данных недостаточно, а используемые математические модели требуют дальнейшего развития и валидации.

В рамках развития технологий применения водорода как топлива для ГТД известен опыт ПАО «ОДК-Кузнецов» по использованию водорода в форсажной камере двигателя НК-144В, а также созданию и летному испытанию первого авиационного двигателя (НК-88), работающего на водороде. Для ГТУ работы по использованию метано-водородного топлива проводятся фирмами ПАО «ОДК-Кузнецов», General Electric (США), Siemens (Германия), Mitsubishi (Япония), АО «Силовые машины» и другими. Однако остаются не до конца решенными проблемы, связанные со стабильностью горения и повышенными выбросами NO_x .

Цель работы: Повышение точности определения границ проскока пламени при горении метано-водородного топлива на этапе предварительного проектирования камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок.

Задачи работы:

1. Разработка и валидация метода определения границ проскока пламени при горении предварительно-подготовленных метано-водородо-воздушных смесей в горелочных устройствах с закруткой потока.
2. Разработка и валидация математической модели нормальной скорости распространения метано-водородного пламени в зависимости от температуры, давления и состава смеси.
3. Создание комплекса экспериментальных установок и моделей для исследования механизмов горения метано-водородных и водородных топлив, обеспечивающих проведение работ с водородосодержащими газовыми смесями в соответствии с требуемыми нормативами безопасности.
4. Расчетно-экспериментальное исследование проскока пламени при сжигании метано-водородного топлива в модельной и полноразмерной камерах сгорания.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – камеры сгорания авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок при использовании метано-водородного топлива. Предмет исследования – устойчивость горения в камерах сгорания авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок при использовании метано-водородного топлива.

Научная новизна:

1. Разработан и валидирован метод, позволяющий определять границы проскока пламени в горелочных устройствах модельных и полноразмерных камер сгорания, отличающийся уточненным кинетическим механизмом окисления метано-водородного топлива и учетом нормальной скорости распространения пламени, зависящей от температуры, давления и состава смеси.
2. Разработан кинетический механизм окисления метано-водородного топлива, позволяющий моделировать нормальную скорость распространения

пламени с более высокой точностью, применительно к параметрам рабочего процесса камер сгорания авиационных ГТД и ГТУ, отличающийся дополнительным набором элементарных реакций и уточненными константами их скоростей.

3. Получены новые зависимости, позволяющие моделировать нормальную скорость распространения метано-водородного пламени, применительно к параметрам рабочего процесса камер сгорания авиационных ГТД и ГТУ, отличающиеся учетом более широкого диапазона температур, давлений, состава смеси и видом используемого топлива.

4. Получены новые экспериментальные данные по границам проскока пламени при сжигании предварительно подготовленных метано-водородо-воздушных смесей в горелочных устройствах с закруткой потока, отличающиеся диапазоном исследуемых параметров и видом используемого топлива.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в формировании и валидации кинетической модели горения метано-водородного топлива и получении новых зависимостей для скорости распространения пламени от температуры, давления и состава смеси.

Практическая значимость результатов состоит в разработке метода определения границ проскока пламени при горении предварительно подготовленной метано-водородо-воздушной смеси в камерах сгорания, позволяющего оценить влияние добавки водорода на границы проскока пламени в горелочном устройстве КС на этапе ее проектирования и тем самым сократить сроки и затраты на разработку камер сгорания, работающих на метано-водородном топливе.

Кроме того, отработанная технология проведения экспериментов по исследованию рабочего процесса камер сгорания, работающих на метано-водородном топливе, может быть использована предприятиями и

организациями для создания безопасных стендов и инфраструктуры при разработке технологий применения водородосодержащего топлива.

Результаты диссертации нашли практическое применение при выполнении исследований в рамках следующих работ:

- «Создание опытного образца камеры сгорания газотурбинной установки ГТЭ-65.1 с низкими выбросами оксидов азота для работы на метано-водородной смеси. Эскизный проект» (работа выполнена в рамках договора Самарского университета им. Королева с АО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург).
- «Механизмы снижения вредных выбросов в энергетических установках за счет использования водорода и метано-водородных видов топлива» (работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-79-10205).
- «Расчетно-экспериментальное исследование бедного срыва пламени при горении метано-водородной смеси с различной долей содержания водорода в топливе» (работа выполнена в рамках конкурса молодых ученых и конструкторов 2022 года. Министерство науки и образования Самарской области).
- «Формирование конструктивного облика камеры сгорания, работающей на перспективном виде топлива» (работа выполнена в рамках гранта Инновационного фонда Самарской области).

Методы исследования:

1. Методы одномерного моделирования нормальной скорости распространения пламени в зависимости от температуры, давления и состава реагентов с использованием детального и редуцированного кинетических механизмов окисления метано-водородных топлив.
2. Методы экспериментального определения нормальной скорости распространения метано-водородного пламени, границ проскока пламени в камерах сгорания ГТД и ГТУ, работающих на метано-водородном топливе, при различном содержании водорода.

3. Численное моделирование процесса горения и проскока пламени в трехмерной стационарной постановке на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса.

4. Численное моделирование процесса горения и проскока пламени в трехмерной нестационарной постановке методом крупных вихрей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод, позволяющий определять границы проскока пламени в горелочных устройствах модельных и полноразмерных камер сгорания, отличающийся уточненным кинетическим механизмом окисления метано-водородного топлива и учетом нормальной скорости распространения пламени, зависящей от температуры, давления и состава смеси.

2. Разработанный кинетический механизм окисления метано-водородного топлива, отличающийся дополнительным набором элементарных реакций и уточненными константами их скоростей.

3. Новые зависимости нормальной скорости распространения пламени, отличающиеся учетом более широкого диапазона температур, давлений, состава смеси и видом используемого топлива.

4. Новые экспериментальные данные по границам проскока пламени при сжигании предварительно подготовленных метано-водородо-воздушных смесей в горелочных устройствах с закруткой потока, отличающиеся диапазоном исследуемых параметров и видом используемого топлива.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- применением сертифицированного программного комплекса ANSYS Chemkin 2021 R2, верифицированного на задачах определения термохимического состояния газовых смесей;

- применением сертифицированного коммерческого программного комплекса ANSYS Fluent 2021 R2, верифицированного на задачах расчета трехмерных турбулентных реагирующих течений по результатам сравнения с экспериментальными данными, полученными в научно-образовательном

центре газодинамических исследований Самарского университета им. Королева;

- использованием в экспериментальном исследовании поверенных средств измерения и аттестованного измерительного оборудования;

- высоким уровнем согласования результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными при исследовании процессов горения метано-водородных топлив в горелочных устройствах и модельных камерах сгорания.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались на Международной НТК «International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering» (REEE 2018, Париж, 2018 г.); Международной НТК «ASME 2019 Gas Turbine India Conference» (GTINDIA 2019, Ченнаи, 2019 г.); Всероссийской НТК «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» (Самара, 2019 г.); Международном симпозиуме «9th International Symposium on nonequilibrium processes, plasma, combustion and atmospheric phenomena» (NEPCUP 2020, Сочи, 2020 г.); Международной НТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2021 г.); Международной НТК «Гагаринские чтения» (Москва, 2022 г.); Международной НТК «ComPhysChem22» (Самара, 2022 г.); Международном симпозиуме «NEPCUP 2022», (Сочи, 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи в периодических изданиях, включенных в список ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 5 публикаций в материалах конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 222 наименований и 1 приложения. Основной текст 185 страниц, 89 иллюстраций и 17 таблиц.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Использование водорода в энергетике и транспорте – это один из трендов развития мировой экономики, в которой водород в перспективе станет новым глобальным энергоносителем и займет долю рынка, сопоставимую с углем, нефтью или газом. По различным прогнозам это может случиться в целом в мире после 2040 года [12, 29, 31, 32, 117]. В наши дни водород производится в основном из углеводородов (около 65 млн тонн в год) и обычно используется в местах производства. Вызов ближайших десятилетий - это создание принципиально новой индустрии и рынка, основанного на безуглеродном производстве водорода, его крупномасштабном хранении и транспортировке на сотни и тысячи километров в трубопроводах, в морских и наземных танкерах, а также в организации широкомасштабного использования в энергетике, транспорте, промышленности – от сталелитейных и химических производств, крупных энергетических газовых турбин до индивидуальных источников энергии для домохозяйств, наземного и водного транспорта, авиационных систем [17, 32, 35, 41, 170, 193].

1.1 Перспективы использования водорода в энергетике и транспорте

В мировой экономике в настоящее время активно продвигаются процессы глобальной трансформации, связанные с энергетическим переходом к «зеленым» и возобновляемым источникам энергии, которые должны обеспечить декарбонизацию и последующее развитие на основе стратегии углеродной нейтральности. Одним из направлений глубокой декарбонизации является использование водородного топлива в энергетике и транспортных системах [5, 25, 42, 77].

Ведущие страны мира, отдельные регионы, крупные корпорации, города и даже отдельные муниципалитеты устанавливают в своих долгосрочных стратегиях цели по снижению выбросов парниковых газов (или углеродного следа) в целях борьбы с глобальным изменением климата. В частности, декларации целого ряда государств (большинство из них сделано в 2015 г. в

связи с Парижским соглашением) содержат снижение таких выбросов к 2030 г. на 25-40% от уровня 1990 года или 2005 года, а Германия декларирует сокращение выбросов парниковых газов на 80-95% к 2050 году (табл. 1.1) [25].
Таблица 1.1 – Примеры заявленных национальных целей по сокращению выбросов и увеличению абсорбции парниковых газов (ПГ) [25]

Страны	Декларируемые вклады в смягчение изменений климата
США	К 2025 – сократить выбросы ПГ на 26-28% от уровня 2005
Канада	К 2030 – сократить выбросы ПГ на 30% от уровня 2005
Германия	К 2030 – сократить выбросы ПГ на 40-55% от уровня 1990, 2050 – на 80-95%
Франция	К 2030 – сократить выбросы ПГ на 40% от уровня 1990
Норвегия	К 2030 – сократить выбросы ПГ на 40% от уровня 1990
Бразилия	К 2025 – сократить выбросы ПГ на 37% от уровня 2005
Мексика	К 2030 – сократить выбросы ПГ на 22-36% от базовой линии
Китай	К 2030 – сократить удельные выбросы ПГ на 1 долл. ВВП на 65%
Австралия	К 2030 – сократить выбросы ПГ на 26-28% от уровня 2005

Применение водорода в транспортном секторе возможно как непосредственно в виде топлива для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), газотурбинных двигателей (ГТД) или газотурбинных установок (ГТУ), так и в виде водородных топливных элементов для электрических или комбинированных двигателей [1, 2, 6, 18-20, 30, 40, 39]. Автомобильный транспорт с двигателями внутреннего сгорания, работающими на водородном топливе, появился еще в середине прошлого века [11, 33]. Первый авиационный газотурбинный двигатель на водородном топливе НК-88 прошел летные испытания в 1988 году [2, 39]. Развитию транспортных систем с водородными топливными элементами также уделяется большое внимание поскольку их использование позволяет обеспечить, отсутствие шума при работе электродвигателя, большую надежность и безопасность [40].

Для энергетических газотурбинных установок ведущими мировыми производителями разработаны топливные агрегаты и системы горения, обеспечивающие возможность использования водорода в виде добавки к

природному газу [44, 57, 58, 66, 70, 82, 86, 88, 94, 125, 126, 128, 129, 142, 167, 177, 179, 180, 185, 186, 194, 199, 211]. Применение чистого водорода как топлива в настоящее время рассматривается как важная задача дальнейших исследований и разработок [52, 66, 112].

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р утвержден план мероприятий («дорожная карта») по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года, направленный на увеличение производства и расширение сферы применения водорода в качестве экологически чистого энергоносителя, а также вхождение страны в число мировых лидеров по его производству и экспорту. В соответствии с «дорожной картой» предусмотрена реализация ряда пилотных проектов в области водородной энергетики, одним из которых является разработка, изготовление и проведение испытаний газотурбинных установок на метано-водородном топливе [34]. Все это показывает актуальность исследований в области применения водорода, а также метано-водородных смесей в качестве топлива для авиационных ГТД и созданных на их базе наземных ГТУ различного назначения, наземного транспорта и авиационных двигателей.

Водород – очень привлекателен для замены углеводородного топлива и получения чистых энергетических систем. Он имеет более высокую теплотворную способность, чем природный газ, который широко используется в мире. Однако, водородное топливо в связи с его низкой плотностью требует специальных условий хранения и вспомогательного оборудования для энергетических систем. Кроме того, более высокая реакционная способность водорода по сравнению с углеводородами и, как следствие, большая скорость распространения пламени, а также повышенная температура в зоне горения приводят к необходимости пересмотра принципов организации рабочего процесса и конструкции камер сгорания двигателей и установок, работающих на традиционных топливах [22]. Компромиссным решением, позволяющим частично использовать преимущества водорода, но

кардинально не менять конструкцию камер сгорания и систем топливоподачи является использование водорода в качестве добавки к применяемым углеводородным топливам, например, природному газу. При этом нужно понимать, что для использования метано-водородных смесей на практике следует более подробно изучить свойства таких смесей на фундаментальном и прикладном уровне, включая физико-химические механизмы окисления топлива, нормальную скорость распространения пламени, явления проскока пламени и другие.

Метан (CH_4), как основной компонент природного газа, и водород (H_2) являются газообразными веществами при нормальных условиях окружающей среды, однако их удельные свойства существенно различаются. Как показано в таблице 1.2, низшая теплотворная способность чистого водорода (120 МДж/кг) более чем в два раза выше, чем у чистого метана (50 МДж/кг). Из-за большой разницы молярных масс, массовый состав смеси значительно отличается от объемного. Метано-водородные смеси имеют теплотворную способность около 3,2 МДж/м³; теплотворная способность чистого метана составляет около 3,4 МДж/м³. Так, смеси дают небольшое преимущество с точки зрения энергоемкости, при этом теплотворная способность смеси все еще значительно ниже, чем у бензина или дизельного топлива (~ 3,8 МДж/м³) [2].

Таблица 1.2 – Свойства базовых компонентов и метано-водородных смесей при давлении $P_0 = 101,3$ кПа и температуре $T_0 = 273$ К

Параметр	Ед. измерения	H_2	5% CH_4 по объему	20% CH_4 по объему	CH_4
Плотность	кг/м ³	0,090	0,12	0,22	0,717
Молярная масса	кг/кмоль	2,016	2,72	4,82	16,043
Низшая теплотворная способность	МДж/кг	120,0 1	99,34	73,42	50,00
Стехиометрический коэффициент	-	34,3	29,3	22,9	17,2
Нормальная скорость распространения пламени для стехиометрической смеси	см/с	200	-	-	40

Создание оптимальной схемы процесса сгорания с использованием водорода в качестве добавки к основному (углеводородному) горючему является предметом исследований и разработок, проводимых в настоящее время в России и за рубежом [1, 6, 39, 44, 211]. В рамках развития технологий применения метано-водородного топлива ведущие компании приступили к разработке газотурбинных двигателей и созданных на их базе энергетических установок, работающих на различных метано-водородных смесях [44, 57, 58, 66, 70, 82, 86, 88, 94, 125, 126, 128, 129, 142, 167, 177, 179, 180, 185, 186, 194, 199, 211].

Mitsubishi Hitachi Power Systems на заводе в Такасаго (Япония) успешно испытала сверхмощную ГТУ (700 МВт) при работе на топливной смеси из природного газа (70%) и водорода (30%). Для сжигания топлива использовались горелки с вихревым перемешиванием [123].

Компания Siemens производит ГТУ в широком диапазоне по мощности от 2 МВт (KG2) до 593 МВт (SGT5-9000HL) и имеет значительный опыт работы с газотурбинными установками, использующими метано-водородное топливо. Проведены испытания газовых турбин с содержанием водорода в топливном газе от 30% до 73%. Для ГТУ средней мощности (25–57 МВт) была продемонстрирована возможность сжигать до 60% H_2 по объему без изменения конструкции камеры сгорания типа DLE (технология «сухого низкоэмиссионного горения») [86]. Как и другие производители, Siemens поставил перед собой цель спроектировать ГТУ, способные работать на чистом водороде во всем диапазоне рабочих режимов. Конструкция горелки DLE (Dry Low Emissions burner), используемой в камере сгорания, обеспечила возможность устойчивой работы при добавках водорода в природный газ до 40% по объему на ГТУ SGT-700 (33 МВт) и до 50% по объему на ГТУ SGT-800 (50 МВт). Из представленной на рисунке 1.1 [143] стратегии развития продуктовой линейки ГТУ компании Siemens видно, что для газовых турбин большой мощности (больше 100 МВт) предполагается использовать метано-водородное топливо с объемной долей H_2 до 30% с применением технологии

«сухого низкоэмиссионного горения» (DLE burner). Для установок средней мощности (20-60 МВт), в том числе созданных на базе авиационных ГТД (SGT-A35, SGT-A45, SGT-A65) предлагается использовать как технологию DLE (для умеренных значений добавок H₂ в топливо), так и «мокрую» технологию сжигания (WLE burner) при увеличении доли водорода до 100%. Применение горелок диффузионного типа рассматривается для небольших ГТУ (4-14 МВт).

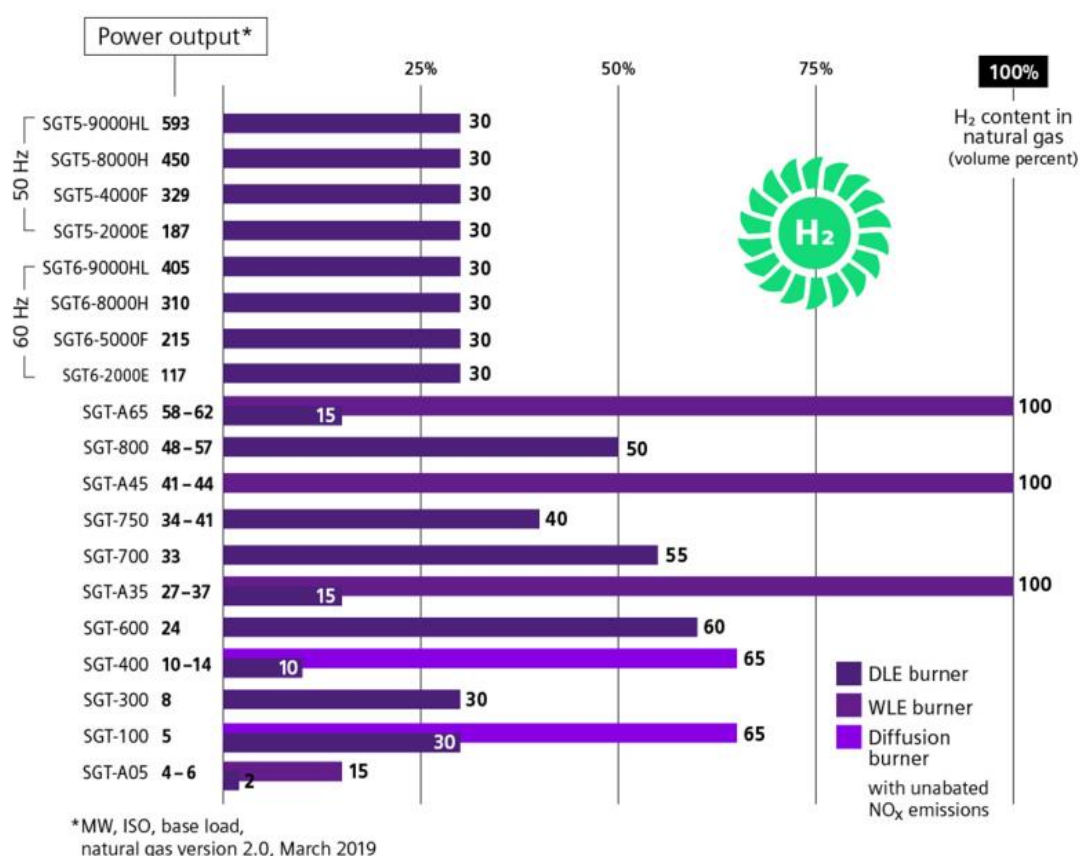


Рисунок 1.1 – Стратегия применения водорода на ГТУ компании Siemens [143]

General Electric является мировым лидером в области многотопливных ГТУ, включая более 70 газовых турбин, которые работают на топливе, содержащем водород. Парк ГТУ General Electric, предназначенных для работы на метано-водородном топливе, включает 13 ГТУ Frame 5 и более 20 ГТУ 6B.03. Многие из этих установок работали на топливе с концентрацией водорода от 50 до 80 процентов (по объему) [179].

Kawasaki (Япония) в настоящее время проектирует ГТУ, работающую на метано-водородном топливе [129]. Другой проект направлен на разработку камеры сгорания для чистого водорода, в которой обеспечивается ограничение образования NOx при одновременном повышении общей производительности турбины и стабильной работы [58]. Компания Kawasaki уже разработала коммерческую ГТУ L30A01D, которая может эксплуатироваться на метано-водородном топливе (H₂ до 60% по объему) с низкими выбросами NOx.

В таблице 1.3 представлены ГТУ ведущих производителей с указанием их параметров, систем организации горения, уровнем эмиссии. По данным таблицы 1.3 можно увидеть, что в основном для ГТУ в широком диапазоне мощностей применяются системы сухого подавления эмиссии вредных веществ (DLE). При этом для конкретных диапазонов мощностей нет определенного типа конструкции КС, так как каждая фирма развивает технологии и конструкции, которые наиболее отработаны, если они позволяют отвечать современным требованиям, в том числе низкому уровню выбросов вредных веществ и устойчивой надежной работе.

Таблица 1.3 – Параметры и сведения о ГТУ, работающих на топливах с содержанием H₂

Мощность	Модель	Компания	Топливо	Особенности конструкции	Уровень эмиссии	Уровень готовности	Источник
1	2	3	4	5	6	7	8
30 МВт	L30A01D/DLH	Kawasaki	≤60 об.% H ₂	Камера сгорания с предварительным смешением DLE 8 камер сгорания (Самый высокий электрический КПД в своем классе)	NO _x <25 ppm	Введена в эксплуатацию	[128,129]
200 МВт	GT13E2	Alstom	≤45 об. % H ₂	Кольцевая камера сгорания Частичное предварительное перемешивание Разбавление N ₂ до 55% об. E-класс	NO _x <25 ppm	Тестируется	[94,179,199]
250 МВт	GT24		≤70 об. % H ₂	Кольцевые камеры сгорания с системой DLE F-класс Технология последовательного горения, Генераторы вихрей	NO _x <25 ppm	Тестируется	[94,126,177]
360-400МВт	GT26		NO _x <25 ppm	Тестируется			
11,25 МВт	GE10 (PGT10)	GE	≤100% H ₂	Диффузионная система или система DLE Одиночная камера сгорания силового типа Впрыск пара для сокращения NO _x	NO _x <25 ppm	Введена в эксплуатацию	[70,88,125,186,199]
40 МВт	MS6001B		95% H ₂	10 трубчатых камер сгорания Впрыск пара или воды Может быть оснащен DLE	DLE NO _x ~25	Введена в эксплуатацию	[88,125]
211 МВт для GE7FA	Flamesheet	Power Systems Mfg	≤60% H ₂	Трубчатая камера сгорания с предварительным смешиванием Ступенчатое горение Вихревая стабилизация 30% модифицированный диапазон индекса Воббе E- и F-класс S	NO _x <10 ppm	Введена в эксплуатацию	[44,194,199]

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8
120-206 МВт	TG50 DLN	EthosEnergy (UK)	100% H2	Система поперечного впрыска топлива, модифицированная для осевого завихрителя	NOx ≤38 ppm (в зависимости от α)	Тестирование прототипа	[66]
170 МВт	V94.2K	Ansaldo Energia	≤45 об % H2	Диффузионная система Две КС силового типа Разбавление паром до 50% об. Е-класс	-	Тестирование	[57,58]
230 МВт	SGT6-5000F 60 Hz	Siemens	~73% H2	Двухступенчатая камера сгорания диффузионного типа N2 и / или разбавление паром F класс Развитие каталитического горения	NOx <15 ppm	Тестирование для IGCC	[167,211]
7 МВт	SGT-200 50/60 Hz		80–85% H2	Система горения DLE Трубчатая КС	NOx ≤25 ppm	Введена в эксплуатацию	[82,86,211]
15 МВт	SGT-400		30 об.% H2 стабильный, > 70 об.% Необходим редизайн	Трубчатые КС Пилотная и основная горелка Система сгорания DLE Радиальный завихритель воздуха	-	Тестируется	[142]
24,77 МВт	SGT-600 50/60 Hz		20–90% H2	3-я модификация с системой сгорания DLE	NOx ≤22,5 ppm	Введена в эксплуатацию	[86,142,211]
121 МВт	SGT6-3000E 50 Hz		40–60% H2	14 камер сгорания Разбавление паром ≤22% или N2 ≤30% Испытано каталитическое горение Е-класс	-	Введена в эксплуатацию	[86,180,199,211]

Концепция сжигания обогащенного водородом природного газа основана на обеспечении устойчивого горения при бедных и сверхбедных смесях, которая, при высокой эффективности, позволяет существенным образом снизить выбросы таких вредных веществ как оксиды азота (NO_x). С другой стороны, обогащение водородом также приводит к сокращению выбросов парникового газа (CO_2). В то же время существуют проблемы, которые вызваны различиями между водородом и традиционными углеводородными видами топлива.

Из-за значительной разницы в скоростях пламени метана и водорода, а также температуры горения [3], системы сгорания, спроектированные для работы на метане (или природном газе), могут не обеспечить требуемую эффективность и надежность при работе на топливе с высоким уровнем добавок водорода. Поэтому для этих случаев требуется разработка специальных технологий проектирования и доводки камер сгорания с учетом особенностей физико-химических процессов горения метано-водородных топлив и чистого водорода.

При работе с водородом также возникают дополнительные проблемы, связанные с общей безопасностью при исследовании и эксплуатации подобных систем [92].

Во-первых, водородное пламя имеет низкую яркость и поэтому его трудно увидеть визуально, как показано на рисунке 1.2. Для этого требуются системы контроля, специально разработанные для водородного пламени.

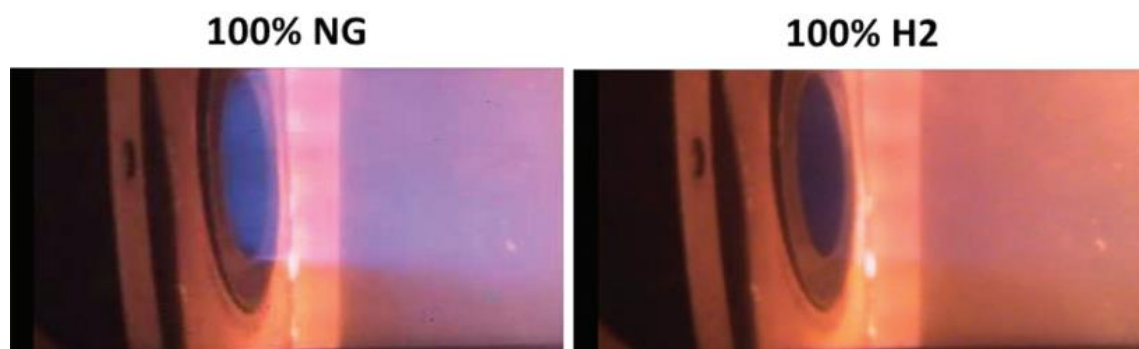


Рисунок 1.2 – Сравнение пламен метана и водорода [92]

Во-вторых, водород может диффундировать через уплотнения, которые считаются воздухонепроницаемыми или непроницаемыми для других газов. Поэтому традиционные системы уплотнения, используемые для природного газа, необходимо заменить сварными соединениями или другими соответствующими компонентами.

В-третьих, водород более горюч, чем метан (или природный газ): нижний (или «бедный») предел воспламеняемости метана (в воздухе) составляет 5% по объему, что соответствует коэффициенту избытка воздуха $\alpha_{\text{бед}} = 1,8$, а для водорода - 4%, что соответствует $\alpha_{\text{бед}} = 9,8$ [13]. Следовательно, утечки водорода могут создавать повышенные риски безопасности как при разработке, так и при эксплуатации двигателей и энергетических установок, работающих на водородосодержащих топливах. Это требует изменения подходов к организации производственных процессов, системам контроля и квалификации кадров.

Решая задачу обеспечения низкого уровня выбросов загрязняющих веществ (в частности, оксидов азота - NO_x) с выхлопными газами газотурбинных двигателей и установок, в современной мировой практике применяют технологию сжигания бедных предварительно подготовленных смесей LPP (Lean Premixed Prevarporized) [8, 9]. Одной из важных проблем обеспечения устойчивости и безопасной работы подобных камер сгорания является риск проскока пламени в зону предварительного смешения топлива с воздухом, что может привести к прогарам горелочных устройств. При использовании водорода риск проскока пламени и самовоспламенения резко возрастает [195] по сравнению с обычными видами топлива, что объясняется рассмотренными выше свойствами H_2 . Таким образом, сжигание предварительно приготовленной смеси с высоким содержанием H_2 требует дополнительных расчетно-экспериментальных исследований.

В настоящее время ведутся различные программы, направленные на разработку конструкций камер сгорания, где реализуются технологии горения предварительно подготовленных ТВС для топлив с высоким содержанием H_2

[44, 57, 58, 66, 70, 82, 86, 88, 94, 125, 126, 128, 129, 142, 167, 177, 179, 180, 185, 186, 194, 199, 211]. Как показывают результаты исследований для подобных КС при использовании метано-водородных смесей (МВС) с содержанием водорода до 20% практически не требуется доработка горелочных устройств и камеры сгорания в целом [94, 128, 129, 179, 199]. При содержании водорода до 60-70% необходима разработка нового фронтного устройства, но остается возможность реализовывать технологии предварительной подготовки ТВС. Примером, показанным на рисунке 1.3 [103], может служить сжигание обедненной предварительно подготовленной смеси с использованием технологии DLN (Dry Low NO_x), которая является более направленной на подавление выбросов оксидов азота по сравнению с представленной выше технологией DLE (Dry Low Emissions).

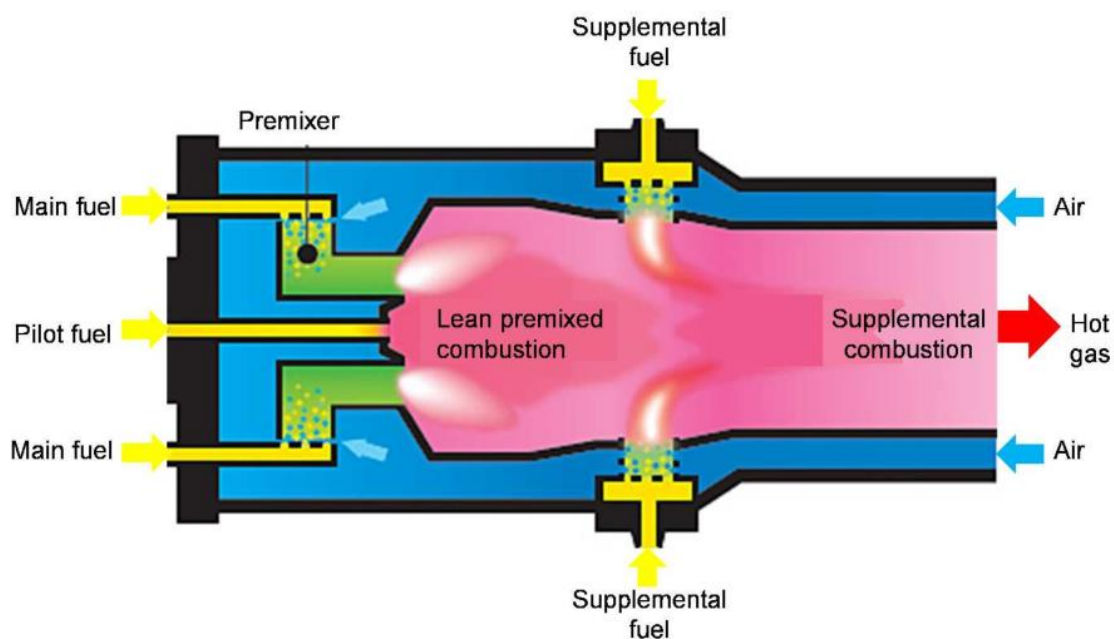


Рисунок 1.3 – Организация системы горения по технологии DLN [103]

При содержании водорода **от 70% до 100%** потребуются разработка и внедрение альтернативных способов организации горения. Камеры сгорания такого типа, как правило, используют диффузионную или микрофакельную систему подачи ТВС [79].

Для реализации задач по использованию водорода как добавки в углеводородное топливо в современных газотурбинных двигателях и

установках, необходимо доработать традиционные методики проектирования и доводки КС, работающих на стандартных топливах. На этапе предварительного проектирования необходимо учитывать основные физико-химические свойства метано-водородных смесей (в зависимости от доли содержания H_2): низшую теплоту сгорания, пределы воспламенения, температуру горения в зависимости от состава ТВС и другие. На этапе экспериментальной отработки элементов КС и камеры сгорания в целом требуется обеспечить безопасную эксплуатацию стендовых систем, а также надежность и достоверность систем измерения и контроля. На этапе расчетного обоснования выбранных конструктивных решений по облику КС и отдельных горелочных устройств с помощью методов трехмерных газодинамических вычислений (CFD) необходимо настроить соответствующие математические модели на решение задач горения метано-водородных смесей.

При численном моделировании рабочего процесса камер сгорания особое внимание уделяется кинетическим механизмам окисления используемого топлива, которые должны точно описывать кинетику химических реакций процессов горения, прогнозировать динамику образования промежуточных и конечных продуктов реакций, обеспечивать расчет нормальной скорости распространения пламени и других ключевых характеристик горения ТВС [27]. Разработка и валидация универсального кинетического механизма окисления применяемого типа топлива в КС является одной из ключевых задач для адекватного описания процесса горения.

Обогащение углеводородного топлива водородом приводит к изменению нормальной скорости распространения пламени (см. табл. 1.2), которая является одной из основных фундаментальных характеристик в физико-химических механизмах процесса горения. Данные по скорости пламени используется как при предварительном проектировании камер сгорания, так и на этапе численного моделирования процессов горения.

Точное определение скорости пламени важно для разработки методов повышения эффективности всех способов организации процесса горения.

Как отмечено выше, горение метано-водородных смесей обладает рядом особенностей, которые должны быть отражены в математических моделях. Однако, в настоящее время математические модели горения метано-водородного топлива валидированы только в узком диапазоне исследуемых параметров. Для дальнейшей разработки и экспериментального обоснования математических моделей горения метано-водородных смесей необходимо иметь надежные опытные данные, с полным описанием методики проведения эксперимента и используемых модельных горелочных устройств, что обычно в полном объеме отсутствует в публикуемых научных материалах. Поэтому, важным направлением является формирование собственной экспериментальной базы с возможностью исследовать горение метано-водородных смесей.

1.2 Кинетические механизмы окисления метано-водородных смесей

Кинетические механизмы окисления топлив являются значимым инструментом описания термохимического состояния реагирующих смесей. Наиболее широко распространенные в мире механизмы сформированы в виде Chemkin формата и представляют собой базы данных, включающие зависимости для скоростей элементарных химических реакций, термодинамических свойств веществ и данные для моделей межмолекулярных взаимодействий. Как правило, в кинетических механизмах используются физически обоснованные данные, полученные в результате расчетных исследований или аппроксимации доступной экспериментальной информации. В исследованиях процессов горения широко используют кинетические механизмы разной детализации – от нескольких квазиглобальных реакций для расчетов CFD в прямой численной постановке (DNS), до расширенных и детальных моделей, включающих сотни веществ и

многие тысячи реакций, для реакторного моделирования в одномерной и нульмерной постановке [3].

Совершенствование конструкций малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС) и горелочных устройств, переход к альтернативному, в том числе метано-водородному топливу, предопределяет достоверное описание химических превращений в процессе горения. При этом, учитывая разнообразие решаемых задач и исследуемых режимов, наиболее востребованными можно считать физически обоснованные детальные кинетические механизмы, описывающие все возможные взаимодействия. Однако, исходя из баланса точности и времени вычислений в современных исследованиях, как правило, отдаются предпочтения расширенным и редуцированным моделям, которые исключают относительно малозначимые реакции и представляют ряд схожих изомеров одним компонентом.

Многие стадии реакций и термохимические свойства промежуточных веществ в полной степени не изучены. По этой причине даже детальная кинетика горения водорода и природного газа до сих пор периодически пересматривается [38]. Уточнение скоростей отдельных стадий посредством экспериментального исследования или высокоточных методов компьютерной химии не всегда способствует повышению прогностической способности модели в целом. Поэтому при изменении каких-либо составляющих модели необходима ее комплексная валидация и определение границ применения. Однако, доступные в литературе экспериментальные данные и соответствующие оценки степени достоверности моделей часто ограничены узкими диапазонами исследуемых параметров. Таким образом обзор, валидация и выбор кинетических механизмов окисления используемых топлив является важной составляющей, предшествующей моделированию рабочих процессов проектируемых изделий.

В рамках обзора кинетических механизмов горения метано-водородного топлива рассмотрены модели разной детализации.

В работе [115] был проведен подробный анализ для 12 кинетических моделей горения водорода. Расчетно-экспериментальное исследование времени задержки воспламенения водорода показало, что в целом все механизмы способны предсказывать характеристики воспламенения при атмосферном давлении, но только 4 механизма: Ó Conaire2004 [72], CRECK2012 [200], Kéromnès2013 [130] и Varga2015 [206] дают удовлетворительное согласование с экспериментальными данными при повышенных давлениях (до 16 атм). При этом отмечается, что три общепризнанных механизма: GRI3.0 [188], SanDiego2011 [150] и Li2004 [147], которые представлены в коммерческих программных продуктах (например, ANSYS Fluent или ANSYS CFX) и широко используются в современных исследованиях, демонстрируют значительно завышенные результаты относительно экспериментальных данных при повышенном давлении.

Burke и Klippenstein предположили, что химически тримолекулярные реакции $H + O_2 + R$ могут существенно влиять на кинетические пути в обычных условиях горения и требуют дополнительного тщательного анализа [65, 134]. Данные работы послужили поводом к пересмотру кинетического механизма горения водорода. В 2019 году Конновым была предложена новая кинетическая модель [138], включающая результаты последних исследований: уточненные значения скоростей элементарных реакций и данных переноса для расчета вязкости, проводимости и коэффициента диффузии. Модель горения водорода Коннова включает 70 реакций и учитывает взаимодействия с озоном и возбужденными радикалами. Это наиболее детальный кинетический механизм горения водорода на данный момент.

Для моделирования горения водорода также может быть использована модель Zhang2017 [219], разработанная для синтез-газа, в котором содержится значительная доля H_2 . Для данного механизма было получено хорошее согласование с экспериментальными данными по воспламенению при давлении до 12 атм и удовлетворительное прогнозирование концентраций оксидов азота.

Рассмотренные выше кинетические механизмы Ó Conaire2004 [63], Kéromnès2013 [65], Varga2015 [66], Konnov2019 [72] и Zhang2017 [73] созданы исключительно для горения водорода и не содержат реакций с веществами, имеющими в своем составе атомы углерода, то есть их невозможно использовать для моделирования процессов окисления метано-водородных смесей. Однако, как надежные и верифицированные базы данных по элементарным реакциям с участием водорода, они могут быть использованы для уточнения других механизмов, описывающих окисление углеводородов.

Модель CRECK2012 была уточнена и на данное время представлена в нескольких вариантах на сайте CRECK Modeling group Миланского политехнического университета (Version 2003, March 2020) [200]. Предлагаемые механизмы позволяют решать ряд задач, в том числе прогнозирование концентраций NO_x в продуктах сгорания природного газа.

Механизмы Aramco1.3 (2013) и Aramco2.0 (2016) получили дальнейшее развитие в механизмах Aramco3.0 (2018) [221] и NUIGMech1.0 [49] (2020). NUIGMech1.0 представляет собой очень подробную модель из 2747 компонентов и включает в себя механизмы образования оксидов азота. Применение данной модели для описания горения метан-водородных смесей при моделировании в трехмерной постановке может потребовать редуцирования. В целом эти модели хорошо описывают горение углеводородных топлив с низкой молекулярной массой и зачастую используются в качестве прототипа для новых моделей.

Коннов, Li с соавторами [149] исследовали влияние добавок водорода к метану с помощью скелетных и редуцированных кинетических механизмов. В работе проведен анализ 10 различных моделей, полученных в результате редуцирования механизмов GRI, Aramco, POLIMI (CRECK Modeling group), USC2.0 и модели Konnov2018 [67]. В результате анализа указанных механизмов для исследования были выбраны две редуцированные модели, основанные на механизмах Коннова и Aramco2.0. Результаты численного моделирования с использованием этих механизмов хорошо согласуются с

экспериментальными данными по определению нормальной скорости распространения метано-водородного пламени [149].

В недавней работе Zhang представил результаты прогнозирования ламинарной скорости распространения пламени метан-водородных топливных смесей тремя различными моделями [217] и показал, что модель FFCM1.0 [187] наиболее точно описывает кинетику горения.

Модели Aramco2.0, Konnov2018, а также их редуцированные версии из работы [149] и модель FFCM1.0 могут применяться для моделирования горения метано-водородных смесей, однако, для прогнозирования концентраций оксидов азота данные модели должны быть расширены. Субмеханизмы форматирования NO_x могут быть взяты из других моделей, представленных в таблице 1.4. Для уточнения субмеханизмов образования NO_x также могут быть использованы данные из работы [217].

Среди других механизмов, способных к прогнозированию концентраций NO_x , при сжигании метано-водородных топлив стоит отметить модели Stagni2016 [192] и модель Wang2018 [209].

Модели Stagni2016 [192] – это скелетные модели из 55 и 59 компонентов, полученные в результате редуцирования модели POLIMI V1412 (CRECK modeling group). Скелетные модели применялись для CFD и реакторного прогнозирования образования оксидов азота и показали хорошее соответствие экспериментально определенным концентрациям NO_x в пламени метано-воздушной предварительно подготовленной ТВС с коэффициентом избытка топлива $\varphi = 1,2$ ($\varphi = 1/\alpha$, где α – коэффициент избытка воздуха). Для стехиометрической и обедненных смесей ($\varphi \leq 1$) отклонение результатов расчета по этим моделям от экспериментальных данных было достаточно значительным [192].

Скелетный механизм Wang2018 [209], состоящий из 48 компонентов, был успешно применен для моделирования горения метано-водородных смесей при давлениях 1-40 бар и коэффициенте избытка топлива $\varphi = 0,6 \dots 1,4$. Расчет концентраций NO_x хорошо согласуется с экспериментом для

стабилизированного при нормальных условиях пламени предварительно подготовленной стехиометрической метан-водород-воздушной смеси [74].

Рассмотренные кинетические механизмы сведены в таблицу 1.4.

Таблица 1.4 – Кинетические механизмы окисления метано-водородных топлив

№	Механизм	Источник	NO _x	Примечание
Механизмы для моделирования горения водорода				
1.	Ó Conaire2004	[72]		Механизмы для прогнозирования воспламенения водорода из обзора E. Hu [115]
2.	Kéromnès2013	[130]		
3.	Varga2015	[206]		
4.	Zhang2017	[219]	+	Механизм прогнозирования концентраций NO _x при горении синтез газа
5.	Konnov2019	[138]		Детальный кинетический механизм горения водорода
Механизмы для моделирования горения метано-водородных смесей				
1.	Aramco2.0 (2016) Aramco3.0 (2018)	[219]		Кинетические механизмы горения небольших углеводородных топлив C1-C5
2.	Konnov2018	[67]		
3.	Li2019 (Konnov)	[149]		Редуцированная модель Коннова для моделирования метан-водородных смесей
4.	Li2019 (Aramco)	[149]		Редуцированная модель Aramco для моделирования метан-водородных смесей
5.	FFCM-1	[187]		Кинетические механизмы горения низкомолекулярных углеводородных топлив C1-C2
Механизмы для прогнозирования концентрации оксидов азота при горении метано-водородных смесей				
1.	Konnov (NH ₃ /H ₂ /CH ₄) 2019	[148]	+	Механизм и две редуцированные модели для прогнозирования горения NH ₃ /H ₂ /CH ₄ смесей
2.	CRECK2020	[200]	+	Детальный механизм для C1-C3 топлив, 159 компонентов
3.	Stagni2016	[192]	+	Скелетный механизм из 55 и 59 компонентов
4.	Wang2018	[209]	+	Скелетный механизм из 48 компонентов
5.	NUIGMech1.0	[49]	+	Последняя версия механизмов NUI Galway (Aramco), требуется редуцирование
6.	GRI3.0 (1999)	[188]	+	Механизм горения природного газа. Неточен при повышенных давлениях

Среди представленных механизмов для прогнозирования концентраций NO_x, наиболее перспективной выглядит модель Konnov2019 и модель CRECK2020. Модели Wang2018 и Stagni2016 требуют дополнительной верификации. Модель NUIGMech1.0 может потребовать редуцирования. От использования модели GRI3.0 рекомендуется отказаться ввиду больших

погрешностей при прогнозировании характеристик горения водородосодержащих смесей при повышенном давлении [115].

Таким образом, для моделирования метано-водородных смесей проведен обзор современных кинетических механизмов. Выделены модели, которые могут быть использованы для описания горения водорода и метано-водородных топлив, а также являющихся основой для разработки или уточнения новых кинетических механизмов. Вместе с тем, как показывает анализ современного состояния исследований, многие стадии реакций и термодимические свойства промежуточных веществ в полной степени не изучены, а детальная кинетика горения водорода и метана периодически уточняется. Таким образом, универсальных высокоточных моделей окисления метано-водородных смесей, применимых в широком диапазоне параметров рабочего процесса в камерах сгорания авиационных ГТД и ГТУ, в настоящее время не существует. Поэтому совершенствование кинетических данных опубликованных моделей и уточнение кинетических механизмов окисления метано-водородных топлив является актуальной задачей для проведения комплексных исследований в широком диапазоне граничных условий.

1.3 Влияние добавок водорода в метано-воздушную смесь на характеристики нормальной скорости распространения пламени

Концепция малоэмиссионного сжигания природного газа, обогащенного водородом, основана на расширении пределов устойчивого горения ТВС ($\alpha_{\text{бог}} < \alpha < \alpha_{\text{бед}}$) для обеспечения условий эффективного сжигания сверхбедных смесей, когда выбросы оксидов азота (NO_x) значительно сокращаются. Добавка водорода к природному газу также приводит к уменьшению выбросов углекислого газа (CO_2). С другой стороны, добавка водорода в углеводородное топливо повышает риск проскока пламени в зону предварительной подготовки ТВС в горелочном устройстве КС газотурбинных двигателей и установок.

Возможность реализации этой концепции была изучена в ряде недавних исследований, включая эксперименты в ударных трубах, в реакторах

«идеального» смешения, в пламени предварительно подготовленных ТВС и диффузионном пламени. Обычно эти исследования сопровождались сравнением опытных данных с результатами моделирования для проверки кинетических механизмов и лучшего понимания различных эффектов от степени обогащения углеводородного топлива водородом [62, 73, 78, 80, 91, 105, 113, 114, 120, 136, 144, 153, 172, 173, 184, 216].

При добавлении водорода к природному газу или другому углеводородному топливу происходит интенсификация процесса горения, приводящая к увеличению нормальной скорости распространения пламени и расширению пределов устойчивого горения (рисунок 1.4) [172].

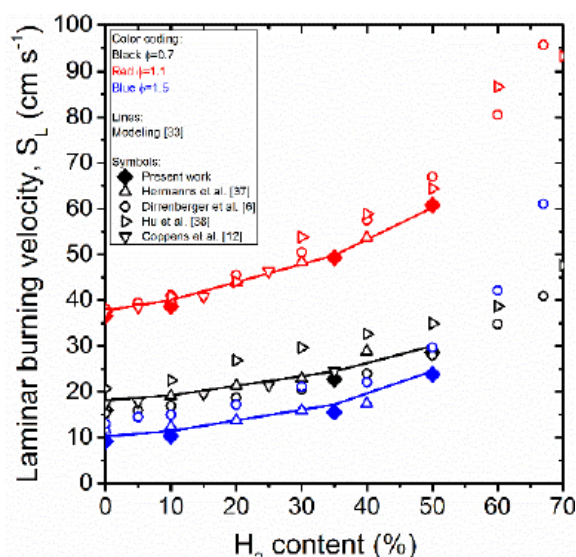


Рисунок 1.4 – Зависимость нормальной скорости распространения пламени от объемной доли водорода в метано-водородной смеси [172]

Нормальная скорость распространения пламени (S_L) является фундаментальной характеристикой процесса горения, в значительной степени определяющей протекание рабочего процесса в камерах сгорания, и зависит от молекулярного состава топлива, давления и начальной температуры [3]. Поэтому, определение S_L для различных типов топлив является предметом многочисленных расчетно-экспериментальных исследований в ведущих мировых научных коллективах. Применительно к экспериментальному исследованию процессов ламинарного горения метано-водородных смесей такие работы представлены в таблице 1.5, здесь: ϕ – коэффициент избытка

топлива; T_0 и P_0 – начальная температура и давление; R_H – объемная доля водорода в метано-водородном топливе, $R_H = 100 \cdot X_{H_2} / (X_{H_2} + X_{CH_4})$, где X_{H_2} , X_{CH_4} – мольная концентрация H_2 и CH_4 .

Таблица 1.5 – Экспериментальные исследования нормальной скорости распространения пламени смеси метан/водород/воздух [124]

Автор	ϕ	T_0 (K)	P_0 (МПа)	R_H (%)	Метод	Год	Ссылка
Nilsson et. al	0,6-1,5	298	0,1	0-50	Heat flux	2017	[172]
Yu and Law	0,5-1,4	298	0,1	0-70	Counter flow flame	1986	[216]
Law and Kwon	0,6-1,67	298	0,1	85-100	Spherical flame	2004	[144]
Halter et.al	0,7-1,2	298	0,1-0,5	0-20	Spherical flame	2005	[105]
Ilbas et. al	0,8-1,2	298	0,1	0-100	Spherical flame	2006	[120]
Hermanns	0,6-1,5	298-430	0,1	0-40	Heat flux	2007	[108]
Coppens et. al	0,6-1,5	298	0,1	0-35	Heat flux	2007	[73]
Mandilas et. al	0,6-1,2	600	1,5	30	Spherical flame	2007	[153]
Shy et. al	0,6-0,8	300	0,1	0-30	Spherical flame	2008	[184]
Hu et. al	0,6-1,4	303	0,1	0-100	Spherical flame	2009	[113]
Hu et. al	0,8	303-443	0,1-0,75	0-100	Spherical flame	2009	[114]
Konnov et. al	1	298	0,02-0,08	0-20	Heat flux	2009	[136]
Dirrenberger et. al	0,6-2,2	298	0,1	0-68	Heat flux	2011	[78]
Boushaki et. al	0,8-1,2	300	0,1	0-30	Bunsen flame	2012	[62]
Okafor et. al	0,8-1,2	350	0,1	0-100	Spherical flame	2013	[173]
Donohoe et. al	0,5-1,5	300-450	0,1	90	Spherical flame	2014	[80]
Gockeler et. al	0,6-1,3	440	0,1	0-50	Bunsen flame	2014	[91]

Как видно из таблицы 1.5 большинство исследований по определению S_L для метано-водородных смесей проведено при атмосферном давлении ($P_0 = 0,1$ МПа), начальной температуре смеси (T_0) от 298К до 450К, коэффициенте избытка топлива $\phi = 0,6 \dots 1,4$. И только в отдельных работах [105, 114, 153] имеются данные по влиянию давления в диапазоне до 0,75 ... 1,5 МПа, однако в этих работах представлен или узкий диапазон по доле водорода в топливе [105, 153], или ограничен состав ТВС по коэффициенту избытка топлива ϕ [114].

Исследования по сравнению различных кинетических механизмов окисления метано-водородных топлив для прогнозирования нормальной скорости распространения пламени в смеси метан/водород/воздух с экспериментальными данными представлены в работе [124]. Для обеспечения точности и эффективности моделирования авторами было выбрано несколько механизмов окисления углеводородов, включая GRI3.0 [188], Aramco1.3 [161], San Diego [68] и USC2.0 [207]). На рисунке 1.5 представлены результаты моделирования S_L данными механизмами для чистого метана и водорода при нормальных условиях.

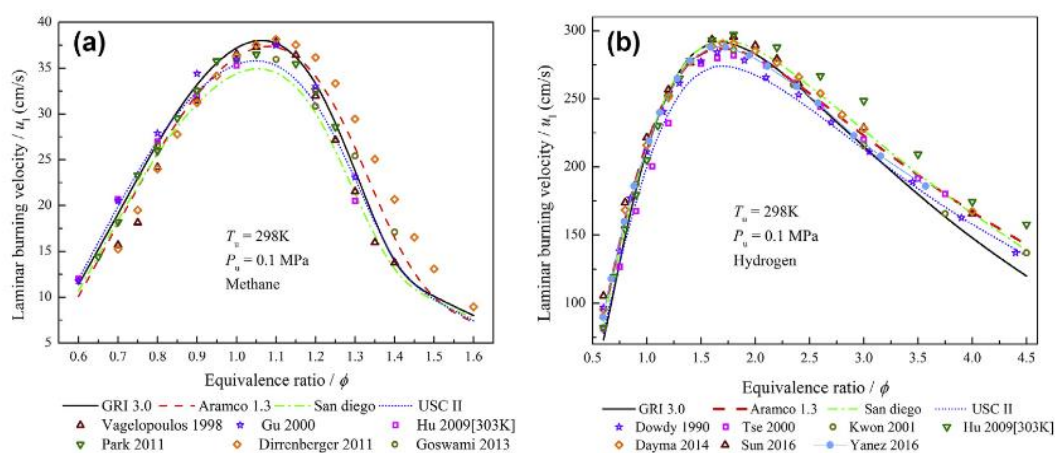


Рисунок 1.5 – Нормальная скорость распространения пламени метана (а) и водорода (б) [124]

Vagelopoulos [203], Gu [95], Hu [113], Park [175], Dirrenberger [78], Goswami [93], Yanez [212], Dowdy [81], Tse [202], Kwon [141], Dayma [75], Sun [197]

Как видно из рисунка 1.5 все 4 механизма дают аналогичные результаты расчета для CH_4 и удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными различных авторов [75, 78, 81, 93, 95, 108, 113, 141, 175, 197, 202, 203, 212]. Небольшие различия наблюдаются в области максимальных значений скорости пламени. Механизмы GRI3.0 и Aramco1.3 показывают максимальные значения $S_L = 37,5$ см/с при $\phi = 1,1$, а механизмы San Diego и USC2.0 при значении $\phi = 1,05$, в последнем случае также на 2-3 см/с ниже максимальное значение нормальной скорости распространения пламени.

Результаты моделирования нормальной скорости пламени водорода показывают хорошее согласование с опытными данными по всем механизмам в стехиометрической и бедной областях ($\phi \leq 1$), а также в богатой области до $\phi = 2,5$. В этом диапазоне составов ТВС небольшое отклонение в сторону занижения максимального значения S_L на 5% наблюдается для расчета по механизму USC2.0. В более богатой области ($\phi > 2,5$) расхождение как между расчетами по отдельным механизмам, так и между опытными данными доходит до 20–30 см/с, что составляет 10–20%.

В целом представленные выше результаты показывают, что нормальная скорость распространения пламени как индивидуальных углеводородов (например CH_4), так и водорода с хорошей предсказательной способностью моделируется с использованием известных и широко применяемых на практике кинетических механизмов GRI3.0 [188], Aramco1.3 [161], San Diego [68] и USC2.0 [207]).

Для метано-водородных смесей результаты тестирования указанных выше 4 механизмов представлены на рисунках 1.6 и 1.7. Для относительно небольших добавок водорода ($R_H = 20\%$) результаты моделирования S_L по всем механизмам дают удовлетворительное согласование с экспериментальными данными, повторяя те же особенности, что и для исследования горения чистого метана (рисунок 1.5a), а именно: механизмы San Diego и USC2.0 показывают заниженное значение максимальной скорости при $\phi = 1,05$, а механизмы GRI3.0 и Aramco1.3 более близкие к опытными данным максимальные величины S_L при $\phi = 1,1$. При увеличении доли водорода ($R_H = 40 - 80\%$) разброс как между расчетами по отдельным механизмам, так и в сравнении с опытными данными доходит до 20–30% в области максимальных значений S_L . Кроме того, из данных, представленных на рисунках, видно, что с увеличением мольной доли водорода в смеси увеличивается скорость пламени, а максимальное значение смещается в сторону более богатой зоны. Таким образом, для моделирования нормальной скорости распространения пламени метано-водородных топлив при

содержании водорода более 20% использование указанных выше традиционных для CH_4 и H_2 кинетических механизмов приведет к большим погрешностям, особенно в области максимальных скоростей пламени по составу смеси. При этом, численные расчеты дают заниженные по сравнению с экспериментом значения S_L (см. рис. 1.7). Авторами работы [149] при использовании механизмов Aramco2.0 и Konnov2018 получены аналогичные результаты, показывающие, что при $R_{\text{H}} > 35\%$ расчет нормальной скорости пламени также оказывается заниженным.

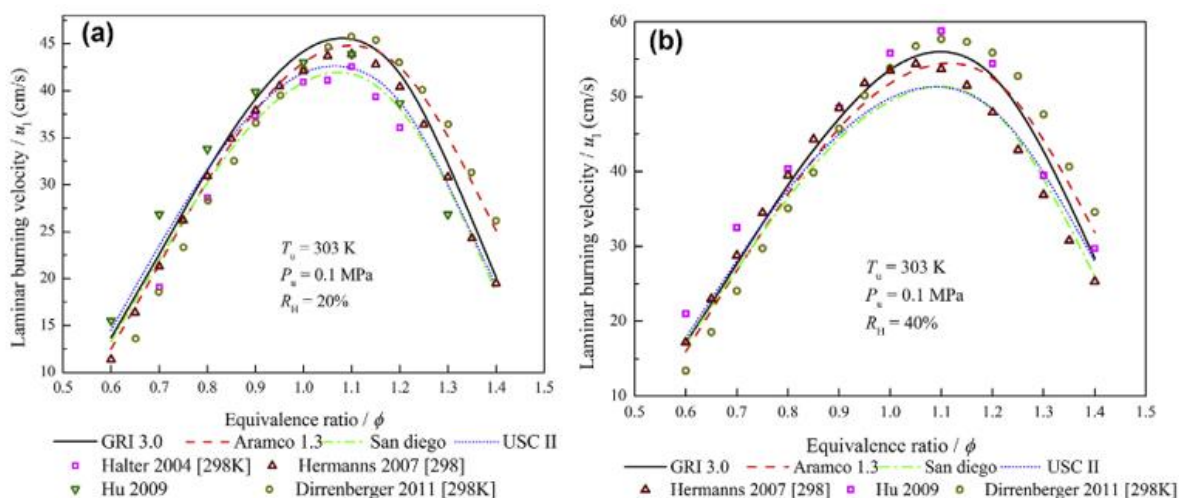


Рисунок 1.6 – Нормальная скорость распространения пламени смеси метан/водород/воздух с концентрацией водорода 20% (а) и 40% (б) [124] Halter [105], Nemanns [108], Hu [113], Dirrenberger [78]

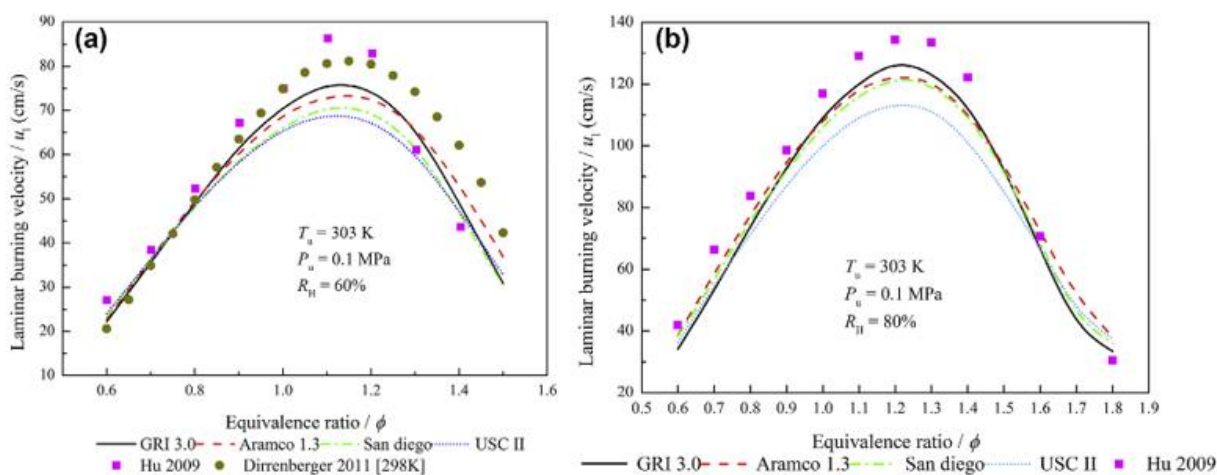


Рисунок 1.7 – Нормальная скорость распространения пламени смеси метан/водород/воздух с концентрацией водорода 60% (а) и 80% (б) [124] Hu [113], Dirrenberger [78]

На рисунке 1.8 показаны результаты обобщения расчетно-экспериментальных исследований (см. рис. 1.5–1.7) по зависимости нормальной скорости распространения пламени от мольной доли водорода (R_H) при нормальных условиях для $\phi = 1,0$, а также для максимальных значений S_L . Для стехиометрического состава (см. рис. 1.8а) при концентрации водорода в топливе до 50% скорость пламени увеличивается сравнительно медленно, практически по линейной зависимости в диапазоне от 35 до 60 см/с. При $R_H = 60 - 80\%$ наступает переходный режим, когда скорость начинает нарастать по квадратичной зависимости и при $R_H = 80\%$ выходит на уровень 100 см/с. При $R_H > 80\%$ наблюдается резкое увеличение S_L и ее максимальное значение достигает почти 300 см/с.

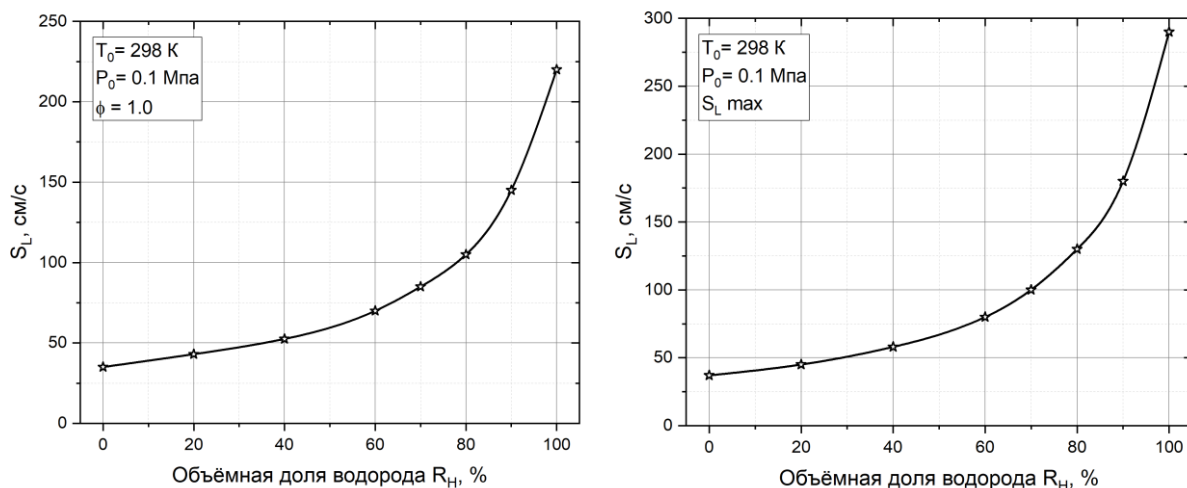


Рисунок 1.8 – Нормальная скорость распространения пламени смеси метан/водород/воздух в зависимости от концентрации водорода для стехиометрии (а) и максимальных значениях (б)

Аналогичные выводы сделаны и в работе [172], где было установлено, что существует три режима распространения пламени для смеси метан / водород / воздух:

- горение с преобладанием метана ($0 < R_H < 50\%$);
- переходный режим ($50\% < R_H < 90\%$);
- ингибирование метаном горения водорода ($90\% < R_H < 100\%$).

Авторами работы [86] также отмечается, что на первом режиме скорость пламени линейно увеличивается с увеличением R_H . А далее начинает возрастать по экспоненциальной зависимости.

В работе [106] установлено, что влияние добавок водорода в метано-водородное топливо на увеличение нормальной скорости распространения пламени более выражено при добавлении водорода в богатую смесь ($\phi > 1,0$), нежели в обедненную ($\phi < 1,0$). Однако, это утверждение верно лишь для режимов, когда доля водорода $R_H > 50\%$.

Так как на основных режимах газотурбинные двигатели и установки работают при повышенных температуре и давлении на входе в камеру сгорания важным направлением исследования является влияние начальной температуры и давления на нормальную скорость распространения пламени при различных концентрациях H_2 в метано-водородном топливе.

В работе [79] представлены исследования характеристик нормальной скорости распространения пламени метано-водородных смесей при повышенных давлениях (до 20 атм.). В данной работе концентрация водорода в топливе R_H изменялась от 0% до 100% для трех фиксированных значений коэффициента избытка топлива $\phi = 0,6; 1,0; 1,4$ (рисунок 1.9). Для всех значений давлений и ϕ скорость пламени возрастает с увеличением доли водорода в топливе. При этом, как отмечалось выше, наиболее сильно этот эффект проявляется при $R_H > 80\%$. С другой стороны, интенсивность увеличения скорости пламени (S_L) при добавлении водорода значительно снижается при более высоком давлении.

Таким образом, представленные результаты исследований показывают, что в настоящее время в полной мере не сформирован универсальный кинетический механизм окисления метано-водородных топлив, использование которого обеспечивает достоверное определение нормальной скорости распространения пламени в широком диапазоне параметров рабочего процесса (температура, давление и состав ТВС) для всего диапазона значений добавок водорода в топливо ($R_H = 0 - 100\%$). Кроме того, имеются

отличия и в представленных различными авторами результатах экспериментов, что не позволяет обоснованно их использовать для валидации разрабатываемых кинетических механизмов

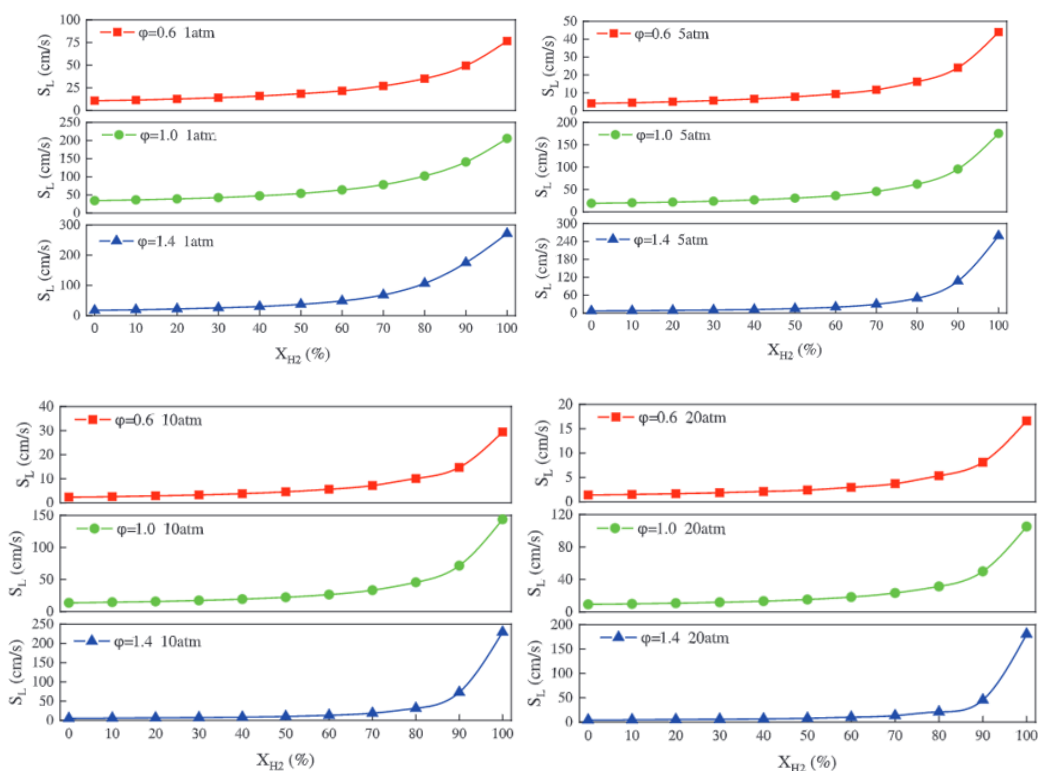


Рисунок 1.9 – Нормальная скорость распространения пламени метано-воздушной смеси в зависимости от концентрации водорода при различных давлениях [217]

1.4 Расчетно-экспериментальные исследования процессов горения метано-водородных смесей в модельных камерах сгорания

Для проведения исследований процессов горения в модельных установках и натурных камерах сгорания широкое применение получили численные методы расчета турбулентных реагирующих потоков [7, 14, 43]. Однако большинство решаемых задач по моделированию рабочего процесса камер сгорания ГТД и ГТУ связано с традиционными углеводородными топливами (природный газ, пропан, керосин, дизтопливо и др.), для которых разрабатывались соответствующие кинетические механизмы, обрабатывались модели воспламенения и распространения пламени, определялись критерии устойчивого горения, формировались механизмы образования

промежуточных и конечных продуктов реакций, в том числе загрязняющих веществ [8, 14, 21, 24, 38, 99]. В свою очередь, как было показано выше, горение метано-водородных смесей обладает рядом особенностей, которые должны быть отражены в разрабатываемых математических моделях. При этом для проверки возможности использования существующих или разрабатываемых моделей качественного описания механизмов сжигания метано-водородных смесей необходимо иметь надежный банк экспериментальных данных по основным параметрам внутрикамерных процессов и выходным характеристикам модельных горелочных устройств и камер сгорания, работающих на данном типе топлив. Важным обстоятельством является и доступность полноценного описания геометрических моделей исследуемых устройств и условий проведения экспериментов, что обычно не полностью представлено в известных литературных источниках.

В современных камерах сгорания газотурбинных двигателей и установок для повышения эффективности рабочего процесса и снижения выбросов вредных веществ (в частности NO_x) реализуется технология горения обедненных, предварительно подготовленных ТВС [8, 9, 85, 102, 103]:

- для авиационных ГТД эта схема обозначается как LPP (Lean Premixed Prevaporized);
- для наземных ГТУ – DLE (Dry Low Emissions) или DLN (Dry Low NO_x).

Эти технологии организации рабочего процесса в КС совмещают процесс горения предварительно подготовленной ТВС в основной зоне (*premix combustion*) и диффузионное горение в центральной пилотной зоне – (*pilot*) [21]. Для подавления выбросов оксидов азота (NO_x) необходимо снижать температуру горения, что достигается за счет сжигания достаточно бедных ТВС, однако при этом обостряется проблема бедного срыва пламени, которая может быть решена за счет добавок водорода в топливо [4]. В тоже время известно, что добавки водорода в исходное углеводородное топливо оказывают значительное влияние в целом на рабочий процесс в КС, в том

числе и на нестационарные явления, такие как отмеченный выше срыв пламени, а также проскок пламени в зону предварительной подготовки ТВС.

Горение предварительно подготовленных метан/водород/воздушных смесей в модельных горелочных устройствах детально рассматривалось в нескольких экспериментальных исследованиях. В работе Cheng [69] изучено влияние добавок водорода в метан на характеристики горения в закрученном потоке, ограниченном кварцевой цилиндрической камерой повышенных начальных температурах. В работах Kim [132, 133] исследовано влияние состава метано-водородного топлива и степени закрутки ТВС на образование и выброс загрязняющих веществ (CO и NO_x), а также форму пламени в следе за горелкой. В работе использовалась модель горелочного устройства с завихрителем и центральным телом. Показано, что увеличение доли H_2 в метано-водородном топливе улучшает стабильность пламени как при низкой, так и при высокой степени закрутки ТВС. Кроме того, показано, что добавление водорода смещает зону реакции, что приводит к увеличению выбросов NO_x при сохранении той же адиабатической температуры, но это компенсируется более бедным сжиганием или более высокой степенью закрутки ТВС. Однако, из-за недостаточного количества исходных данных, в том числе геометрических параметров установок в качестве валидационных, эти задачи рассматриваться не могут.

В работе Guo с соавторами [96] проведено исследование горения предварительно подготовленных метан/водород/воздушных смесей в модельной камере сгорания при нормальных условиях ($T=300\text{K}$, $P=0,1\text{MPa}$). Общая схема экспериментальной установки и фотографии отдельных узлов представлены на рисунке 1.10.

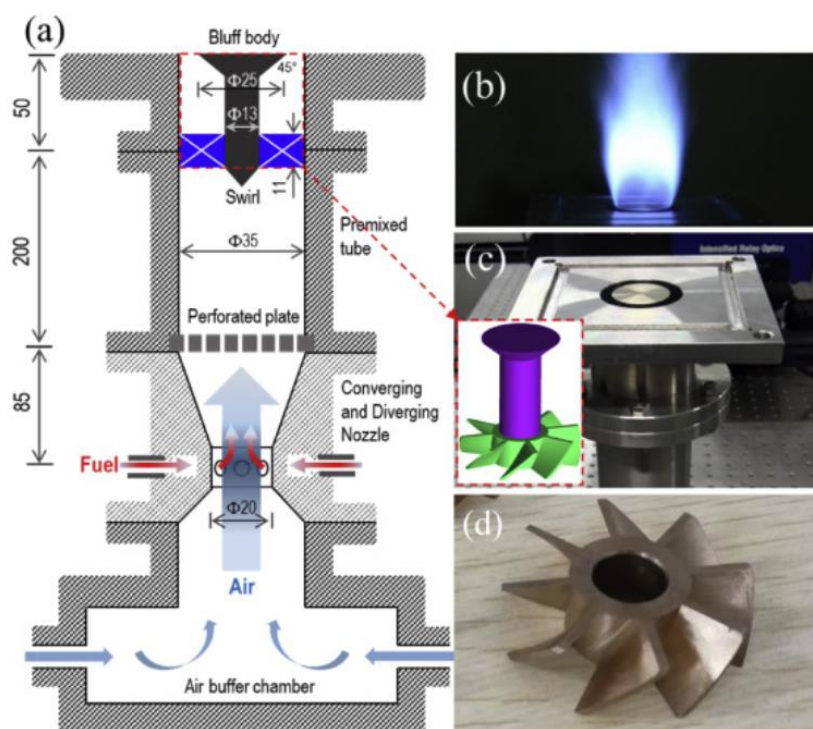


Рисунок 1.10 – Общая схема горелки(a), фотография пламени (b), фотография верхней секции горелки (c), фотография завихрителя (d) [96]

Данная установка применялась для исследования стабилизированных пламен с долей водорода $R_H = 40\%$ и $R_H = 80\%$ в метано-водородной смеси. Экспериментальное оборудование позволяло получать значения скоростей потока и концентраций ОН на выходе из горелочного устройства. Для численного моделирования рассматривалась только последняя секция экспериментальной установки.

В трехмерных численных расчетах использовался подход LES с моделью горения Thickened Flame (TF) [37]. Для описания турбулентной кинетической энергии применяется динамическая подсеточная модель Смагоринского [37]. Для кинетического моделирования используется скелетный механизм GRI, состоящий из 30 компонентов и 177 элементарных реакций, который получен из полноразмерного стандартного кинетического механизма GRI3.0 [188]. В работе показано, что нормальная скорость пламени, рассчитанная по скелетному и полноразмерному механизму GRI3.0, хорошо согласуются для области $\phi \leq 1$ и добавок водорода $R_H = 0; 40; 80\%$. Вместе с тем, в разделе 1.3 настоящей работы было отмечено, что для $R_H > 20-35\%$

расчеты по механизму GRI3.0 дают заниженные по сравнению с опытными данными значения S_L . Тем не менее, результаты проведенного исследования позволяют сравнить структуру пламени, полученную при реализации CFD моделирования со структурой, полученной на основе обработки измерений концентраций ОН лазерно-оптическими методами (PLIF). Эти данные позволяют оценить изменение характера пламени в зависимости от уровня добавки водорода (рисунок 1.11). Проведенный кинетический анализ показывает, что эффективность добавки водорода заключается в ускорении реакций активации – отрыва водорода от метана молекулами ОН и Н.

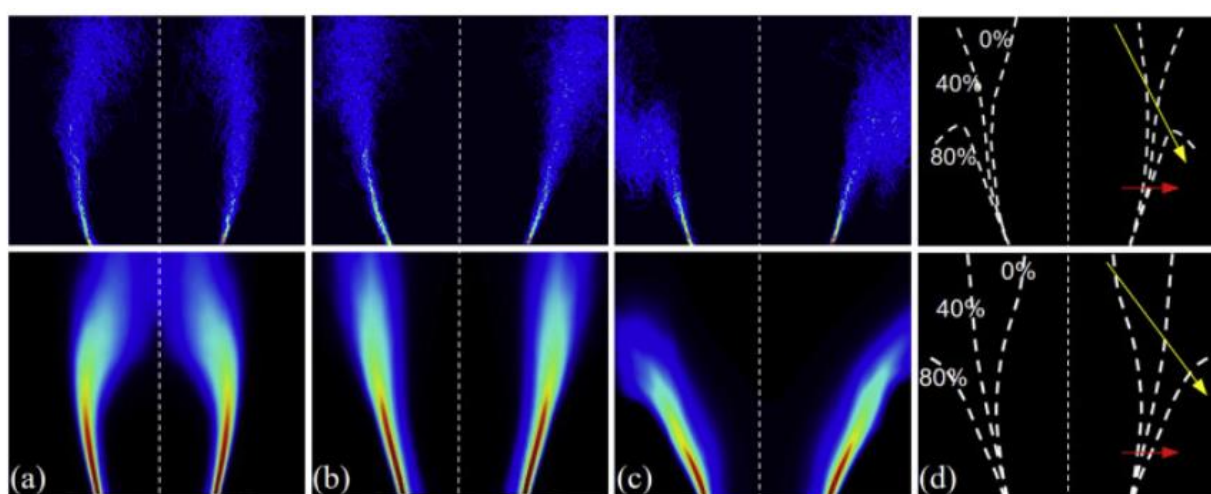


Рисунок 1.11 – Структура факела пламени: сверху - экспериментальные концентрации ОН; внизу - осредненные по времени расчетные значения скорости тепловыделения, (a) $R_H = 0\%$; (b) $R_H = 40\%$; (c) $R_H = 80\%$; (d) $\langle c \rangle = 0,5$ [96]

В работе Imteyaz с соавторами [118] для предварительно подготовленных метан/водород/воздушных смесей выявлены пределы устойчивой работы модельного горелочного устройства при атмосферных условиях в зависимости от доли водорода в топливе (R_H) и числа Рейнольдса (Re). Общая схема разработанной экспериментальной установки представлена на рисунке 1.12. Установка состоит из двух секций: секция смешения, где образуется ТВС и секция с завихрителем, за которой расположена цилиндрическая кварцевая камера сгорания.

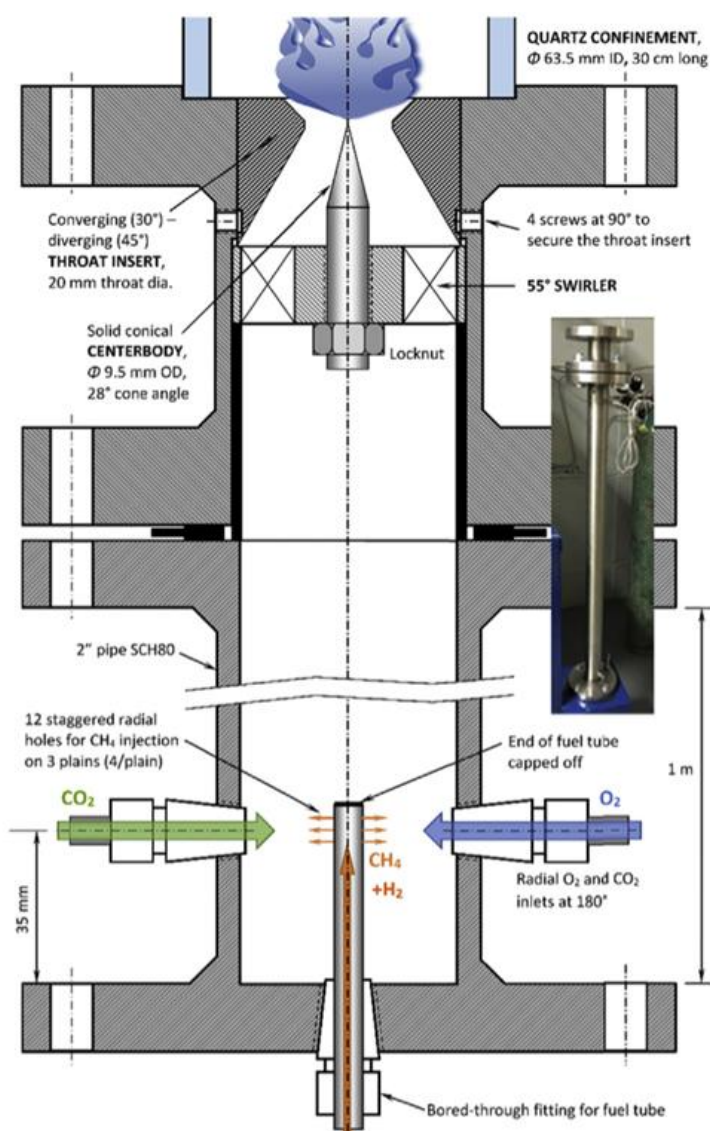


Рисунок 1.12 – Схема экспериментальной установки [122]

Результаты проведенного исследования (рисунок 1.13) показывают, что при увеличении доли водорода в ТВС граница бедного срыва пламени (Blow-out Zone) смещается от уровня по коэффициенту избытка топлива $\varphi = 0,65 - 0,75$ ($\alpha = 1,4 - 1,5$) при $R_H = 0 - 20\%$ до уровня $\varphi = 0,25 - 0,35$ ($\alpha = 2,9 - 4$) при $R_H = 60 - 80\%$, что обеспечивает возможность стабильного горения с более низкими температурами ($T_{пл} = 1300 \dots 1500$ К, при $R_H = 60 - 80\%$). Однако, таким же образом изменяется и граница по проскоку пламени (Flashback Zone). При этом, проскок пламени для $R_H = 60 - 80\%$ наблюдается уже при обедненных смесях $\varphi = 0,80 - 0,95$ ($\alpha = 1,05 - 1,25$).

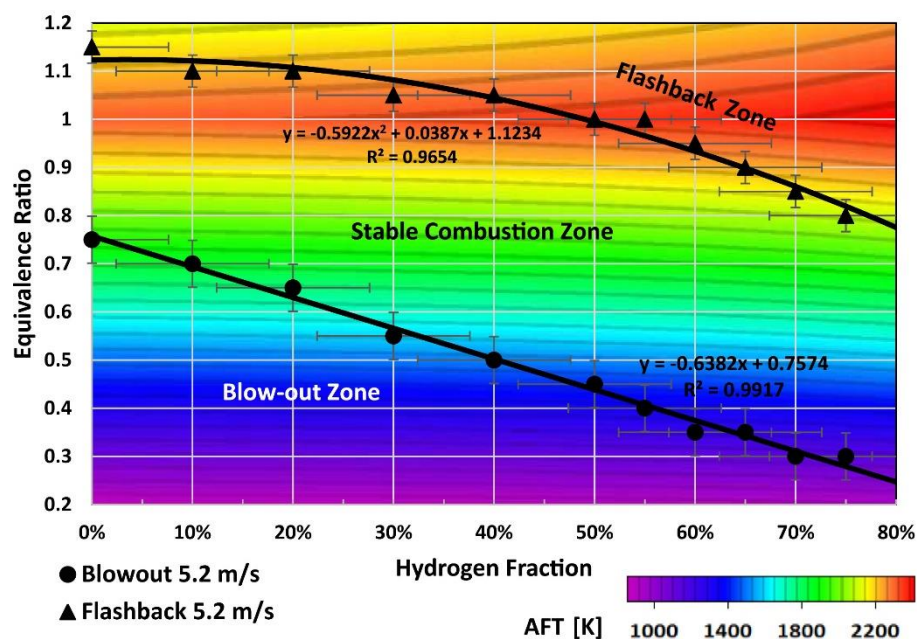


Рисунок 1.13 – Области устойчивого процесса горения и поля адиабатической температуры пламени в зависимости от доли H_2 в топливе при средней скорости потока на срезе сопла 5,2 м/с [122]

Как отмечают авторы причина повышения риска проскока пламени и расширение границы бедного срыва при увеличении доли водорода заключается в росте скорости распространения пламени. При этом, предел бедного срыва представляет почти линейную зависимость и объясняется кинетикой процесса горения, а граница проскока пламени является нелинейной функцией, которая во многом определяется числом Дамкелера.

Численное моделирование

В настоящее время в промышленности предъявляются требования как к точности, так и ко времени моделирования процесса горения в технически сложных устройствах. Традиционно моделирование RANS (усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса) является достаточно распространенным подходом для моделирования процессов смесеобразования и горения в камерах сгорания ГТД и ГТУ из-за относительно низких требований к вычислительным ресурсам. Проведенный обзор работ показал, что:

- для моделирования горения обычно используются модели типа flamelet, такие как метод FGM (Flamelet Generated Manifold). Также могут быть интегрированы PDF функции для учета влияния турбулентности;

- в подходе RANS в качестве модели турбулентности часто используются такие модели как $k - \varepsilon$, $k - \omega$ и RSM;

- подход LES дает более точные результаты, но требует больших вычислительных ресурсов, даже при расчетах модельных задач;

В последнее время становятся доступными гибридные модели RANS и LES, например, модель $k - \omega$ SST-SAS [159, 160]. Используя гибридные модели RANS-LES, можно обойти проблемы стабильности, связанные с LES, и можно использовать большие временные шаги, что снижает необходимые вычислительные мощности и уменьшает время моделирования.

В таблице 1.6 представлены работы некоторых авторов по исследованию метано-водородных смесей с использованием различных моделей горения и турбулентности.

Таблица 1.6 – Исследование метано-водородных смесей с использованием различных моделей горения и турбулентности

Авторы	R_H , %	Геометрия	Модель горения	Модель турбулентности	Кинетический механизм
De et al. [76]	30	Swirl dump combustor	Thickened flame	Dyn. Smagorinsky	Chen mech [76]
Zheng et al. [220]	30	Swirl dump combustor	Eddy dissipation concept	Turbulent SGS kinetic energy	PoliMi [83]
Perez et al. [109]	20	Round jet flow	Presumed conditional moment	-	Tabulated chemistry
Abdel-Raheem et al. [45]	100	Bluff body	Dynamic flame surface density	Smagorinsky	Global reaction ($L_c=1$)

В работе [165] проводились численные исследования горелок DLE 3 поколения на базе SGT-800 с использованием программного продукта CFX 14.5. Данная статья направлена на изучение возможностей модели $k - \omega$ SST-SAS по сравнению со стандартной моделью $k - \omega$ SST при моделировании

горения для частично предварительно смешанных метано-водородо-воздушных смесей в горелке Siemens DLE 3-го поколения. Целью работы являлось исследование способности физических моделей уловить изменения в глобальных характеристиках пламени из-за обогащения водородом, таких как положение пламени, форма пламени и общий перепад давления.

Были изучены три различные смеси с обогащением метана водородом 0%, 60% и 80%. В этом исследовании применяется подход URANS. Кинетический механизм, использованный для расчета *flamelet*, представлял собой схему C1-C4, предоставленную в CFX-RI. Также учитывается ламинарная скорость пламени для всех смесей, рассчитанная в Cantera с кинетическим механизмом Люнга и Линдстедта [146]. Скорость ламинарного пламени показана на рисунке 1.15

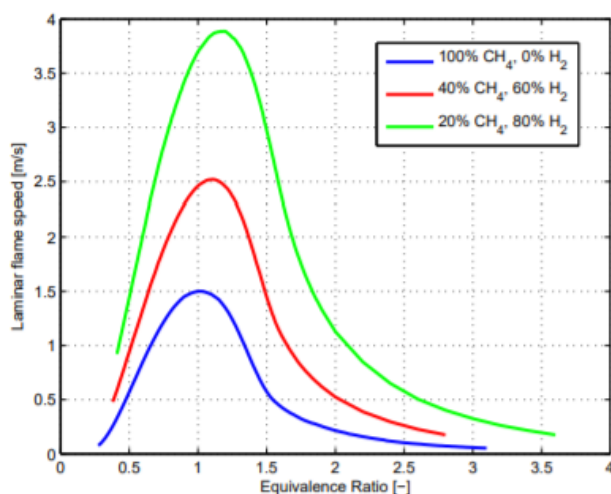


Рисунок 1.15 – Нормальная скорость распространения пламени от коэффициента избытка топлива для различного содержания водорода

При моделировании метана были оценены две модели турбулентности: $k-\omega$ SST и $k-\omega$ SST-SAS. Было обнаружено, что последняя модель предсказывает результаты, хорошо согласующиеся с данными измерений. Динамическое поведение пламени лучше описывается моделью SST-SAS, чем стандартной моделью SST. Для моделирования метана, обогащенного водородом, использовалась проверенная модель SST-SAS с калиброванной константой для средней скорости реакции.

В работах [85, 101-103] также исследуется принцип сжигания водородных смесей в камерах сгорания с низким выбросом окислов азота (DLN). Этот принцип горения основан на перекрестном перемешивании воздуха и газообразного водорода, который вступает в реакцию с множеством микропламен диффузионного типа. Основными преимуществами организации такого принципа горения являются малая вероятность проскока пламени и низкие выбросы NO_x из-за очень короткого времени пребывания реагентов в области микропламени. В данных работах анализировали влияние различных вариаций геометрических параметров на структуру пламени и выбросы NO_x . Было выполнено численное моделирование для различных вариаций горелки, чтобы оценить результирующее поле потока, структуру пламени и выбросы NO_x .

Моделирование процесса горения водорода основано на модели, включающей в себя одностадийную реакцию горения водорода, рассчитывающую скорость реакции с помощью гибридной модели горения EBU (Eddy Break Up), описанной в [84], и объединяет скорость реакции, управляемую турбулентным перемешиванием, и скорость химической реакции. Скорость реакции, обусловленная турбулентным перемешиванием, рассчитывается с помощью формулировки модели горения EBU, которая предполагает, что реагенты сжигаются непосредственно после смешивания. Термическое образование NO рассматривается с применением расширенного механизма Зельдовича.

Работа [87] посвящена исследованию диапазона устойчивости горения с предварительным смешением при применении различных топливных смесей. Исследования были проведены в условиях атмосферного давления. Пламя стабилизировалось в закрученном потоке топливно-воздушной смеси (в осевом завихрителе с шестью лопатками) и внезапным расширением. Топливные смеси были приготовлены в смесительной установке. В данной работе исследовались топлива со следующими объемными концентрациями: 100CH_4 ; $90\text{CH}_4:10\text{H}_2$; $75\text{CH}_4:25\text{H}_2$; $50\text{CH}_4:50\text{H}_2$.

На рисунке 1.16 приведены зависимость диапазонов устойчивости пламени от содержания водорода в топливной смеси для различных конфигураций горелок.

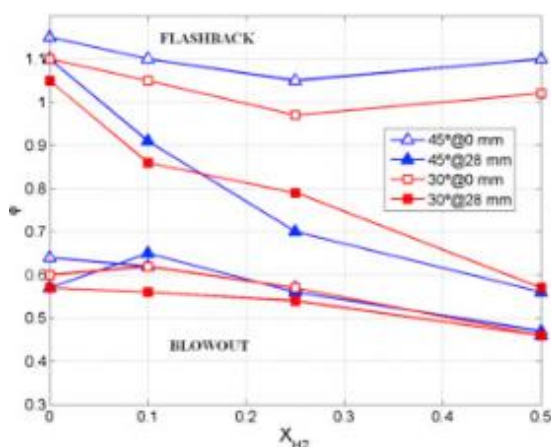


Рисунок 1.16 – Зависимость диапазонов устойчивости пламени от содержания водорода в топливной смеси для различных конфигураций горелок [87]

Исследование показало, что:

- 1) добавление водорода смещает диапазон устойчивости в область более бедных соотношений коэффициента избытка воздуха по сравнению с чистым метаном. Конфигурация горелки оказывает сильное влияние на диапазоны устойчивости, особенно на распространение пламени внутрь горелки (проскок пламени). Использование топлива с высоким процентным содержанием водорода приводит к более узкому диапазону устойчивости, чем при использовании чистого метана (особенно при расположении вставки на $d=28\text{мм}$);
- 2) как правило, при использовании топлива с высоким содержанием водорода увеличивается вероятность распространения пламени внутрь горелки при коэффициентах избытка воздуха, при которых чистый метан показывает стабильное горение;
- 3) использование топлива с высоким содержанием водорода может вызвать высокие пульсации давления, связанные с проскоком пламени, что может вызвать повреждение камеры сгорания;

4) увеличение содержания водорода может вызывать более высокие пульсации давления по сравнению с чистым метаном. Кроме того, необходимо отметить, что характеристическая (собственная) частота пульсаций пламени меняется в зависимости от состава топлива. В случае больших отклонений от основного режима для стабильного пламени чистый метан также демонстрирует более высокие колебания давления.

В работе [89] проводились исследования по влиянию нормальной скорости распространения пламени при горении предварительно подготовленной топливовоздушной МВС. В работе с результатами экспериментальных исследований сравнивались расчеты с использованием двух кинетических механизмов: механизм Чена [76], который включает 6 реакций и 10 компонентов, и механизм POLIMI, который включает 37 реакций и 12 компонентов [83]. Структура пламени, рассчитанная с использованием механизма Чена, сильно отличается от полученной при экспериментальных исследованиях, что показано на рисунке 1.23. Предполагаемая причина этого - завышенное значение скорости ламинарного пламени. При использовании механизма POLIMI структура пламени более схожа с экспериментальными результатами, представленное исследование показывает важность точного описания химии горения при моделировании.

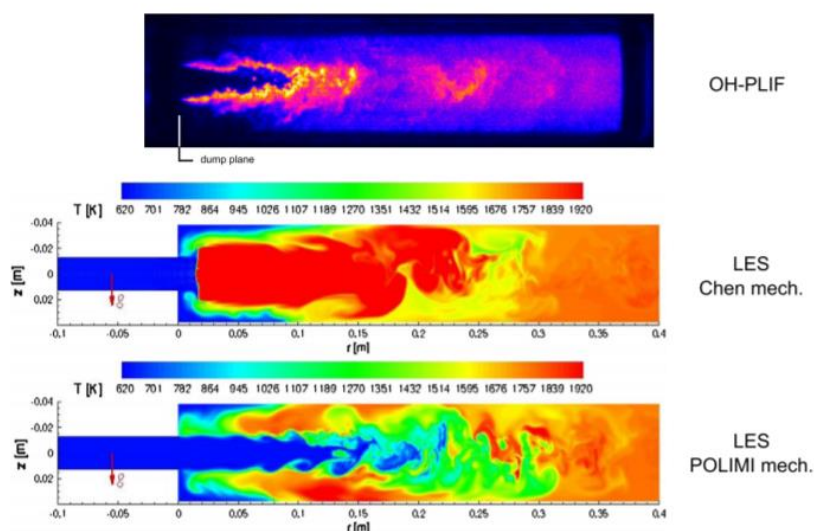


Рисунок 1.17 – Влияние нормальной скорости распространения пламени на структуру пламени при использовании различных кинетических механизмов

Моделирование горения метан-водородных смесей с использованием подхода LES выполнено в работах [119-121], верификационные данные для используемых моделей взяты из экспериментальной работы [122], описанной ранее. В данных работах показано, что использование LES подхода позволяет отслеживать изменение фронта пламени при добавках водорода, что также показано в работах [98, 100]. Так же в работе [121] подход LES использован для расчета границы бедного срыва пламени, получено хорошее согласование с экспериментальными данными. Расчетно и экспериментально получено, что добавка водорода позволяет расширить рабочий диапазон устойчивой работы по границе бедного срыва пламени. Однако явление проскока пламени при добавках водорода в указанных статьях не исследовано.

Приведенный обзор показывает существующие проблемы, возникающие при использовании МВС в реальных камерах сгорания и их элементах [155]. Большинство прикладных работ сосредоточено на использовании подхода RANS, тогда как подход LES все еще используется для разовых расчетов или академических исследований, поскольку требует существенных вычислительных мощностей.

Обзор доступных литературных источников показал, что на данный момент единой методики, позволяющей численно определять проскок пламени метан-водородных смесей, не существует, так как в расчетах не учитывается изменение скорости распространения ламинарного пламени при различных составах топлива. Поэтому в данной работе необходимо разработать методику с учетом изменения скорости распространя пламени для метан-водородного топлива с содержанием водорода до 100%.

Также нет возможности использовать экспериментальные данные по проскоку пламени, приведенные в вышеописанных статьях, в виду отсутствия детальной информации по геометрическим моделям, точному составу окислителя, режимных параметров. Данные обстоятельства обуславливают необходимость создания модельной установки для исследования проскока пламени.

Заключение по первой главе

В первой главе рассмотрены работы, посвященные исследованию горения метано-водородного топлива. Выявлено, что для широкого внедрения метано-водородного топлива в камеры сгорания авиационных ГТД и ГТУ различной мощности необходимо решить целый ряд проблем:

- 1) разработать комплекс мероприятий, связанных с безопасной эксплуатацией установок, работающих на метано-водородном топливе;
- 2) разработать надежные системы сжигания, способные работать с высокими концентрациями водорода;
- 3) разработать детальную методику расчета и оценки возможности проскока пламени на различных режимах работы авиационных ГТД и ГТУ;
- 4) накопить достоверную базу данных по скорости распространения пламени, величине задержки воспламенения H_2 и другим параметрам, на режимах, близких к натурным.

Также актуальным становится вопрос формирования собственной базы экспериментальных данных при сжигании предварительно подготовленных метано-водородо-воздушных смесей.

Обзор доступных литературных источников показал, что на данный момент единой методики, позволяющей численно определять проскок пламени метано-водородных топлив, не существует, так как в расчетах не учитывается изменение скорости распространения ламинарного пламени при различных составах топлива. В результате анализа опубликованных работ были сформулированы цель и задачи исследования.

Цель работы: Повышение точности определения границ проскока пламени при горении метано-водородного топлива на этапе предварительного проектирования камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок.

Задачи работы:

1. Создание комплекса экспериментальных установок и моделей для исследования механизмов горения метано-водородных и водородных топлив,

обеспечивающих проведение работ с водородосодержащими газовыми смесями в соответствии с требуемыми нормативами безопасности.

2. Разработка и валидация математической модели нормальной скорости распространения метано-водородного пламени в зависимости от температуры, давления и состава смеси.

3. Разработка и валидация метода определения границ проскока пламени при горении предварительно-подготовленных метано-водородо-воздушных смесей в горелочных устройствах с закруткой потока.

4. Расчетно-экспериментальное исследование проскока пламени при сжигании метано-водородного топлива в модельной и полноразмерной камерах сгорания.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И СТЕНДЫ

В соответствии с поставленными задачами исследования и в связи с необходимостью валидации разрабатываемых методик численного моделирования границ устойчивой работы камер сгорания ГТД и ГТУ при использовании метано-водородного топлива в рамках данной работы модернизирован стенд научно-образовательного центра газодинамических исследований Самарского университета им. Королева [97-100, 118, 156-158, 222]. Разработаны и модернизированы специальные экспериментальные установки и модели для измерения нормальной скорости распространения пламени, границ устойчивой работы в модельной камере сгорания.

Объектами исследования являлись модельная горелка с плоским ламинарным пламенем для определения нормальной скорости распространения пламени (горелка Heat Flux), установка для определения проскока пламени с вихревой горелкой и модельная индивидуальная КС.

2.1 Доработка экспериментального стенда для исследования метано-водородного топлива

Для проведения экспериментальных работ с применением водородосодержащих топлив необходимо обеспечить ряд специфических требований, связанных с особенностями физико-химических свойств водорода (таблица 1.2).

Эти свойства формируют требования и определяют методики проведения эксперимента, организации работ при проведении испытаний, техники безопасности, подготовительных работ, а также подбор соответствующего оборудования.

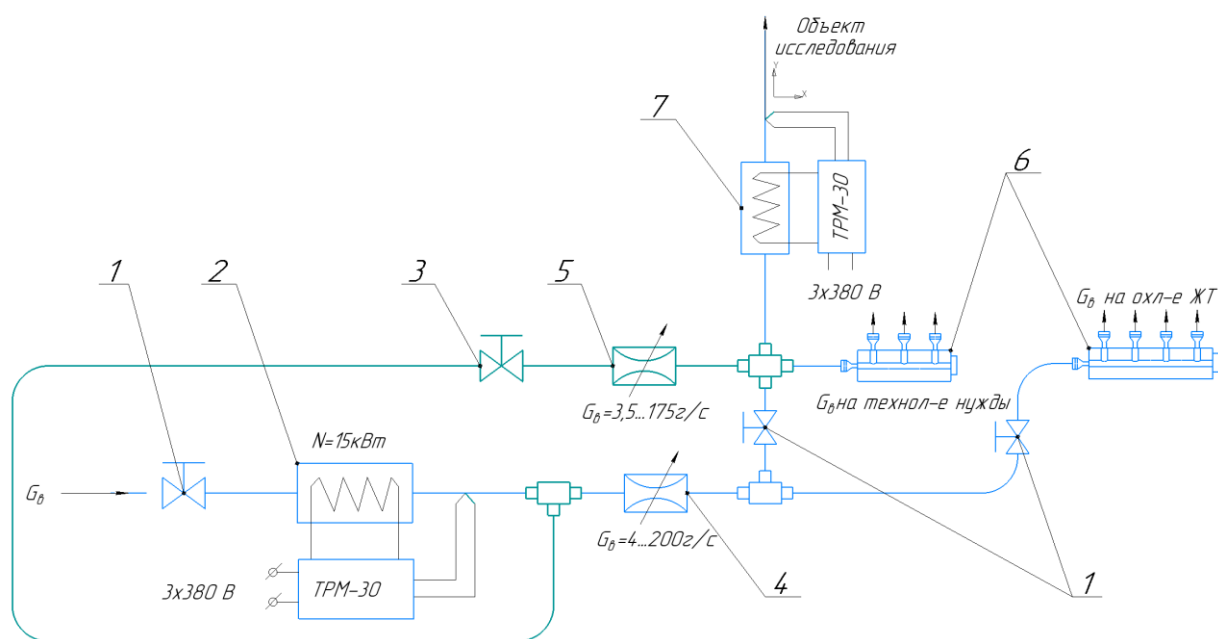
Были проведены работы, включающие модернизацию и доработку следующих позиций:

- воздушной магистрали;
- топливной магистрали;
- помещения стенда и сопутствующих площадей.

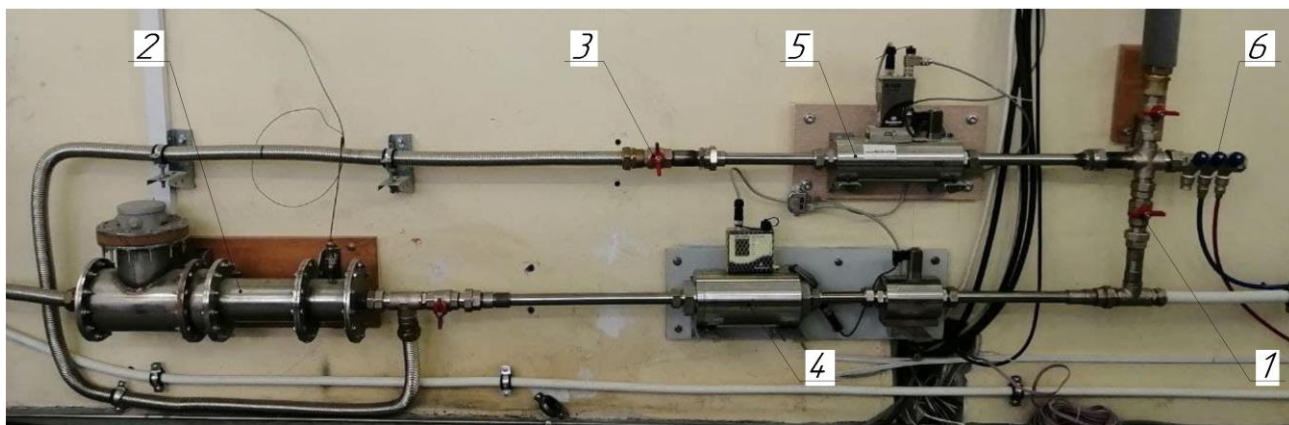
2.1.1 Воздушная магистраль

С целью увеличения расхода воздуха была выполнена врезка в магистраль низкого давления компрессорной станции Самарского университета им. Королева (2 компрессора с максимальным давлением до 7-8 атм и производительностью $8 \text{ м}^3/\text{мин}$ (160 г/с) каждый). Для очистки воздуха были установлены магистральные фильтры Dali CAF-14-2 и осушитель рефрижераторного типа Dali CAAD-13.5.

Для распределения воздуха на два независимых контура – контура с системой подогрева для горелочного устройства (ГУ) (первый контур) и дополнительного контура охлаждения (второй контур) – была разработана магистраль подготовки и подачи воздуха (рисунок 2.1). Первый контур имеет возможность совместной и независимой работы двух воздушных расходомеров с массовым расходом воздуха $G_B=4..200\text{г/с}$ и $G_B=3,5..175\text{г/с}$ вплоть до полного отключения одного из них. Второй контур отвечает за подачу расхода воздуха на охлаждение жаровой трубы через воздушный расходомер с расходом $G_B=3,5..175\text{г/с}$. При использовании только компрессора, установленного непосредственно в помещении стенда, максимально возможный расход воздуха составляет $0,14 \text{ кг/с}$.



a)



б)

1 – шаровый кран; 2 – предварительный подогреватель воздуха; 3 – отсечной вентиль 2-го контура подачи воздуха; 4 – воздушный расходомер ($G_v=4..200\text{г/с}$); 5 – воздушный расходомер ($G_v=3,5..175\text{г/с}$); 6 – коллекторы для отбора воздуха; 7 – основной подогреватель воздуха

Рисунок 2.1 – а) Схема и б) фото разработанной магистрали подготовки и подачи воздуха

Для обеспечения требуемых условий эксплуатации расходомера по точности измерения температура воздуха на входе в него должна быть в диапазоне $20..25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому в системе подачи воздуха был спроектирован и установлен предварительный подогреватель 2 (рисунок 2.1б), в состав которого входит нагревательный элемент фирмы Leister (Швейцария) мощностью $N=15\text{кВт}$ и система автоматической регулировки для поддержания заданной температуры. Общий вид нагревательного элемента показан на рисунке 2.2.

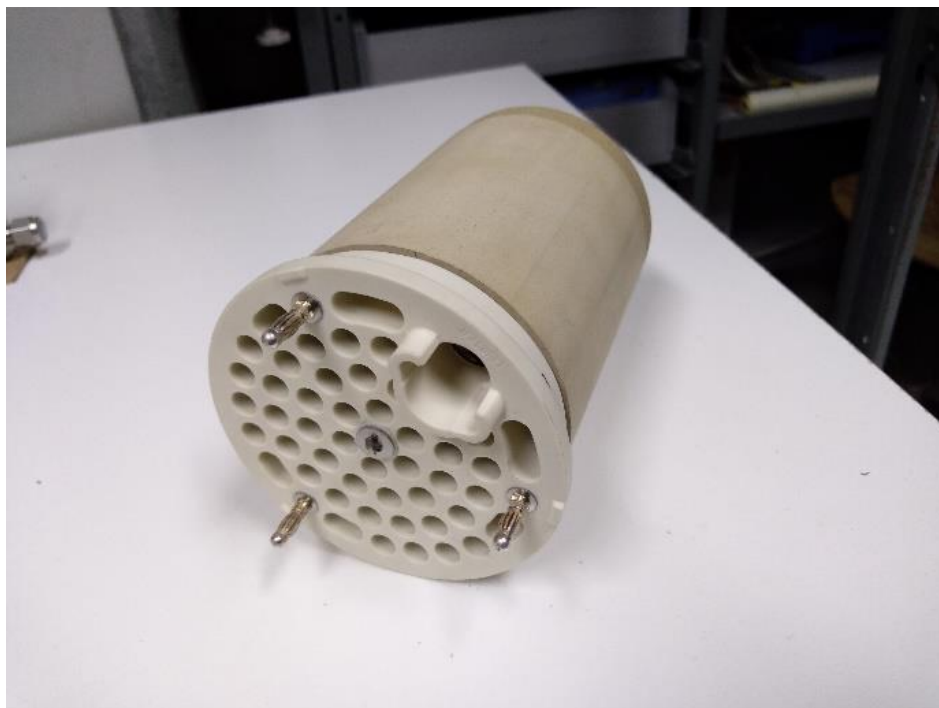


Рисунок 2.2 – Общий вид нагревательного элемента фирмы Leister (Швейцария) мощностью 15 кВт

2.1.2 Топливная система

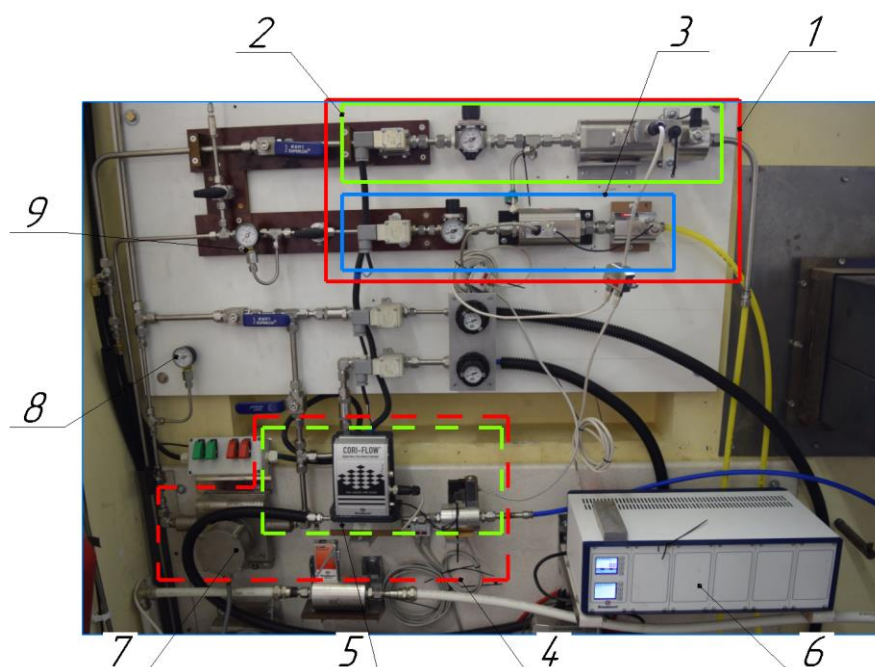
Для выполнения экспериментальных исследований была частично доработана уже имеющаяся магистраль подачи природного газа (разделена на два независимых контура подачи), а также разработана и смонтирована магистраль подачи газообразного водорода, состоящая также из двух независимых контуров.

Системы топливоподачи включают в себя:

- хранилище для баллонов (рисунок 2.3, а);
- рампу с креплениями и требуемыми фитингами, в которую входят запорная арматура, редуктор и огнепреградительный клапан;
- магистраль подачи топлива;
- участок подачи, регулирования и измерения расхода топлива по контурам (рисунок 2.3, б).



а)



1 – система управления расходами для водородной магистрали; 2 – система регулирования и подачи H_2 в основной контур (0,092...4,6 г/с); 3 – система регулирования и подачи H_2 в пилотный контур (0,02...1 г/с); 4 – система управления расходами для магистрали подачи природного газа; 5 – кориолисовый расходомер-регулятор CH_4 основного контура подачи топлива (0,12...6 г/с); 6 – блок питания и управления расходомерами; 7 – тепломассовый расходомер CH_4 подачи топлива (0,03...1,5 г/с); 8 – манометр магистрали природного газа; 9 – манометр водородной магистрали

б)

Рисунок 2.3 – Элементы системы топливоподачи: а) газовое хранилище, б) панель управления расходами водорода и метана

Система подачи природного газа (или метана)

Система подачи природного газа включает в себя газохранилище из четырех баллонов объемом по 40 литров каждый и рабочим давлением до 100 бар, соединенных в одну магистраль. Рабочее давление объясняется особенностями заправки баллонов. Расчетное значение массы природного газа в одном баллоне составляет примерно 2,5 кг. В магистрали природного газа установлен подогреватель для обеспечения постоянной температуры подаваемого в магистраль газа и редуктор, понижающий давление до 8 бар (рисунок 2.4).

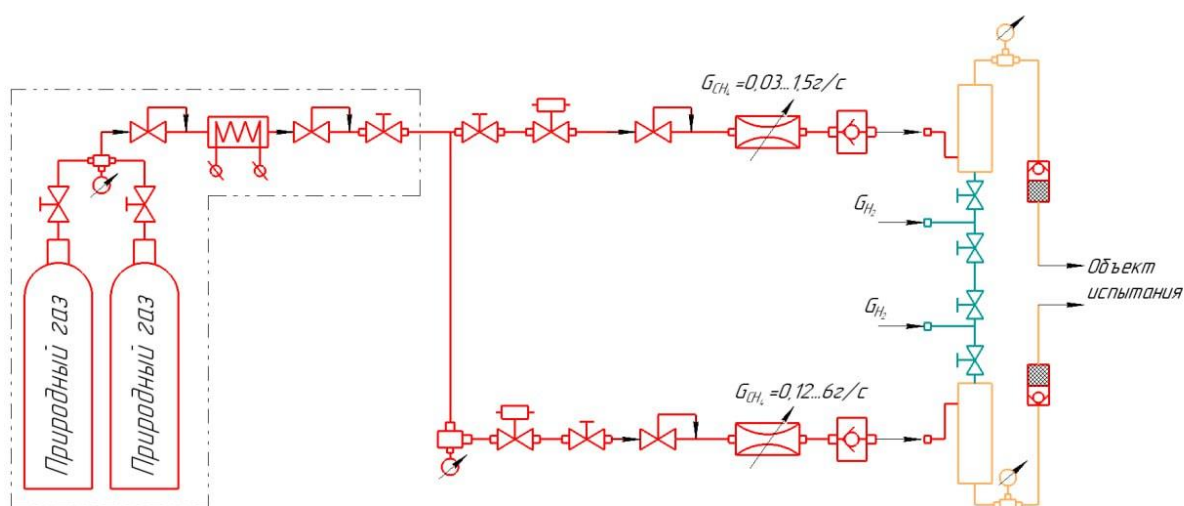


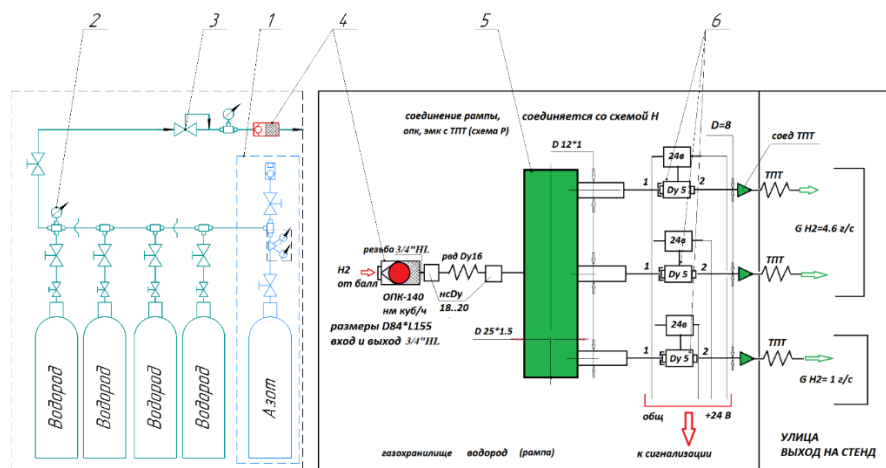
Рисунок 2.4 – Схема подачи природного газа (метана)

Магистраль подводит природный газ из газового хранилища в помещение стенда, где располагается система регулирования расходов для магистрали подачи природного газа 4 (рисунок 2.3 (б)). Магистраль подачи природного газа доработана для независимой подачи и регулировки расхода природного газа по двум независимым контурам подачи топлива – в пилотный и основной контур. Каждый из контуров оснащен электромагнитным клапаном, регулятором давления и расходомерами. Для пилотного контура предусмотрено использование тепломассового расходомера 7 с диапазоном регулирования $G_T = 0,03..1,5$ г/с, а для основного контура – расходомера кориолисового типа 5 с $G_T = 0,12..6,0$ г/с.

Система подачи водорода

Система подачи водорода включает в себя водородную рампу, которая состоит из восьми баллонов, соединенных в единую магистраль. Объем одного баллона 50 л с рабочим давлением до 200 бар. При таких параметрах максимальное значение массы H_2 в одном баллоне составляет примерно 0,75 кг. На рисунке 2.5 схематично показаны все элементы топливной рампы, расположенной в хранилище.

В соответствии с техникой безопасности магистраль оборудована системой продувки инертным газом 1, которая состоит из баллона со сжатым азотом (N_2), крана и обратного клапана для предотвращения попадания воздуха при сбросе давления из рампы. На водородной магистрали последовательно установлены: манометр 2, редуктор 3 и огнепреградительный клапан 4, после которого водород поступает в коллектор 5. После каждого выхода из коллектора располагаются электромагнитные клапаны 6, которые соединены с системой сигнализации, расположенной в помещении бокса и пультуовой.



- 1 – система продувки инертным газом; 2 – магистральный манометр;
 3 – редуктор; 4 – огнепреградительный клапан; 5 – топливный коллектор;
 6 – электромагнитный клапан

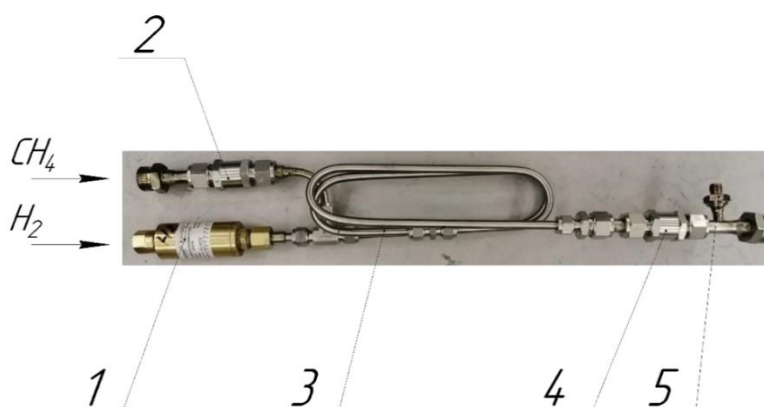
Рисунок 2.5 – Схема подачи водорода

В помещении стенда находятся система управления расходами для водородной магистрали 1 (рисунок 2.3 (б)). Организация подачи и регулирования водорода включает в себя 2 контура. Каждый из контуров

разветвляется и выходит на систему регулирования и подачи H_2 в основной контур 2 (0,092...4,6 г/с) и систему регулирования и подачи H_2 в пилотный контур 3 (0,02...1 г/с). Система подачи топлива позволяет заменять используемые расходомеры в каждом контуре в зависимости от требуемых диапазонов для объекта испытаний.

Система подготовки метано-водородных смесей

После расходомеров по гибким рукавам высокого давления (РВД) топливо (водород и метан (или природный газ)) поступает в смеситель (рисунок 2.6), который представляет из себя трубку из нержавеющей стали с внутренним диаметром 6 мм (позиция 3) длиной 1 м (что соответствует 166 калибрам), в которую через тройник подводятся H_2 и CH_4 (или природный газ). На контуре подачи водорода установлен огнепреградительный клапан 1, для контура CH_4 предусмотрен обратный клапан 2. После прохождения участка смешения метано-воздушная смесь проходит через обратный клапан 4. Затем на участке 5 производится замер температуры и давления (место замера избыточного давления размещается дальше по потоку, на коллекторе подачи топлива), после чего топливная смесь поступает в соответствующий контур горелочного устройства.



- 1 – огнепреградительный клапан; 2 – обратный клапан $Dy=8\text{мм}$;
 3 – смесительный участок $Dy=6\text{мм}$ ($L=1\text{м}$); 4 – обратный клапан;
 5 – штуцер замера температуры

Рисунок 2.6 – Участок смешения с системой защитных клапанов

2.1.3 Обеспечение безопасности стенда

Для обеспечения безопасного проведения работ с водородосодержащими топливами были выполнены следующие мероприятия:

1) разработана инструкция по технике безопасности при работе с водородом и метано-водородной смесью, которая включает в себя следующие подразделы:

- транспортировка,
- хранение,
- проведение экспериментов,
- регламентные работы после проведения эксперимента;

2) для предотвращения распространения пламени по водородной магистрали были подобраны и установлены огнепреградительные клапаны (рисунок 2.7), расположение которых в топливной системе показано на рисунке 2.5 (поз. 4), каждый из клапанов обеспечивает производительность до $42 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (примерно 1 г/с) при давлении на входе 10 бар;

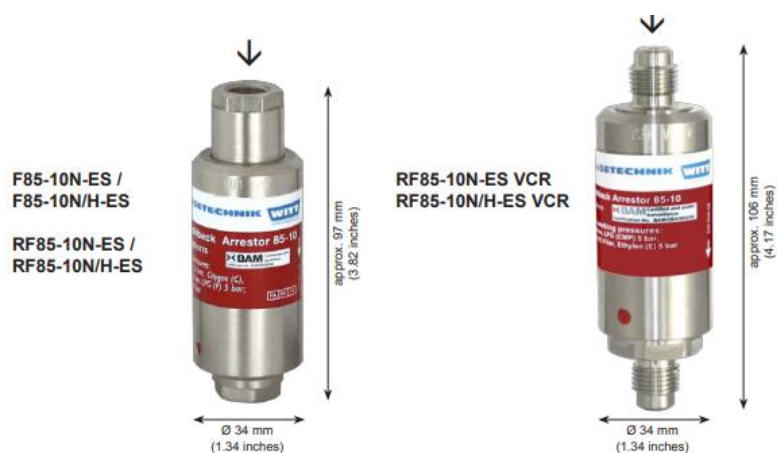


Рисунок 2.7 – Огнепреградительные клапаны

3) для контроля воздуха в помещениях стенда установлена система сигнализации (рисунок 2.8) по предельно допустимой концентрации (ПДК) компонентов, которая состоит из следующих элементов:

- блок управления сигнализации (БУС) «UNИКА» на 4 датчика (2 шт.),
- датчик «WPD/MOS» на метан 24В (2 шт.),
- датчик «WPD/MOS» на водород 24В (4шт.),
- датчик «WPD/MOS» на угарный газ 10-30В (2 шт.);



а)

б)

в)



г)

Рисунок 2.8 – Пульт управления системой сигнализации (а);
 смонтированные в помещениях датчики сигнализации CO (б, в), CH₄ и H₂ (г)

4) в соответствии с требованиями по технике безопасности были выполнены сверления в потолке стенда для естественной вентиляции и предотвращения скопления летучих газов в помещении испытательного бокса (рисунок 2.9 г), кроме того, учитывая расширенные концентрационные пределы воспламенения смеси водорода с воздухом (4...75% об) и, соответственно, повышенные риски формирования взрывоопасных смесей, в

системе подачи водорода предусмотрена продувка магистралей (до и после проведения испытаний) нейтральным газом (азотом).

При превышении предельно допустимой концентрации по каждому отдельно взятому компоненту система сигнализации автоматически перекрывает электромагнитные клапаны как в газохранилище (позиция 6, рисунок 2.5), так и на щите подачи и регулирования газового топлива (CH_4 и H_2).

В таблице 2.1 представлено сравнение систем стенда до модернизации и после проведения всех мероприятий для подготовки стенда к испытаниям горелочных устройств на метано-водородном топливе. В таблице приняты сокращения ВПИ – верхний предел измерений; ИВ – измеряемая величина (показания).

Таблица 2.1 – Параметры модернизированного стенда для исследования горелочных устройств и модельных КС на метано-водородном топливе

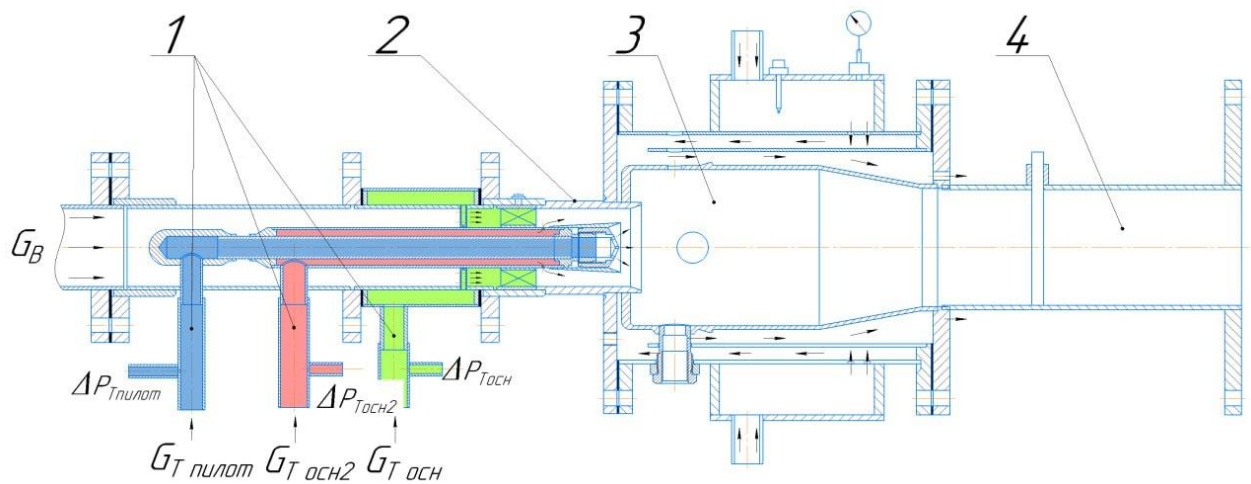
	До модернизации		После модернизации	
	Значение	Точность	Значение	Точность
Массовый расход воздуха, $G_{\text{в}}$, г/с	130	1,0% от ВПИ	350	1% от ВПИ
Массовый расход CH_4 (или природного газа), G_{CH_4} , г/с	0,03...1,5	0,5% от ВПИ	0,12...6	2,00% от ИВ
			0,03...1,5	0,5% от ВПИ
Массовый расход водорода, G_{H_2} , г/с	отсутствовал	отсутствовал	0,02...1	0,5% от ИВ + 0,1% ВПИ
			0,092...4,6	1% ВПИ

2.2 Разработка конструкции модельной камеры сгорания

Разрабатываемый объект (модельная камера сгорания) должен обеспечить возможность проведения экспериментальных исследований процессов горения метано-водородных топлив для получения новых опытных данных по влиянию состава ТВС (в том числе доли водорода в топливе), скорости потока, температуры на входе в объект, конструктивных особенностей горелочных устройств КС на устойчивость процесса горения (проскок пламени и срыв пламени) и других характеристик модельной КС, а также данных для верификации используемых в численных расчетах математических моделей, которые в дальнейшем будут рекомендованы для

определения характеристик полноразмерных КС, работающих на метано-водородном топливе. Данная камера является прототипом используемых малоэмиссионных камер сгорания с предварительной подготовкой смеси в перспективных авиационных газотурбинных двигателях и энергетических установках.

В состав модельной камеры сгорания входят: участок подвода и распределения топлива по трем контурам 1, горелочное устройство 2, цилиндрическая жаровая труба с конвективной системой охлаждения 3, выходной участок 4 (рисунок 2.9).



- 1 – участок подвода и распределения топлива по трем контурам; 2 – горелочное устройство; 3 – цилиндрическая жаровая труба с конвективной системой охлаждения;
4 – выходной участок

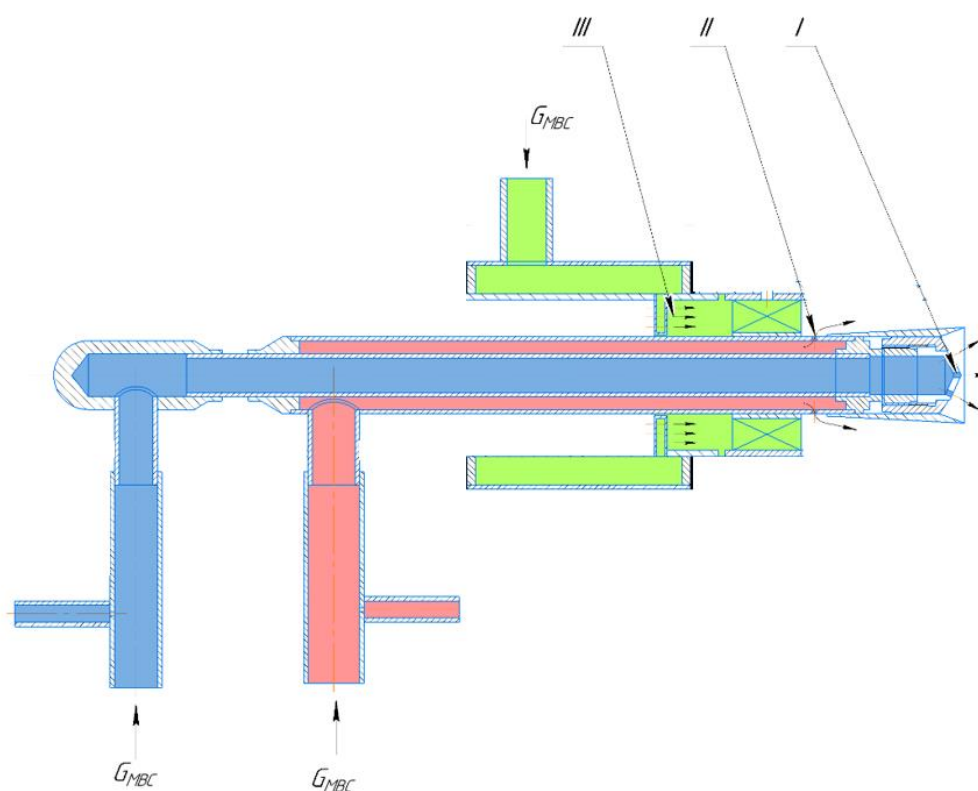
Рисунок 2.9 – Схема модельной камеры сгорания для исследования процессов горения метано-водородных топлив

Участок подвода и распределения топлива

Участок подвода топлива является сменным и содержит 3 контура, что позволяет организовывать подачу топлива в пилотную зону (диффузионный режим горения), а также в две зоны предварительной подготовки ТВС. Это позволяет исследовать различные законы распределения топлива в следе за

лопатками воздушного завихрителя. Участок состоит из нескольких составных частей:

1) центрального тела, выполняющего роль плавного разделителя набегающего воздушного потока, через которое осуществляется подвод топлива по двум контурам: в диффузионный (пилотный) контур горелки и в зону предварительной подготовки ТВС в следе за завихрителем ГУ (рисунок 2.10);



I – подача топлива в пилотный контур; II – радиальная подача топлива;

III – подача топлива в основной контур

Рисунок 2.10 – Центральное тело

2) топливного коллектора (3 контур), в который подается метано-водородная смесь и поступает к топливным патрубкам, установленным перед лопатками завихрителя ГУ (рисунок 2.11а).

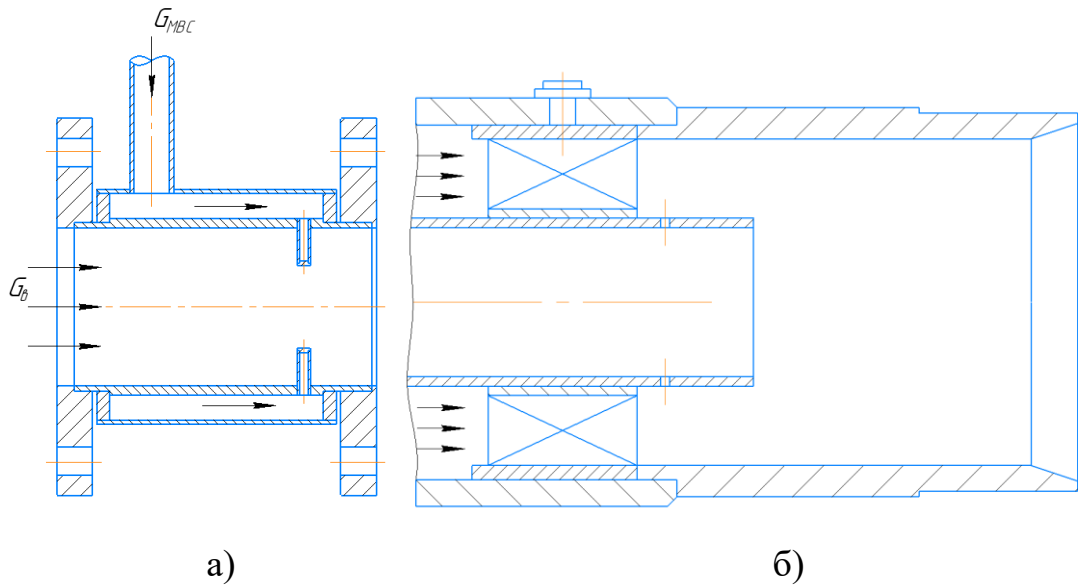
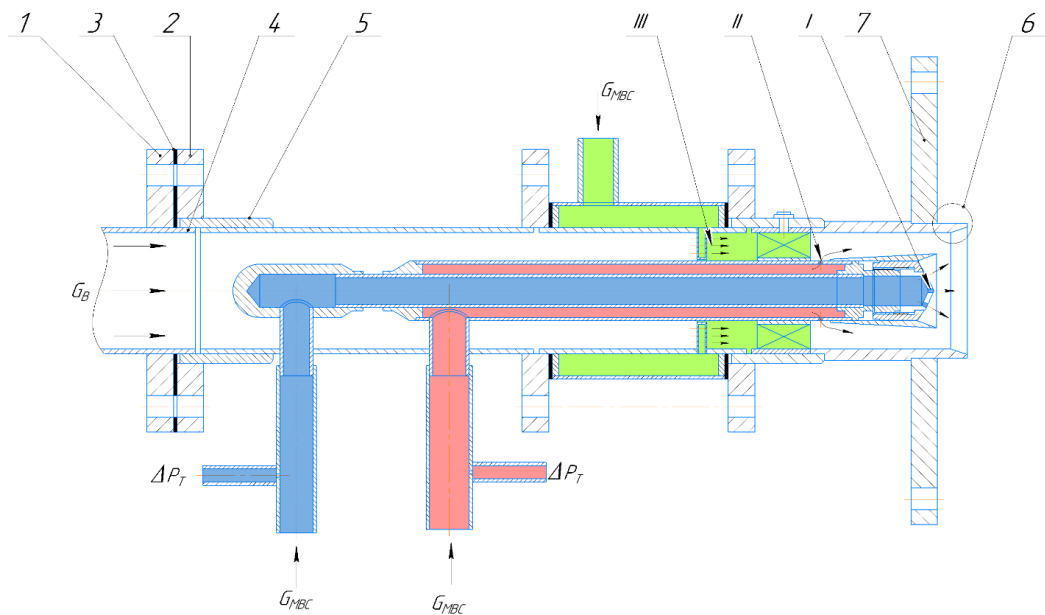


Рисунок 2.11 – а) Участок подвода топлива и б) завихритель
Горелочное устройство с осевым завихрителем

В состав горелочного устройства (рисунок 2.11б) входит сменный завихритель с углом установки лопаток 55° и цилиндрический корпус.

Общий вид ГУ в сборе показан на рисунке 2.12.



- 1 – выходной фланец мерного участка; 2 – входной фланец корпуса участка подвода топлива;
 3 – прокладка (паронит); 4 – корпус мерного участка; 5 – корпус участка подвода топлива;
 6 – посадочное место для жаровой трубы; 7 – выходной фланец ГУ;
 I – подача топлива в пилотный контур; II – радиальная подача топлива;
 III – подача топлива в основной контур

Рисунок 2.12 – Схема горелочного устройства

Жаровая труба

Ужесточение требований к сокращению сроков проектирования и доводки ГТД приводит к необходимости поиска новых технологических решений, позволяющих выполнить поставленные требования. Одним из возможных путей решения данной проблемы может быть использование метода селективного лазерного сплавления (СЛС).

Технология селективного лазерного сплавления (СЛС) – процесс объединения материала с целью создания объекта из данных-модели слой за слоем на платформе построения. Изготовление жаровой трубы выполнено на технологической установке SLM 280HL в «Лаборатории аддитивных технологий» Самарского университета им. Королева. Суммарное время печати составило около 13,5 часов.

Жаровая труба выполнена из жаропрочного материала типа Вж159 и состоит из цилиндрического участка внутренним диаметром 70 мм и длиной 142 мм. В жаровой трубе нет отверстий охлаждения, что исключает подмешивание холодного воздуха в проточную часть и его влияние на экологические характеристики КС. Схема жаровой трубы представлена на рисунке 2.13.

Затем ЖТ подвергается механической обработке для обеспечения требуемых посадочных поверхностей (посадка на выходной участок из горелочного устройства на входе и выходная поверхность для стыковки с ответной поверхностью по фланцу). С обеих сторон жаровой трубы предусмотрены зазоры для компенсации теплового расширения (1,5 мм на выходе из жаровой трубы и 3 мм со стороны горелочного устройства).

На рисунке 2.14 (а) приведена выращенная заготовка для жаровой трубы и та же модель после механической обработки 2.14 (б).

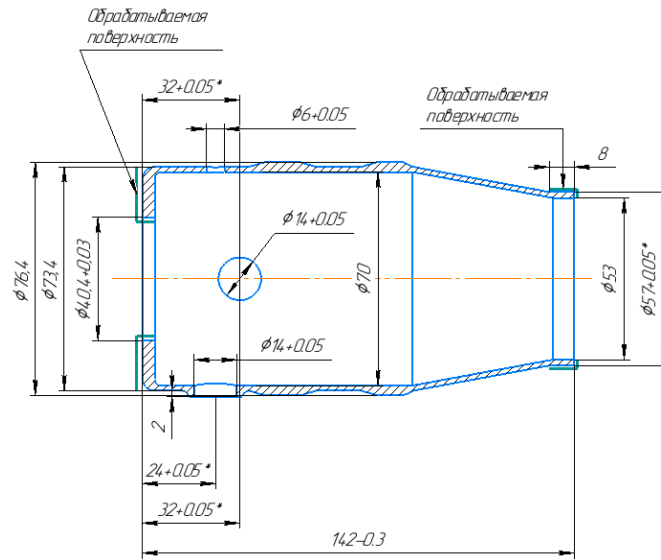


Рисунок 2.13 – Схема жаровой трубы

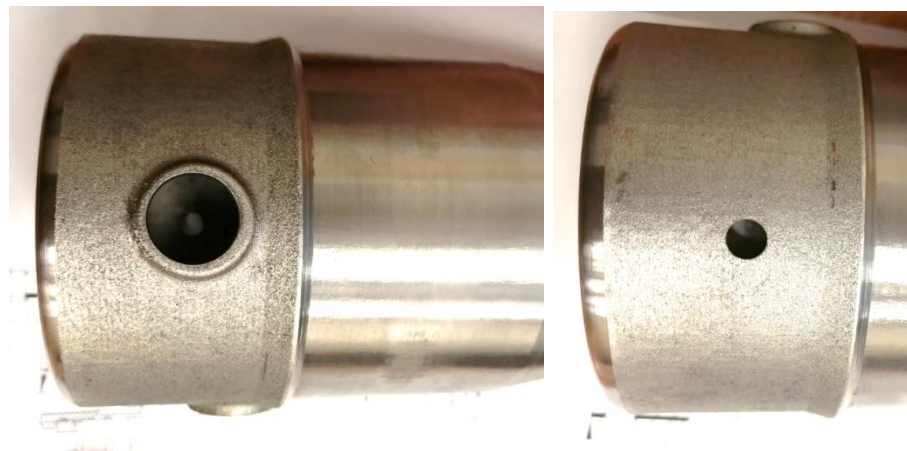


Рисунок 2.14 – а) Жаровая труба, выращенная методом СЛС, и б) после обработки

Система охлаждения

Система охлаждения состоит из ресивера, в который подается охлаждающий воздух, разделителя потоков (проставка формирующая газодинамические обводы для протекающего воздуха) и системы измерения параметров воздуха на входе и выходе. Данный тип охлаждения формирует конвективный способ охлаждения наружной стенки жаровой трубы и далее выходит в атмосферу через сверления, выполненные в замыкающем фланце.

Выходной участок

Выходной участок представляет из себя трубу с фланцевыми соединениями и штуцерами для определения выходных параметров продуктов сгорания.

Конструкция горелочного устройства позволяет установить к выходному фланцу горелочного устройства проставку с кварцевой трубой для визуального наблюдения и фото/видео фиксации процессов сгорания МВС различного состава.

Кварцевая труба размером диаметром 80 мм и длиной 400 мм изготовлена из кварцевого стекла, физические характеристики которого представлены в таблице 2.2. Максимальная рабочая температура кварцевой трубы составляет 1150 °С.

Таблица 2.2 – Физические характеристики кварцевого стекла

Наименование параметра	Значение параметра
Плотность	$2,2 \times 10^3 \text{ кг / м}^3$
Твердость	570KHN100
Предел прочности на разрыв	$4,8 \times 10^7 \text{ Па (N / м}^2\text{)}$
Прочность на сжатие	$> 1,1 \times 10^9 \text{ Па}$
Коэффициент теплового расширения	$5,5 \times 10^{-7} \text{ см/см}^\circ\text{C}$
Теплопроводность	$1.4 \text{ W / м}^\circ\text{C}$
Удельная теплоемкость	$660 \text{ J / кг}^\circ\text{C}$
Точка начала размягчения	1630 °С
Точка начала деформации	1180 °С

Модельная камера сгорания в сборе с жаровой трубой из кварцевого стекла представлена на рисунке 2.15а. Модельная камера сгорания с металлической жаровой трубой после сборки и подключения всех измерительных систем представлена на рисунке 2.15б



а)



б)

Рисунок 2.15 – Модельная камера сгорания в сборе
а) с жаровой трубой из кварцевого стекла,
б) с металлической жаровой трубой

Схема замера и система измерения параметров модельной камеры сгорания

На рисунке 2.16 приведена схема замера давлений, температур и других параметров потока по тракту модельной камеры сгорания при работе в атмосферных условиях. Замеры проводились на мерном участке, в топливной системе, системе охлаждения и выходном участке. Список измерительного оборудования состоит из 19 элементов, названия, замеряемые параметры и основные характеристики которых приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Список измерительного оборудования и замеряемые параметры

№	Участок	Обозначение	Измеряемая величина	Наименование прибора	Диапазон измерения	Погрешность измерения
1	2	3	4	5	6	7
1	Мерный участок (без давления/с давлением)	F001	G _B	M16210986C	3,5...175 г/сек	1% от ИВ
2		P001 (без давления)	P _{ст}	ПД200-ДД 0,04-155-0,1-2-Н	0...40 кПа	0,1% от ВПИ
		P001 (с давлением)	P _{ст}	ОВЕН ПД100И-ДИО,4-111-0,25-Ехi	0...0,4 МПа	0,25% от ВПИ
3		T001	T _{му}	ТП ХК (L) Т49/4	-50...600°С	до 300°С (±0,7+0,005·t) от 300 до 600°С (±1,5+0,01·t)
4	Топливная система	F101	G _{H2}	F-201CV-10K-AAD-22-V	0,002...0,1 г/сек	0,5% от ИВ + 0,1% от ВПИ
5		F102	G _{CH4}	M55-RGD-44-0-S + F-012AI-ПУ-44-V	0,12...6 г/сек	1% от ВПИ
6		F103	G _{H2}	F-201CV-5K0-AAD-22-V	0,0002...0,01	0,5% от ИВ + 0,1% от ВПИ
7		F104	G _{CH4}	F-112AC-m10-AGD-55-V	0,03...1,5	0,5% от ИВ + 0,1% от ВПИ
8		P002	P _{ст_мвс1кон.}	ОВЕН ПД100И-ДИО, 4-111-0,25-Ехi	0...0,4 МПа	0,25% от ВПИ
9		P003	P _{ст_мвс2кон.}	ОВЕН ПД100И-ДИО, 4-111-0,25-Ехi	0...0,4 МПа	0,25% от ВПИ
10		T002	T _{мвс1кон.}	ТХА (К) 1199/84	-40...+800°С	до 300°С (±0,7+0,005·t)
11	T003	T _{мвс2кон.}	ТХА (К) 1199/84	-40...+800°С	до 300°С (±0,7+0,005·t)	

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3	4	5	6	7
12	Система охлаждения	F002	G _{в_охл}	D-6391-FGD-F9-SV-99-D-S-DF/003BI	4...200 г/сек	1% от ИВ
13		P004	P _{ст_вх_охл}	ОВЕН ПД100И-ДИО,6-111-0,25-Exi	0...0,6 МПа	0,25% от ВПИ
14		P005	P _{ст_вых_охл}	ОВЕН ПД100И-ДИО,4-111-0,25-Exi	0...0,4 МПа	0,25% от ВПИ
15		T004	T _{вх_охл}	ТХК (L) T49/4	-40...600°C	до 300°C (±0,7+0,005·t) от 300 до 600°C (±1,5+0,01·t)
16		T107	T _{вых_охл}	ТХА (K) 0003.6-(2x0,3)-2000 ХА, 1кл.	0...1000°C	до 375°C (±1,5) от 375 до 1000°C (±0,004·t)
17	Выходной участок	P101 (без давления)	P _{ст}	ПД200-ДД 0,04-155-0,1-2-Н	0...40 кПа	0,1% от ВПИ
18		P101 (с давлением)	P _{ст}	ОВЕН ПД100И-ДИО,4-111-0,25-Exi	0...0,4 МПа	0,25% от ВПИ
19		T202	T _{пс}	ТПР (В)	600...1700°C	от 600 до 1700°C (±0,025·t)

Из таблицы 2.3 следует, что стендовые системы обеспечивают необходимую точность определения основных параметров [28].

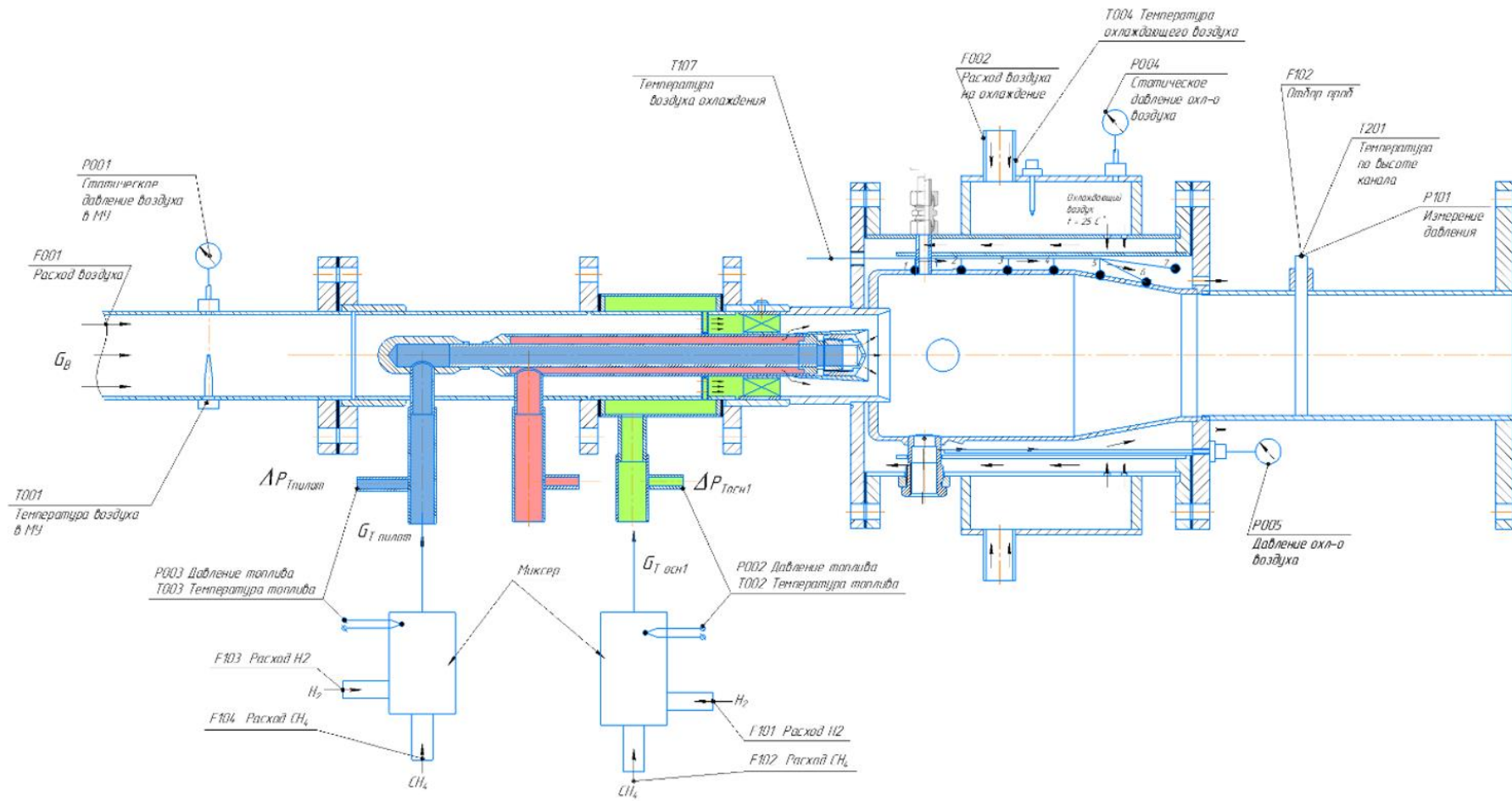


Рисунок 2.16 – Схема измерения параметров модельной камеры сгорания

2.3 Установка для измерения нормальной скорости распространения пламени

Одними из важнейших параметров процесса горения являются: ламинарная скорость горения S_L (или нормальная скорость распространения пламени). Применительно к метано-водородным смесям в настоящий момент имеется недостаточное количество достоверных данных по S_L для широкого диапазона добавок водорода, состава ТВС, начальных температур. Вышеперечисленные опытные данные необходимы для валидации разрабатываемых кинетических механизмов окисления метано-водородных смесей и разработки математических зависимостей S_L от параметров процесса горения (температуры, давления, состава ТВС) для их использования в CFD моделировании. Для проведения исследований по определению нормальной скорости распространения пламени метано-водородных смесей в настоящей работе был применен метод нулевого теплового потока, реализованный в научно-образовательном центре газодинамических исследований Самарского университета им. Королева на установке Heat Flux, которая подробно описана в работах [118, 156, 157, 222]. Данный метод реализован в ведущих лабораториях мира по исследованию фундаментальных процессов при горении углеводородных и альтернативных топлив и считается наиболее достоверным и надежным [59, 60, 73, 78, 118, 136, 139, 156, 157, 172, 222].

Установка Heat Flux дает возможность определить нормальную скорость распространения пламени газообразных, испаренных жидких топлив и состоит из следующих основных систем:

- системы подачи, измерения расхода и испарения жидкого топлива (или смеси топлив);
- системы подачи, измерения расхода газообразного топлива (или смеси топлив);
- системы подачи, измерения расхода окислителя (воздуха или смеси азота и кислорода);

- специальной горелки для сжигания испаренных жидких и газообразных топлив (горелка Heat Flux);
- системы стабилизации температуры корпуса горелки Heat Flux и топливовоздушной смеси на входе в горелку.

Общий вид установки Heat Flux для определения нормальной скорости распространения пламени показан на рисунке 2.17.

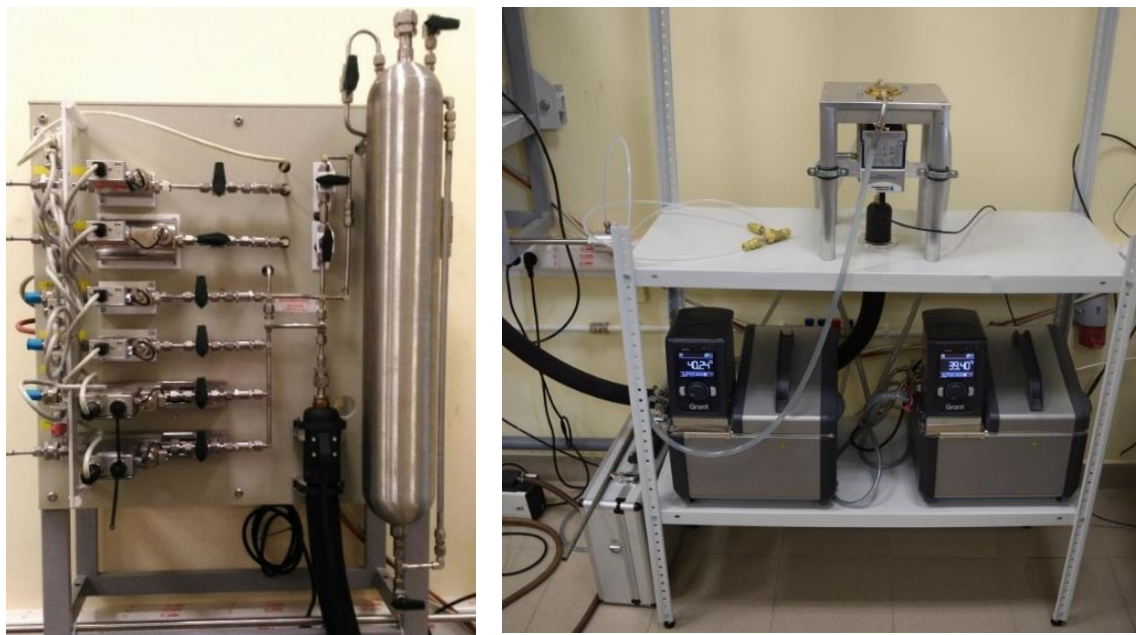


Рисунок 2.17 – Общий вид установки Heat Flux

Главным элементом экспериментальной установки Heat Flux является перфорированная горелка, которая обеспечивает:

- сжигание топливовоздушной смеси заданного состава;
- контроль распределения температуры на горелочной пластине;
- поддержание необходимой температуры газовой смеси и горелочной пластины.

На рисунке 2.18 представлен общий вид горелки.

Горелочная плита имеет отверстия диаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, выполненные в сотовом порядке. Горелочная плита имеет следующие геометрические характеристики:

- диаметр выходного сечения горелки 0,03 м;
- расстояние между осями отверстий $0,75 \cdot 10^{-3}$ м;

- площадь сопла Лавая на выходе из горелки составляет $F_{горелки} = 6,89 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

- толщина горелочной плиты $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

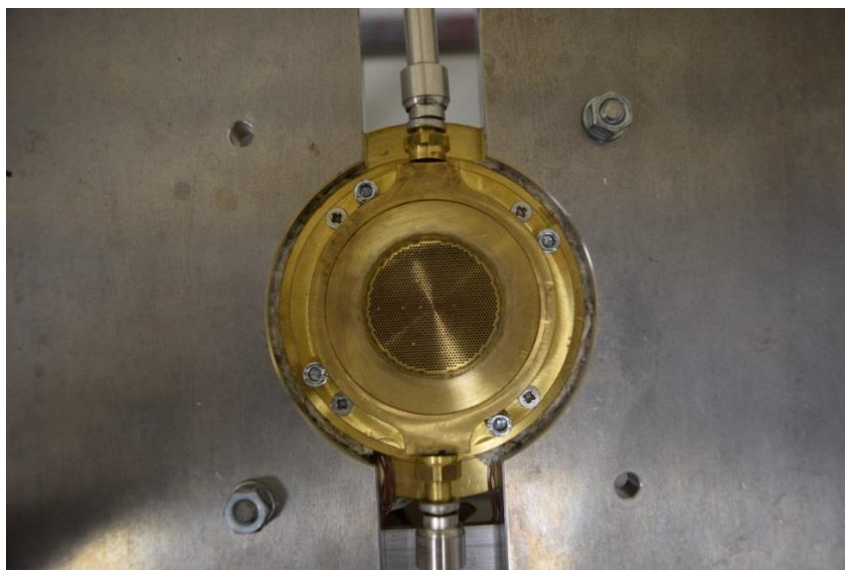


Рисунок 2.18 – Общий вид специализированной горелки Heat Flux

В специализированной горелке Heat Flux вставлены 8 термопар, сигнал с которых поступает на блок чтения показаний термопар и далее на персональный компьютер (ПК).

Температура топливоздушной смеси поддерживается на участке от смесителя до специализированной горелки Heat Flux с помощью обогреваемой линии с системой термостатирования, а для поддержания температуры корпуса специализированной горелки Heat Flux с ресивером используются бани с синтетическим маслом.

Подача осушенного окислителя (воздуха) к горелке Heat Flux производится от компрессора низкого давления через систему фильтрации. Подача газообразного топлива осуществляется из 40-литровых баллонов с давлением до 200 атм.

Подробное описание установки Heat Flux и методика проведения эксперимента представлены в работе [24].

В данной работе установка модернизирована для возможности проведения экспериментальных работ на чистом водороде и метано-

водородных смесях. Была подключена водородная топливная система с обеспечением датчиков безопасности, указанных в разделе 2.1.3.

2.4 Установка по определению границы устойчивой работы

Для исследования границ устойчивой работы модельной камеры сгорания при горении метано-водородного топлива была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка по определению бедного срыва и проскока пламени. Экспериментальная установка состоит из типичных элементов для проведения исследований, связанных с огневыми испытаниями: системы подачи и подготовки воздуха, системы подачи топлива, системы смешения, камеры сгорания, приборов для контроля параметров газового потока. Эксперимент происходит при атмосферном давлении, при этом на выходе из модели была установлена кварцевая труба для возможности визуализации процесса горения. Принципиальная схема камеры сгорания представлена на рисунке 2.19.

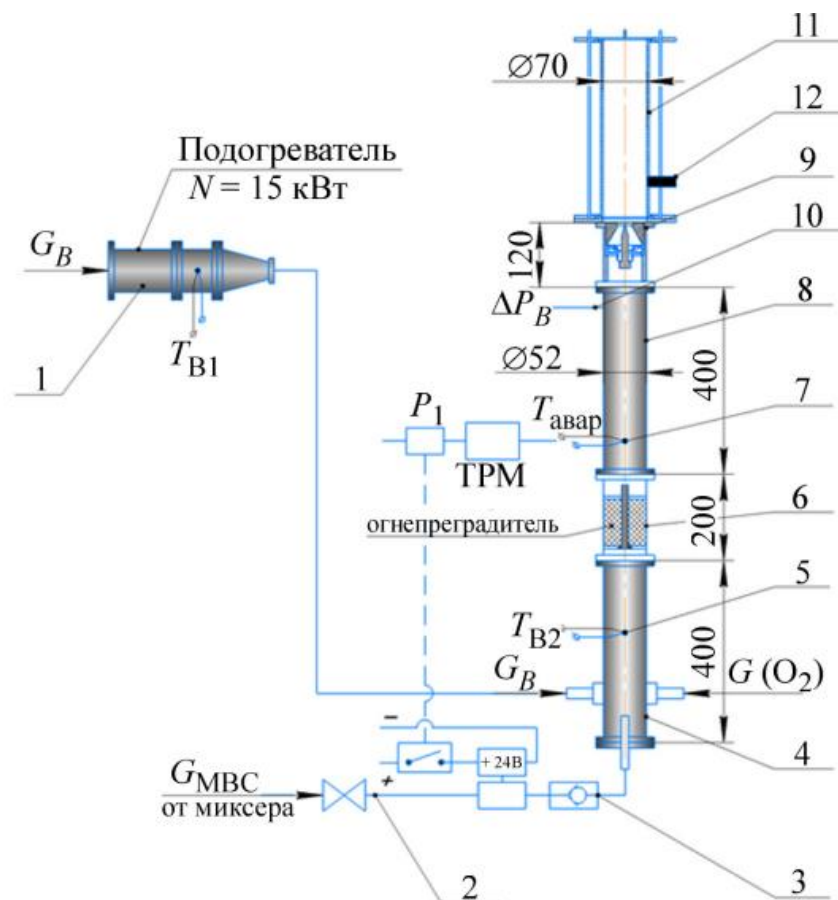


Рисунок 2.19 – Схема модельной экспериментальной установки

Для обеспечения требуемых условий по температуре воздуха на входе установлены системы подвода и подогрева воздуха 1. Через системы подвода топлива 2, рабочие тела поступают в смеситель 4 установки. В топливной магистрали 2 для обеспечения безопасной работы установлен обратный клапан 3. Температура (T_{B2}) топливоздушной смеси, сформированной в смесителе 4, фиксируется с помощью термопары 5, установленной в верхней части смесителя. Участок смешения имеет длину 1 метр и диаметр 0,052 метра, что обеспечивает хорошую предварительную подготовку топливоздушной смеси. Затем смесь проходит через огнепреградитель 6, в качестве которого использовалась плотно спрессованная металлическая проволока, так называемый материал МР, разработанный в Самарском университете им. Королева [145]. Из огнепреградителя 6 ТВС поступает участок фиксации проскока пламени 8, в котором расположена термопара 7, предназначенная для регистрации проскока пламени и передачи сигнала на автоматическое отключение подачи топлива, а также приемник давления 10 перед завихрителем. После мерного участка поток поступает непосредственно в горелочное устройство 9 и далее в кварцевую трубу 11, в которой находится свеча зажигания 12.

Горелочное устройство состоит из осевого завихрителя и центрального насадка, выполненного по форме усеченного конуса, расположенных в цилиндрическом корпусе (рисунок 2.20). Осевой завихритель имеет угол установки лопаток 55° , который обеспечивает необходимую степень закрутки для стабилизации пламени. За завихрителем установлено сужающееся сопло с углом конуса 60° , в котором происходит постепенное ускорение потока с минимальным уменьшением его закрутки. По оси сопла помещен конический насадок с возможностью осевого перемещения для изменения геометрических параметров выходного участка горелочного устройства.

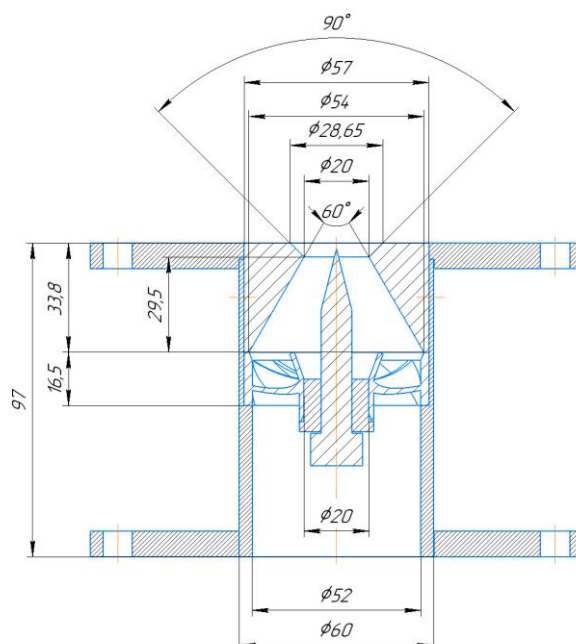


Рисунок 2.20 – Схема горелочного устройства

Главными составными элементами исследуемой установки по изучению процессов горения метано-водородной смеси являются: стойка, система подачи топлива и окислителя, камера смешения, завихритель и кварцевая труба.

Общий вид установки представлен на рисунке 2.21.



Рисунок 2.21 – Установка по определению границы устойчивой работы

Заключение по второй главе

В рамках реализации поставленной задачи по созданию комплекса экспериментальных установок и моделей для исследования механизмов горения метано-водородных и водородных топлив, обеспечивающих стабильную работу в соответствии с требуемыми нормативами безопасности при проведении работ с водородосодержащими топливами, были выполнены следующие работы:

- для распределения воздуха на два независимых контура была доработана система подачи воздуха на стенд, которая при использовании собственного компрессора обеспечивает расход воздуха до 140 г/с;

- с целью увеличения расхода воздуха была выполнена врезка в магистраль низкого давления компрессорной станции Самарского университета, позволяющая увеличить расход воздуха до 340 г/с;

- для обеспечения требуемых условий эксплуатации расходомеров спроектирован предварительный подогреватель воздуха, установлены магистральные фильтры и осушитель рефрижераторного типа;

- разработана и смонтирована магистраль подачи газообразного водорода, состоящая из двух независимых контуров;

- магистраль подачи природного газа доработана для независимой подачи и регулировки расхода природного газа по двум независимым контурам;

- разработан «миксер» для перемешивания метана и водорода, суммарным линейным размером компоновки 140 мм, диаметральным 24 мм, который обеспечит оптимальное смешение метана и водорода на заданных режимах планируемой работы.

Для обеспечения безопасного проведения работ с водородосодержащими топливами разработана техника безопасности при работе с водородом и метано-водородной смесью. Для предотвращения распространения пламени по водородной магистрали были подобраны огнепреградительные клапана. Установлена система сигнализации по

предельно допустимой концентрации веществ. В соответствии с требованиями были выполнены сверления в потолке для естественной вентиляции помещения с целью избежания накопления водорода.

Разработано модельное горелочное устройство в составе доработанного экспериментального стенда, которое позволит в широком диапазоне конструктивных и режимных параметров выполнять верификации предложенных математических моделей расчета процессов горения водородной и метано-водородной топливовоздушной смеси и дорабатывать их на основе собственных высокоточных экспериментальных результатов.

Также создан комплекс экспериментальных моделей и установок, позволяющий определять такие характеристики процесса горения и параметры камеры сгорания, как нормальная скорость распространения пламени, границы устойчивой работы по срыву и проскоку пламени.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ

Нормальная скорость распространения пламени (S_L) – это параметр, характеризующий ламинарную скорость перемещения фронта пламени относительно несгоревшего газа в направлении, перпендикулярном к поверхности фронта пламени. Данная величина является фундаментальной характеристикой процесса горения топливовоздушной смеси, которая зависит от коэффициента избытка топлива, начальной температуры, давления и вида топлива [156]:

$$S_L = f(\phi, T, P, \text{вид топлива}).$$

Как отмечалось в главе 1, обогащение водородом углеводородного топлива (при прочих равных условиях) приводит к росту нормальной скорости распространения пламени и, как следствие, к интенсификации процессов сжигания ТВС в камерах сгорания газотурбинных двигателей и установок. В рамках численного моделирования камер сгорания величина S_L существенным образом влияет на полученные в результате расчетов характеристики процесса горения, в том числе границы устойчивой работы этого узла ГТД и ГТУ.

Нормальная скорость распространения пламени (S_L) определяется, с одной стороны, химико-кинетическими механизмами протекания реакций окисления применяемого топлива (в данном исследовании: метано-водородного топлива), а с другой стороны, молекулярной диффузией промежуточных и конечных компонентов реагирующей системы. Эти данные обычно входят в известные базы кинетических механизмов [138, 147, 188, 200]. Однако, как было показано выше, универсальных высокоточных кинетических моделей окисления метано-водородных смесей, применяемых в широком диапазоне параметров рабочего процесса в камерах сгорания ГТД и ГТУ в настоящее время не существует, а опытные данные ограничены достаточно узкими диапазонами влияющих факторов.

Исходя из этого, в рамках данной работы было проведено расчетно-экспериментальное исследование зависимости S_L от коэффициента избытка

топлива (ϕ), температуры и давления для различных метано-водородных топлив с коэффициентом обогащения водородом $R_H = 0 \dots 100\%$.

На первом этапе на основе обзора известных литературных источников по кинетическим механизмам окисления метано-водородных топлив и опубликованных экспериментальных данных был обоснован выбор базового кинетического механизма и проведена его валидация. Затем на основе анализа чувствительности были определены элементарные реакции, наиболее сильно влияющие на нормальную скорость распространения пламени, и проведена доработка базового кинетического механизма окисления метано-водородного топлива.

В целях валидации разработанного кинетического механизма окисления метано-водородного топлива проведено экспериментальное исследование методом нулевого теплового потока (см. главу 2) по определению S_L для различных значений R_H , ϕ , T_k при атмосферном давлении. Кроме того, сформирована база опытных данных из литературных источников по влиянию давления на нормальную скорость распространения пламени для метано-водородных смесей.

В заключении на основе проведенного расчетно-экспериментального исследования получены зависимости $S_L = f(\phi, T, P)$ для метано-водородных топлив с содержанием водорода R_H в диапазоне от 0% до 100% с шагом 5%. Полученные зависимости для S_L в дальнейшем использовались для численного моделирования процессов горения метано-водородных топлив в соответствии с задачами настоящего исследования.

3.1 Выбор и валидация базового кинетического механизма окисления метано-водородного топлива

Как было отмечено в главе 1, одним из важнейших элементов расчетных моделей является кинетический механизм. Выбранный механизм должен точно описывать ключевые характеристики процесса горения ТВС, такие как время задержки воспламенения, нормальную скорость распространения

пламени, состав продуктов сгорания и другие [36]. Для численного моделирования выбраны наиболее перспективные кинетические механизмы [148, 188, 192, 200, 209], которые были валидированы по экспериментальным данным, полученным в различных ведущих лабораториях мира для метан-водород-воздушных смесей.

Все вычисления для валидации моделей выполнены в программе Chemkin пакета ANSYS 21 R2 [48].

Валидация по нормальной скорости распространения пламени.

Способность выбранных кинетических моделей достоверно прогнозировать значения нормальной скорости распространения пламени (S_L) метано-водородных топливных смесей оценивалась по экспериментальным данным, полученным для нормальных условий (давление – 1 атм, температура – 298 К) и опубликованным в работах [105, 113, 172], где были исследованы смеси с объемной долей водорода в топливе R_H до 50%.

Результаты экспериментальных работ [105, 113, 172] отображены на рисунке 3.1а, из которого следует, что увеличение доли H_2 в топливе с 10% до 50% приводит к росту S_L более, чем на 60%. Результаты численного исследования при использовании выбранных кинетических механизмов [148, 188, 192, 200, 209] в реакторе расчета нормальной скорости пламени предварительно подготовленных смесей (Premixed Laminar Flame-Speed Calculation) [48] представлены линиями на рисунках 3.1б, 3.1в и 3.1г для доли водорода в топливе 10%, 35% и 50% соответственно.

Из рисунка 3.1 видно, что для бедных и стехиометрических смесей результаты моделирования отклоняются от экспериментальных данных не более чем на 10%. Для богатых ТВС ($\phi > 1,4$) модели Stagni2016 [192] завышают скорость распространения пламени более чем на 50%. Модели GRI3.0 [188] и CRECK2020 [200] в целом дают удовлетворительное соответствие опытным данным во всем диапазоне значений по коэффициенту избытка топлива, при этом, незначительно (около 10%) завышая величину S_L в области стехиометрии. Наиболее близкие к экспериментальным данным

результаты расчета, при различном уровне добавки водорода (R_H), демонстрирует редуцированная модель Konnov2019 [148], включающая 51 компонент и модель Wang2018 [209].

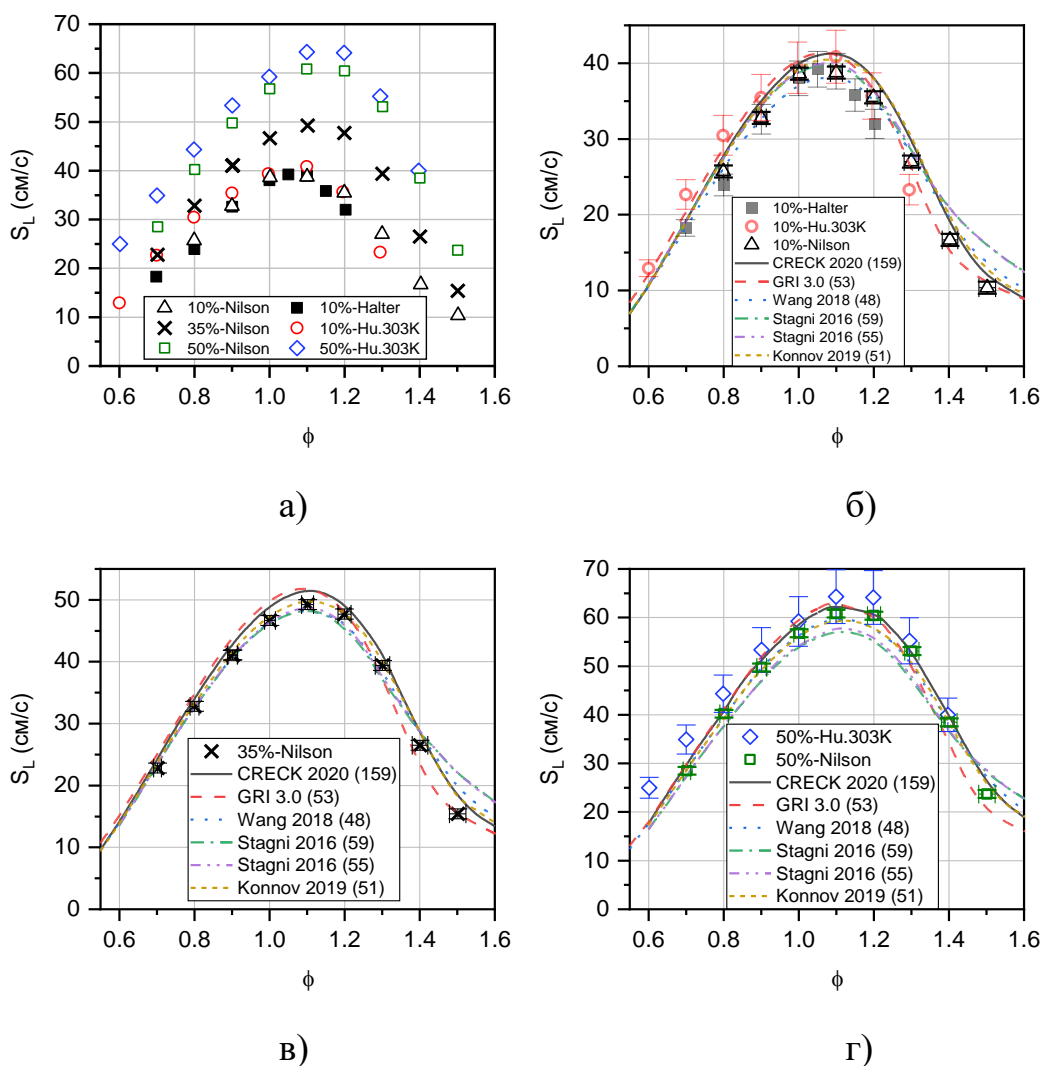


Рисунок 3.1 – Валидация кинетических моделей по экспериментальным данным для ламинарной скорости распространения пламени; R_H : а) 10-50% б) 10%, в) 35%, г) 50%

Валидация по времени задержки воспламенения.

Экспериментальные исследования в ударных трубах позволяют определить зависимости времени задержки воспламенения (τ) метано-водородных топлив от температуры. Выбранные ранее модели были валидированы по экспериментальным данным для воспламенения бедных $\phi = 0,5$ [176] и стехиометрических [116] метано-водород-воздушных смесей. В проведенных экспериментальных исследованиях рассматривались добавки

водорода с мольной долей R_H от 15 до 40%. Температуры воспламенения были определены с точностью ± 15 К. Полученные в работах [116, 176] опытные данные на рисунках 3.2 и 3.3 сравниваются с результатами проведенного в настоящей работе кинетического моделирования задержки воспламенения в закрытом гомогенном реакторе (Closed Homogeneous Batch Reactor) [48] с использованием выбранных кинетических механизмов.

Из рисунка 3.2 видно, что результаты моделирования по рассматриваемым механизмам, за исключением GRI3.0, лежат в пределах экспериментальной погрешности определения времени задержки воспламенения для бедных смесей $\phi = 0,5$ при температуре 1200-1700 К. Модель GRI3.0 занижает время задержки воспламенения более, чем в 2 раза.

Результаты моделирования для стехиометрических смесей отображены на рисунке 3.3, из которого видно, что модель GRI3.0 удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными для температур 1100 – 1200 К, однако существенно занижает величину τ для более высоких температур. Остальные модели, наоборот, удовлетворительно описывают области температур свыше 1200 К и завышают время задержки воспламенения для температур 1000 – 1200 К. Для рассмотренных режимов лучшее соответствие экспериментальным данным демонстрируют модели Stagni2016 и Wang2018.

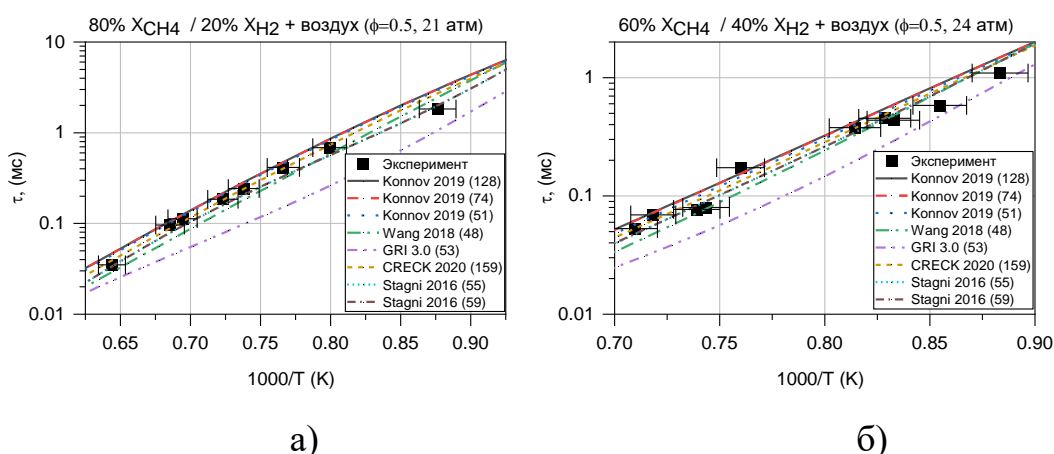


Рисунок 3.2 – Валидация кинетических моделей по экспериментальным данным для времени задержки воспламенения при $\phi = 0,5$

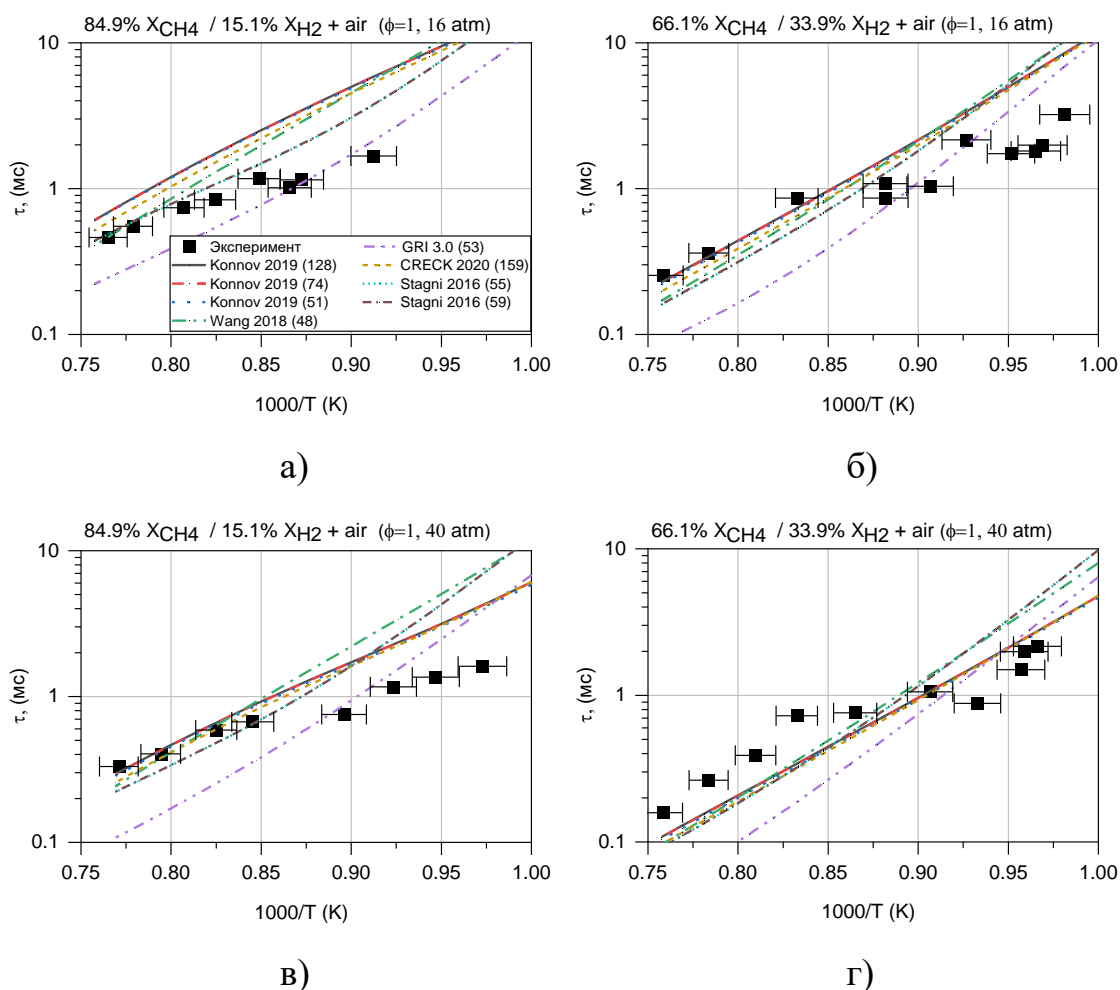


Рисунок 3.3 – Валидация кинетических моделей по экспериментальным данным для времени задержки воспламенения при $\phi = 1,0$

Валидация по эмиссии NO.

В работе Sorrens [73] был изучен эффект добавки водорода в метан ($R_H = 0 - 35\%$) на образование NO и скорость распространения пламени при нормальных условиях. Концентрации NO измерялись в пламенах предварительно подготовленной ТВС на горелке, реализующей метод нулевого теплового потока (Heat Flux) (см. главу 2). Пробы отбирались кварцевым пробоотборником в точке на оси горелки на высоте 10 мм от плиты и анализировались хемилюминесцентным анализатором. Суммарная погрешность газового анализа оценивается в пределах $\pm 10\%$. Опытные данные и соответствующие результаты моделирования представлены на рисунке 3.4.

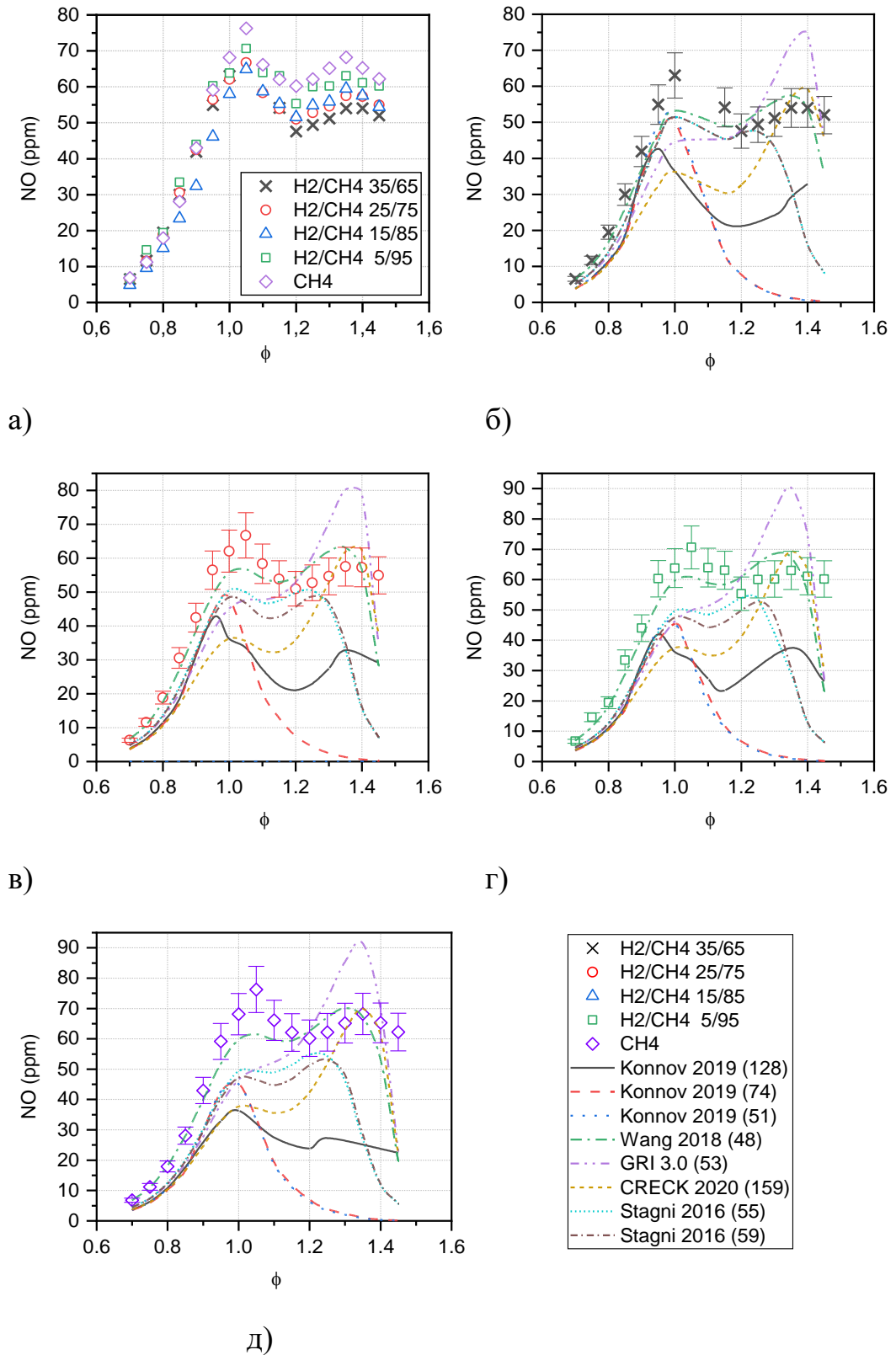


Рисунок 3.4 – Валидация кинетических моделей по экспериментальным данным для концентрации NO над горелкой; R_{H_2} : а) 0-35%, б) 35%, в) 25%, г) 5%, д) 0%

Авторами работы [73] экспериментально выявлено наличие двух

максимумов концентрации NO: в стехиометрических смесях из-за действия термического механизма Зельдовича и в богатых смесях при коэффициенте избытка топлива $\phi \approx 1,3$ в результате быстрого механизма Фенимора. В бедном пламени ($\phi \leq 1,0$) обогащение водородом мало влияет на концентрацию NO, в то время как в богатых пламенах концентрация NO значительно уменьшается.

Результаты моделирования показывают, что все три модели Коннова не описывают достоверно быстрый механизм Фенимора и существенно занижают концентрации NO для $\phi > 1,0$. Модель GRI3.0 напротив завышает на 40% концентрации оксида азота для $\phi = 1,2 - 1,3$. При этом, второй максимум отсутствует, а значения концентрации NO для стехиометрического состава занижены примерно на 30%. Модель CRECK2020 заметно занижает концентрации NO в области стехиометрии, где в основном работает механизм Зельдовича. Для топливных смесей с содержанием водорода свыше 25% хороший результат демонстрируют модели Stagni2016 и Wang2018. При меньшей добавке H₂ модели Stagni2016 занижают концентрации NO более, чем на 30% в области стехиометрических составов. Наилучшее соответствие экспериментальным данным демонстрирует модель Wang2018, однако и этот кинетический механизм завышает величину концентрации оксида азота в случае стехиометрических смесей.

Проведенная валидация базовых кинетических механизмов показала, что для моделей Konnov2019 (128 компонента) и Konnov2019 (74 компонента) требуется процедура редуцирования и подбора параметров решателя, кроме того данные модели не достоверно определяют концентрации NO богатых ТВС. При использовании модели GRI3.0 для метано-водородных топлив существенным образом занижается время задержки воспламенения при $T=1100 - 1450$ К. Кроме того, недостоверно определяются концентрации NO в богатых смесях. Редуцированная модель Konnov2019 (51 компонент) демонстрирует достаточно точные прогнозы скорости распространения пламени, но слабо описывает быстрый механизм роста NO. Модель CRECK2020 занижает значения концентраций NO для стехиометрических

смесей и замедляет воспламенение в случае небольшой добавки водорода. Модели Stagni2016 показывают заниженные концентрации NO и заметное отклонение нормальной скорости распространения пламени для смесей с высоким содержанием водорода ($R_H = 50\%$). Модель Wang2018 хорошо согласуется с экспериментальными данными для нормальной скорости распространения пламени и времени задержки воспламенения. Данный механизм демонстрирует наилучшие прогнозы концентраций NO. Поэтому за базу для дальнейшей работы по совершенствованию кинетического механизма окисления метано-водородного топлива и численного моделирования рабочего процесса камер сгорания ГТД и ГТУ была выбрана модель Wang2018 [209].

3.2 Совершенствование базового кинетического механизма горения метано-водородного топлива

Выбранная на основании валидации по нормальной скорости распространения пламени, времени задержки воспламенения и концентрации оксидов азота в пламени (см. раздел 3.1) модель Wang2018 [209], как и другие, рассмотренные выше кинетические механизмы, демонстрирует отклонения от экспериментальных данных по нормальной скорости распространения пламени, особенно в области бедных ТВС ($\phi < 1$). В связи с тем, что для реализации задач настоящего исследования по моделированию проскока пламени в КС с предварительной подготовкой ТВС, нормальная скорость распространения пламени (S_L) является одним из ключевых параметров моделирования, актуальным является более детальный анализ и совершенствование кинетических механизмов горения с учетом последних публикаций по уточнению констант скоростей задействованных химических реакций.

Сравнительный анализ кинетических механизмов, рассмотренных в главе 1 и разделе 3.1, показал, что модель Wang2018 учитывает все ключевые элементарные реакции окисления водорода. Результаты проведенного анализа чувствительности реакций модели Wang2018 для вычислений нормальной

скорости распространения пламени (S_L) выявили 9 наиболее значимых реакций для стехиометрической предварительно подготовленной смеси водорода с воздухом при атмосферном давлении и температуре 300 К.

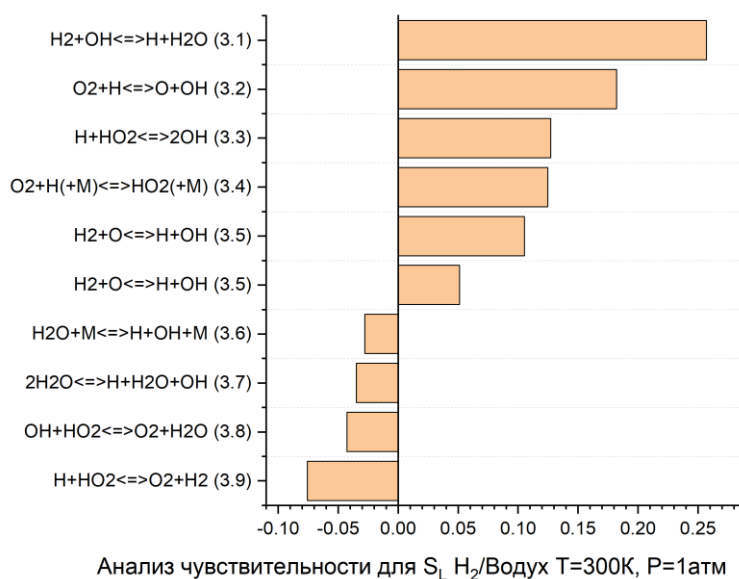


Рисунок 3.5 – Анализ чувствительности реакций для модели Wang2018 по расчету S_L смеси H₂/воздух при $P_0 = 1$ атм, $T_0 = 300$ К

Рассмотрим и проанализируем константы скорости реакций, представленных на рисунке 3.5.

Для наиболее сильно влияющей на вычисления нормальной скорости распространения пламени водорода реакции:



в модели Wang2018 использовано выражение для скорости из экспериментального исследования Michael и др. (1988 г.) [164]. Это выражение подтверждается результатами из работы Vaulch и др. (1994 г.) [56] и недавними квантово-химическими вычислениями Sun (2018 г.) [196] и Welsch (2018 г.) [210]. Вместе с тем, проведенный в работе Yang (2021 г.) [213] статистический анализ более чем 15 источников определил новое выражение скорости реакции (3.1), которое согласуется с данными Michael и др. (1988 г.) [164], но предлагает большие значения скорости реакции для высоких температур (рисунок 3.6). Учитывая высокую степень согласования рассмотренных данных из различных источников, статистическое выражение

из работы Yang (2021 г.) [213] выглядит предпочтительным и будет в дальнейшем использоваться в модифицированном кинетическом механизме.

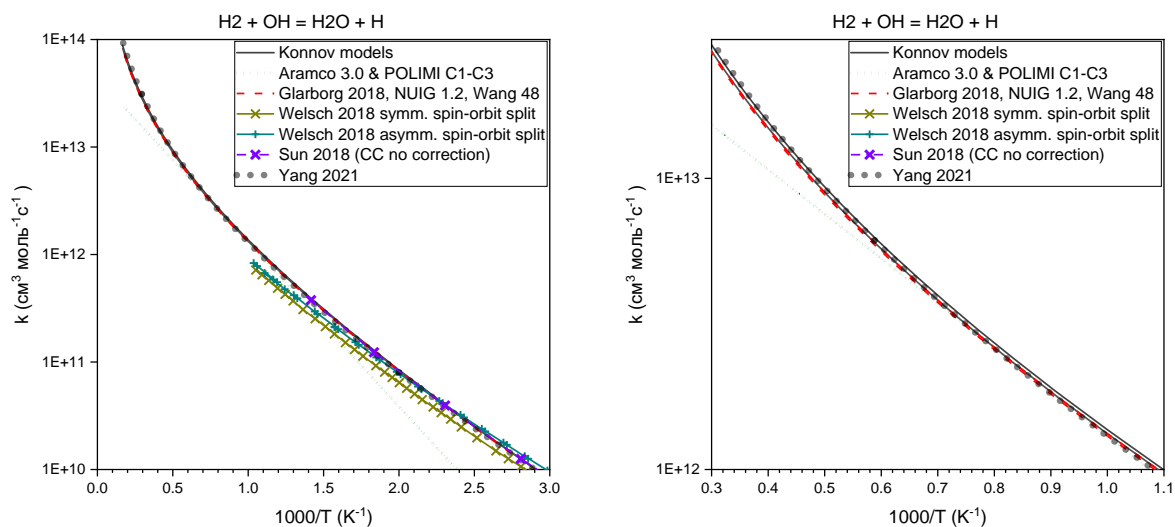
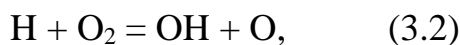


Рисунок 3.6 – Изменение скорости реакции от температуры:



Взаимодействие молекулярного кислорода с атомом водорода в реакции:



описывается в модели Wang2018 выражением из работы Hong (2011 г.) [110], которое сочетает результаты собственного эксперимента и данные из работы Masten (1990 г.) [154]. Экспериментальные значения, полученные Wang (2017 г.) [208], уточняют константы скорости реакции (3.2) для температур 1500 – 1700 К и эффективно описываются моделью Glabourg [90], где значение предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса, по сравнению с аналогичным выражением из работы Hong (2011 г.) [110], было снижено на 4%.

В аналитическом исследовании Yang (2021 г.) [213] обобщение экспериментальных данных позволило сформулировать новое выражение скорости этой реакции, погрешность которого оценивается в пределах $\pm 8\%$ для температур от 800 до 3000 К. Рассмотренные зависимости скорости реакции (3.2) от температуры представлены на рисунке 3.7.

Использование нового выражения из работы Yang (2021 г.) [213] в модели Wang2018 ведет к увеличению нормальной скорости распространения

пламени метана и водорода примерно на 2%, что уточняет результаты расчетов S_L для бедных и стехиометрической смесей. Использование выражения из модели Glabourg [90], наоборот, снижает скорость распространения пламени метана для бедных смесей на 2%. Поэтому, в дальнейшем будет использоваться выражение для скорости данной реакции из работы Yang (2021 г.) [213].

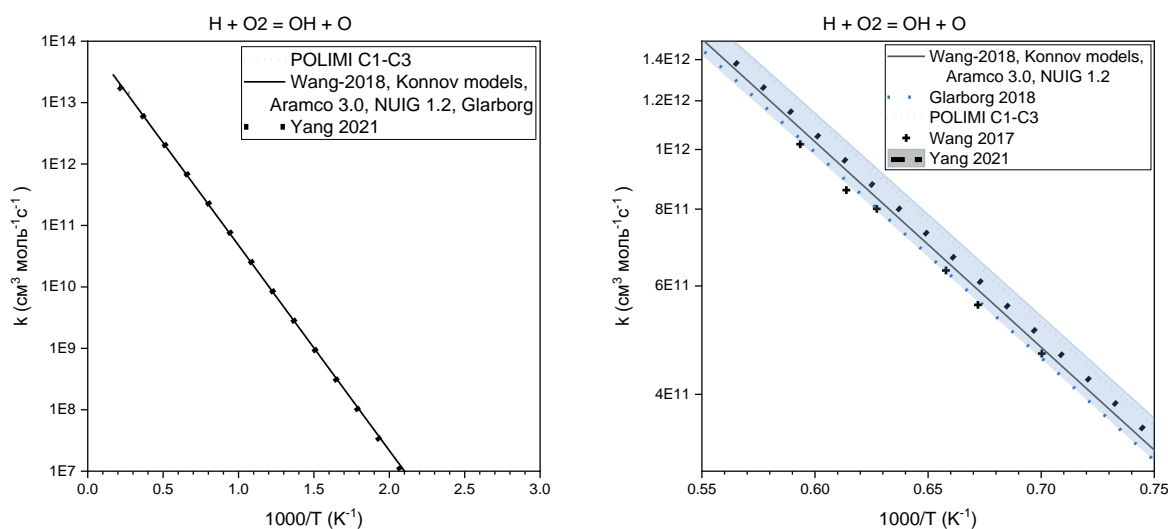


Рисунок 3.7 Изменение скорости реакции от температуры:

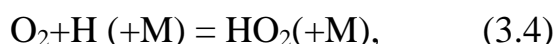


Для реакции взаимодействия атома водорода с HO_2 :



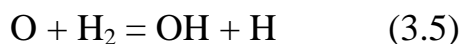
современные модели согласованы с выражениями скорости реакции из работы Mueller (1999 г.) [169]. Из обзора Burke [64] видно, что это выражение хорошо согласуется с экспериментальными исследованиями при температуре 773 К [50, 51, 190]. Статистический анализ Yang (2021 г.) [213] для данной реакции также во многом основан на выражении Mueller (1999 г.) [169]. Тем не менее, новое статистическое выражение из работы Yang (2021 г.) [213] уточняет выражение для скорости данной реакции при температуре свыше 2000 К и будет использоваться в дальнейшем.

Для тримолекулярной реакции:



модель Wang2018 и другие современные модели используют выражение для скорости реакции из работы Troe (2000 г.) [201]. Проводимые в данном направлении работы связаны с уточнением коэффициентов для третьей молекулы M. Поэтому, на данном этапе изменения в модель Wang2018 для реакции (3.4) не вносятся.

Реакция между атомарным кислородом и молекулой водорода:



на рисунке 3.5 представлена дважды в виду того, что модель для лучшего описания скорости использует сумму двух уравнений Аррениуса. В моделях Konnov2019 [148], Aramco3.0[221] и CRECK2020 [200] используются данные из работы Sutherland (2005 г.) [198], а в модели NUIG [49] и Wang2018 применяется выражение из работы Baulch (2005 г.) [56].

В работе Коннова [137] отмечается, что значения констант скорости реакции из работы Baulch (2005 г.) [56] значительно отличаются от предыдущих данных при температурах около 1000 К. В работе [213] предлагается использовать новое выражение, основанное на статистическом анализе работ с наиболее надежными методами измерений. Как видно из рисунка 3.8, новое выражение из работы Yang (2021) [6] для спорного участка температур около 1000 К лучше согласуется с данными Sutherland (2005 г.) [198]. Также, из рисунка 3.8 видно, что выражение Sutherland эффективно описывает высокотемпературный эксперимент из работы Javoy [162]. Поэтому, в дальнейшем, для модернизации кинетического механизма будет использоваться выражение из работы Sutherland (2005 г.) [198].

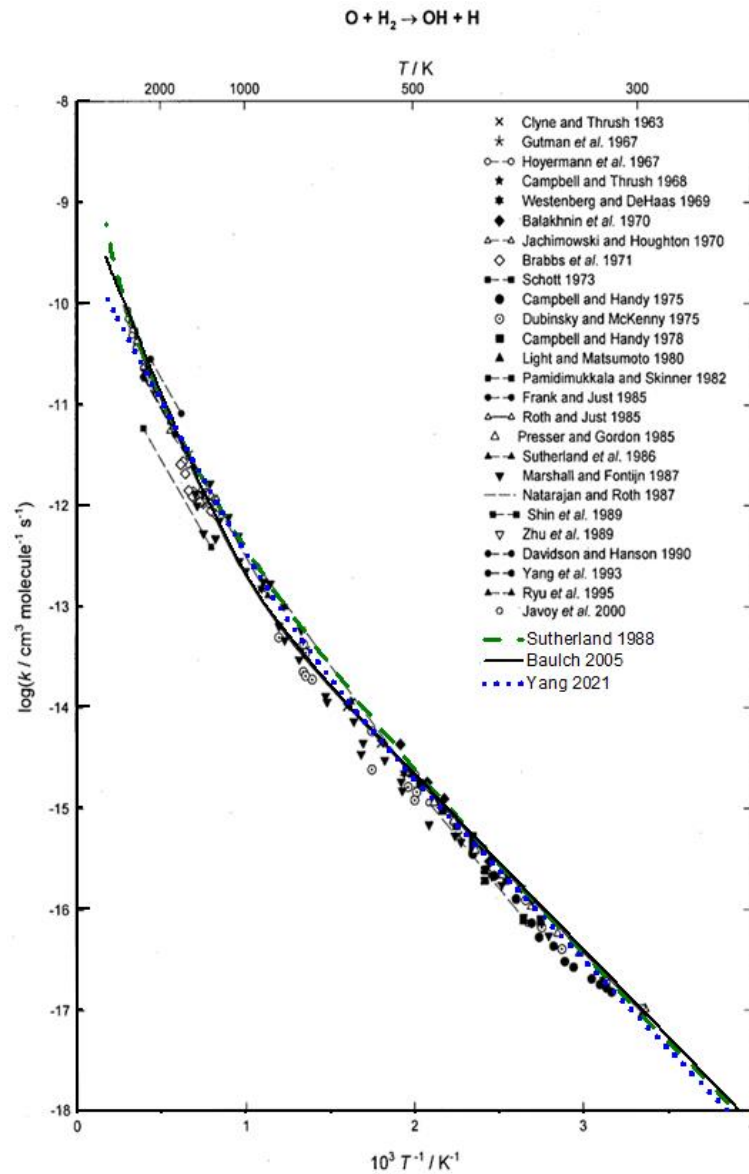
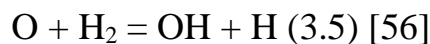


Рисунок 3.8 – Изменение скорости реакции от температуры:



(на рисунке дополнительно представлены результаты расчета по моделям Sutherland (2005 г.), Baulch (2005 г.) и Yang (2021))

Значения скорости для реакции декомпозиции молекулы воды:



в различных современных кинетических механизмах, например, моделях Konnov2019 [148], приняты из работы Srinivasan (2006 г.) [191]. В модели Wang2018 также применяется данное выражение с небольшой правкой для энергии активации. Другие модели, такие как Aramco3.0 и POLIMI используют обратную запись из работы Shimizu (2011 г.) [183], где отмечается,

что предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса был намерено увеличен для более эффективного описания скорости пламени. Как видно из рисунка 3.9 это привело к существенному завышению константы скорости реакции относительно других результатов.

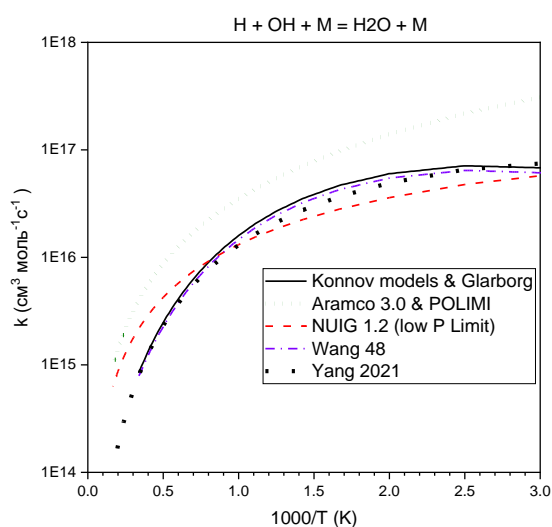
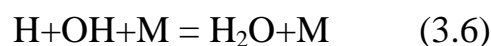
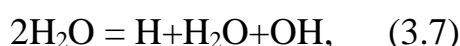


Рисунок 3.9 – Изменение скорости реакции от температуры:



В модели NUIG [49] используется обратная запись реакции, заимствованная из теоретической работы Sellevag (2008 г.) [181], в которой отмечается, что вычисленные скорости реакции (3.6) хорошо согласуются с данными Srinivasan (2006 г.) [191] для высоких температур, однако в низкотемпературном диапазоне расчеты не подтверждаются экспериментальными данными. По этой причине, выражение для скорости реакции из работы Srinivasan (2006 г.) [191] в настоящее время является предпочтительным и будет использоваться в дальнейшем.

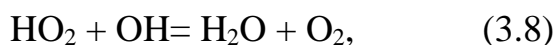
Реакция декомпозиции молекулы воды, когда в роли М выступает также молекула H_2O :



является частным случаем реакции (3.6). В моделях Konnov2019, Glarborg и Wang2018 данная реакция рассматривается отдельно от реакции (3.7), а соответствующее выражение скорости принято из работы Baulch (2005 г.) [56].

В рамках настоящей работы выражение скорости реакции (3.7) в модели Wang2018 остается без изменений.

Обоснование выбора выражения для описания скорости реакции:



было рассмотрено авторами работы [46], в которой, опираясь на опытные данные из работы Burke (2013 г.) [63] и теоретический анализ, основанный на *ab initio* расчетах, была выявлена слабая температурная зависимость для скорости реакции с минимумом около 1000 К (рисунок 3.10). Аналогичные экспериментальные данные получены в работе Hong (2013 г.) [111], который исследовал скорость данной реакции в диапазоне температур от 1070 до 1280 К. Эти два исследования хорошо согласуются между собой. Поэтому выражение из работы Hong (2013 г.) было использовано в моделях Konnov2019 и POLIMI.

В моделях NUIG и Glaborg используются результаты более ранних исследований из работы Burke [63], а в моделях Wang2018 и Aramco3.0 – из работы Keyser (1988 г.) [131]. При этом, в модели Aramco3.0 применяется дополнительный понижающий коэффициент 0,85 для предэкспоненциального множителя уравнения Аррениуса. Константы скорости, используемые в рассмотренных выше моделях, отражены на рисунке 3.10.

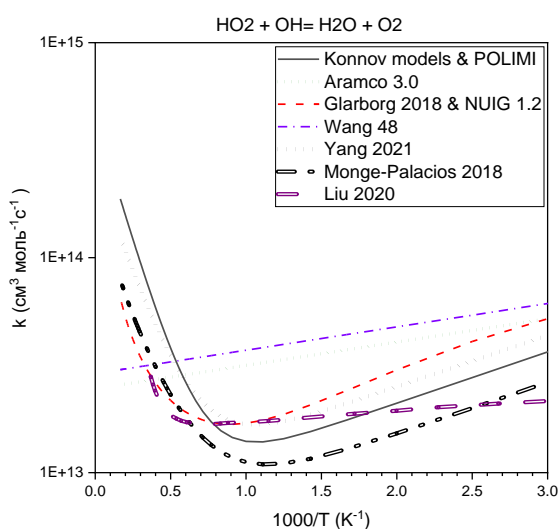
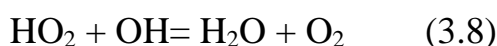
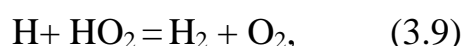


Рисунок 3.10 – Изменение скорости реакции от температуры:



Проведенные в работе Monge-Palacios (2018 г.) [S37] квантово-химические вычисления показывают результаты близкие к выражению из работы Hong (2013 г.). Новое выражение также подтверждает неаррениусовскую температурную зависимость и наличие минимума в константах скорости при 850 К. Последующее теоретическое исследование, представленное в работе Song (2020 г.) [189], продемонстрировало хорошее согласование с данными Hong (2013 г.) [111] при температуре до 1000 К. Анализируя результаты работы Liu [151] можно сделать вывод, что выражение для скорости реакции (3.8) из работы Hong хорошо согласуется с данными из работы [151] для низких температур (до 500 К) и температур более 1000 К. Таким образом, по совокупности различных исследований выражение для скорости реакции из работы Hong (2013 г.) [111] является наиболее предпочтительным, а его использование в модели Wang2018 ведет к небольшому увеличению скорости распространения пламени бедных и стехиометрической метано-воздушных смесей. Для бедных смесей с водородом, увеличение скорости может достигать 7%, а для богатых и стехиометрической смесей до 2%.

Для последней реакции, отмеченной на рисунке 3.5:



в моделях Konnov2019 записано обратное выражение из работы Michael (2000 г.) [163]. В моделях Glarborg и NUIG также используется выражение из работы Michael (2000 г.), но в соответствии с рекомендацией Burke (2012 г.) [64], с поправкой 0,75 для предэкспоненциального множителя. В модели Wang2018 это выражение применяется без указанной выше корректировки. В моделях POLIMI и Aramco3.0 используется выражение близкое к результатам теоретического исследования Harding (2007 г.) [107].

В работах Harding [107] и Mousavipou [168] результаты вычислений различными методами квантовой химии хорошо согласуются с предыдущим исследованием Karkash [127] и экспериментальной работой Michael [163].

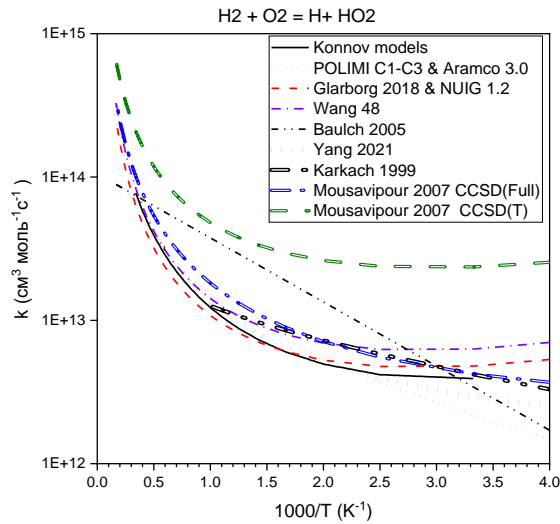
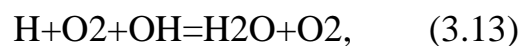
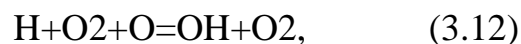
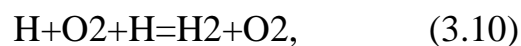


Рисунок 3.11 – Скорости реакции $\text{H}_2 + \text{O}_2 = \text{H} + \text{HO}_2$ (3.9)

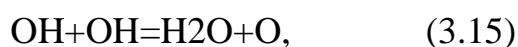
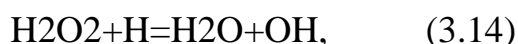
Ориентируясь на результаты квантово-химических вычислений и исследования, проанализированные в работе Yang (2021) [213], наиболее предпочтительным выражением для скорости реакции (3.9) является выражение из работы Michael [163], использование которого в механизме Wang2018 ведет к увеличению нормальной скорости распространения пламени метана и водорода.

Применение в кинетическом механизме Wang2018 новых выражений для скоростей реакций (3.1) – (3.9), в большинстве случаев, ведет к увеличению расчетной нормальной скорости распространения пламени (S_L) и делает результаты моделирования завышенными. Основной причиной завышенных результатов можно предположить отсутствие в модели Wang2018 серии тримолекулярных реакций:



которые, как было показано в работе [138], могут играть существенную роль в моделировании S_L . Скорости данных реакций были приняты из модели Konnov2019 [138].

Также из модели Konnov2019 [138] были приняты выражения для уточнения констант скоростей реакций (3.14) и (3.15):



А выражение скорости значимой реакции для богатых водородных смесей:



принято из работы Yang (2021 г.) [213]. Учет данных выражений (3.10) – (3.13), а также уточнение констант скоростей реакций для (3.14) – (3.16) уменьшают расчетные значения S_L примерно на 4 – 10%, что значительно улучшает достоверность расчетов нормальной скорости распространения пламени при использовании предпочтительных выражений для (3.1) – (3.9) в механизме Wang2018.

Таким образом, в ходе представленного выше анализа, модель Wang2018, была дополнена реакциями (3.10) – (3.13) из работы [138]. Взамен устаревших данных для констант скоростей реакций (3.8) – (3.9) приняты актуальные значения, которые экспериментально подтверждены в работах Hong [111] и Michael [163]. Для реакций (3.1) – (3.3), (3.16) приняты осредненные значения скорости из статистического анализа, проведенного в работе Yang [213]. Для реакции (3.5) принято выражение для скорости реакции из работы Sutherland [198] в кинетической модели горения Wang2019.

В таблице 1 представлены все перечисленные выше изменения и дополнения, вносимые в базовый кинетический механизм Wang2018, включающие новые реакции и обновленные константы их скоростей, записанные в форме уравнения Аррениуса:

$$k = AT^B \exp(-E_a/RT),$$

где A – предэкспоненциальный коэффициент; B – степенной коэффициент; E_a – энергия активации; R – газовая постоянная; T – температура.

Таблица 3.1 – Новые реакции и обновленные константы скорости в базовом кинетическом механизме Wang2018

Реакция	A	B	E_a (ккал/моль)	Примечание
$H_2+OH=H+H_2O$	8.03E+07	1.642	3.2793	! Yang 2021
$O_2+H=O+OH$	1.10E+15	-0.286	1.60E+01	! Yang 2021
$H+HO_2=2OH$	1.36E+13	0.212	-9.20E-03	! Yang 2021
$O+H_2=OH+H$	5.08E+04	2.67	6.292	! Sutherland & Michael 2006
$OH+HO_2=O_2+H_2O$	7.00E+12	0.0	-1.09296	! Hong 2013
	4.50E+14	0.0	10.9296	! Hong 2013
$H_2+O_2=H+HO_2$	7.40E+05	2.43	53.5	! Michael 2000
$O+HO_2=O_2+OH$	4.51E+11	0.659	-0.4619	! Yang 2021
$H+O_2+H=H_2+O_2$	8.80E+22	-1.835	0.8	! Konnov 2019
$H+O_2+H=OH+OH$	4.00E+22	-1.835	0.8	! Konnov 2019
$H+O_2+O=OH+O_2$	7.35E+22	-1.835	0.8	! Konnov
$H+O_2+OH=H_2O+O_2$	2.56E+22	-1.835	0.8	! Konnov 2019

Перечисленные выше изменения повышают прогнозируемые по модели Wang2018 значения нормальной скорости распространения пламени метана примерно на 2%, что приближает максимальные значения S_L к экспериментальным данным. Для нормальной скорости пламени водорода соответствующие расчеты по разработанной модели WangUPD, а также экспериментальные данные из работ [113, 140] нанесены на график (рисунок 3.12), заимствованный из работы [204], где был представлен анализ валидации моделей NUIG и Aramco3.0. Из рисунка 3.12 видно, что расчеты по разработанному механизму WangUPD хорошо согласуются с моделью NUIG для смесей $\phi \leq 2,5$, а с моделью Aramco3.0 для смесей $\phi > 2,5$.

Таким образом, в результате проведенного исследования по анализу современных моделей окисления метана и водорода, выбранная в разделе 3.1 базовая модель Wang2018 была уточнена и дополнена новыми реакциями. Уточненная модель WangUPD обеспечивает более высокие значения нормальной скорости распространения пламени метана и водорода. Для метано-водородных смесей с различной долей H_2 в топливе необходимо провести дополнительную валидацию разработанного кинетического механизма.

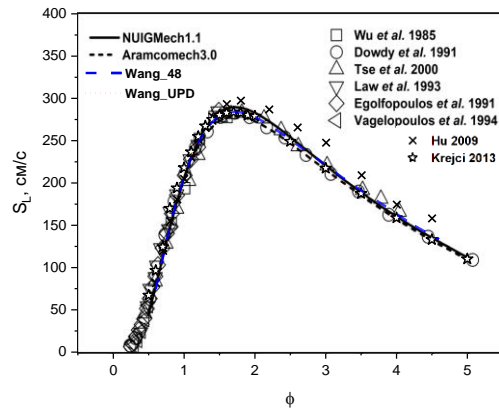


Рисунок 3.12 – Зависимость нормальной скорости распространения пламени (S_L) водорода от коэффициента избытка топлива (ϕ) [204] (на рисунке дополнительно представлены результаты расчета по моделям Wang2018 и WangUPD, а также опытные данные из работ [113, 140])

3.3 Расчетно-экспериментальное исследование зависимостей нормальной скорости распространения пламени метано-водородных топлив от состава, температуры и давления

Для валидации сформированного в разделе 3.2 кинетического механизма WangUPD были проведены экспериментальные исследования по определению нормальной скорости распространения пламени (S_L) метано-водородных топлив с различной долей содержания водорода в топливе (R_H). Опыты проводились с использованием установки Heat Flux в научно-образовательном центре газодинамических исследований Самарского университета им. Королева (см. раздел 2.3) для предварительно подготовленной ТВС при начальной температуре 300 – 400 К и атмосферном давлении [23]. Коэффициент избытка топлива варьировался в диапазоне $\phi = 0,6 - 1,6$. Основными факторами, влияющими на достоверность определения S_L , являются разброс регистрируемых значений температур на поверхности горелки и погрешность определения средней скорости потока над поверхностью горелки. Как показывает проведенный анализ точности измерения и результаты исследования, представленные в работах [59, 60, 73, 78, 118, 136, 139, 156, 157, 172, 222], абсолютная погрешность измерения S_L в исследуемом диапазоне параметров составляет $\pm 0,5 - 1,0$ см/с.

Представленные на рисунке 3.13 результаты расчетно-экспериментального исследования показывают на хорошую сходимость данных по нормальной скорости распространения пламени, рассчитанных с использованием разработанной модели WangUPD с экспериментальными результатами, полученных как в настоящей работе, так и в работах других авторов [46, 62, 73, 78, 113], для случаев добавок водорода в метан (R_H) в размере 25%, 35% и 60% по объему при изменении коэффициента избытка топлива.

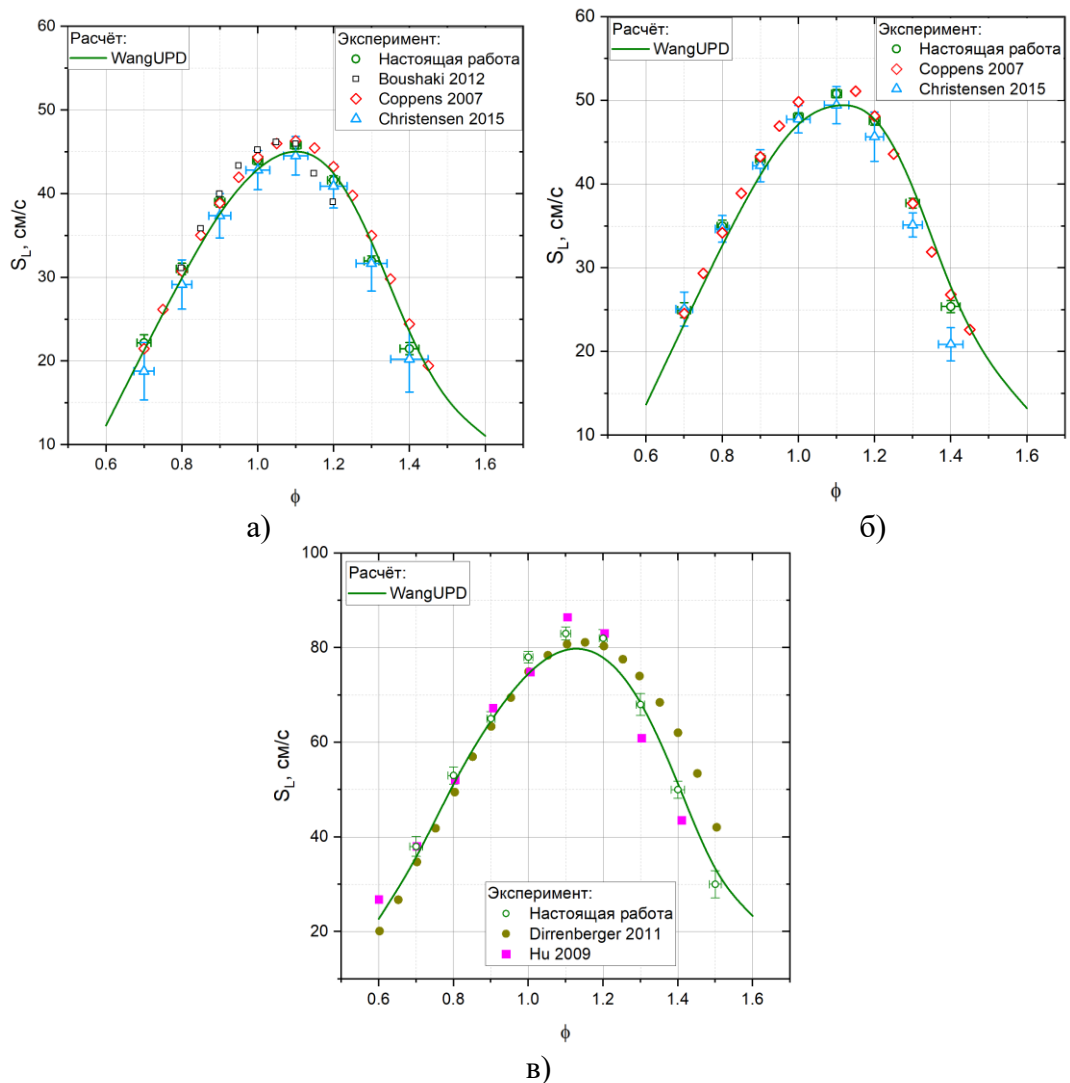


Рисунок 3.13 – Валидация разработанного кинетического механизма по нормальной скорости распространения пламени (S_L) для различной доли водорода в топливе ($T_k = 300$ К, $P_k = 1$ атм)

а) $R_H = 25\%$; б) $R_H = 35\%$; в) $R_H = 60\%$

Представленный сравнительный анализ экспериментальных исследований по влиянию добавок водорода на нормальную скорость распространения пламени метано-воздушной смеси, проведенных различными методами с использованием отличающихся экспериментальных установок и систем измерения (рисунок 3.13), подтверждает высокую достоверность полученных результатов с использованием метода Heat Flux в научно-образовательном центре газодинамических исследований Самарского университета им. Королева. Это позволяет использовать данную экспериментальную базу данных и для валидации разработанного кинетического механизма WangUPD при других температурах на входе в горелочное устройство.

На рисунке 3.14 представлены результаты для температуры ТВС на входе в горелочное устройство $T_k = 350$ К (рисунок 3.14а) и $T_k = 400$ К (рисунок 3.14б) при доле водорода в топливе $R_H = 25\%$. Исследования для более высоких температур T_k при объемном содержании водорода в топливе $R_H \geq 25\%$ не проводились в целях безопасности работы установки из-за возможного самовоспламенения ТВС внутри горелочного устройства. Представленные результаты показывают, что и для повышенных температур T_k , наблюдается высокий уровень согласования расчетных и опытных данных, за исключением области по коэффициенту избытка топлива $\phi = 1,0 - 1,1$, где расхождение составляет около 5 – 6%.

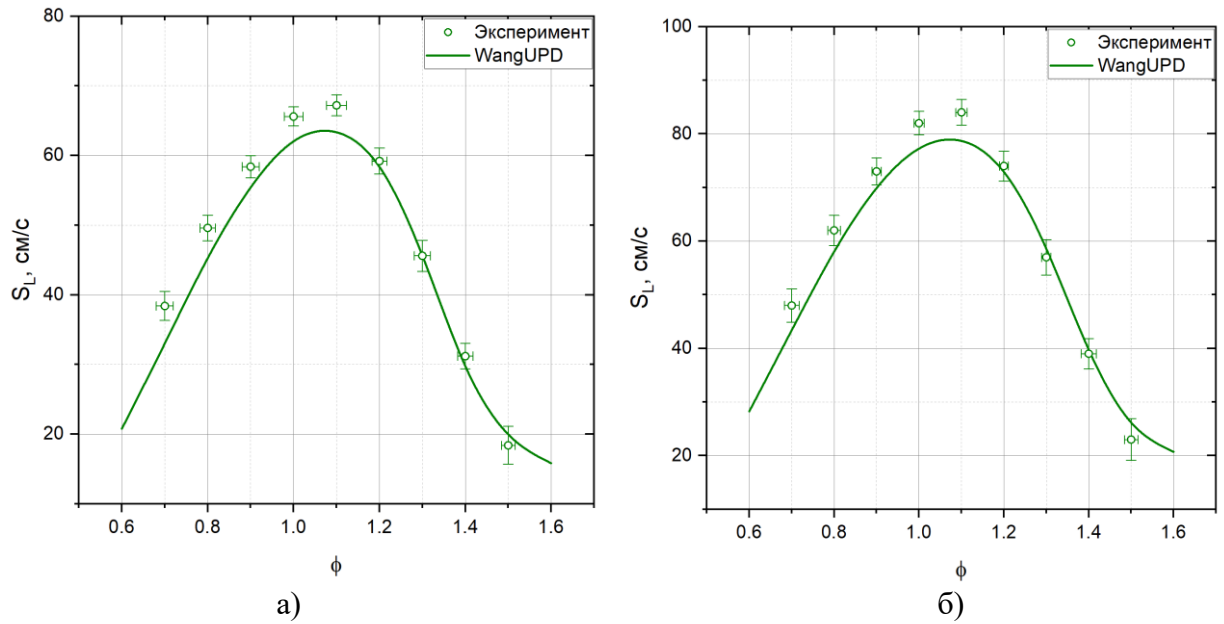


Рисунок 3.14 – Валидация разработанного кинетического механизма по нормальной скорости распространения пламени (S_L) при различных начальных температурах смеси ($P_k = 1$ атм, $R_H = 25\%$)

а) $T_k = 350$ К; б) $T_k = 400$ К

Из-за отсутствия возможности проведения собственных экспериментов по измерению нормальной скорости распространения пламени при повышенных давлениях в ТВС, валидация разработанного кинетического механизма была выполнена на основе опытных данных из работы [214], где в бомбе были проведены исследования по влиянию добавки водорода в метан на нормальную скорость метано-водородно-воздушного пламени при повышенных давлениях. Полученные результаты расчетов по разработанной модели WangUPD и опытные данные [214] отражены на рисунке 3.15 для $P_k = 5$ и 10 атм, $T_k = 360$ К, при объемной доле содержания водорода в топливе $R_H = 50\%$ и $R_H = 70\%$. Анализ представленных данных показывает, что и в случае повышенных до 10 атмосфер давлений отклонение расчетных значений от экспериментальных данных по нормальной скорости распространения пламени не превышает 10% во всем диапазоне изменения коэффициента избытка топлива ϕ .

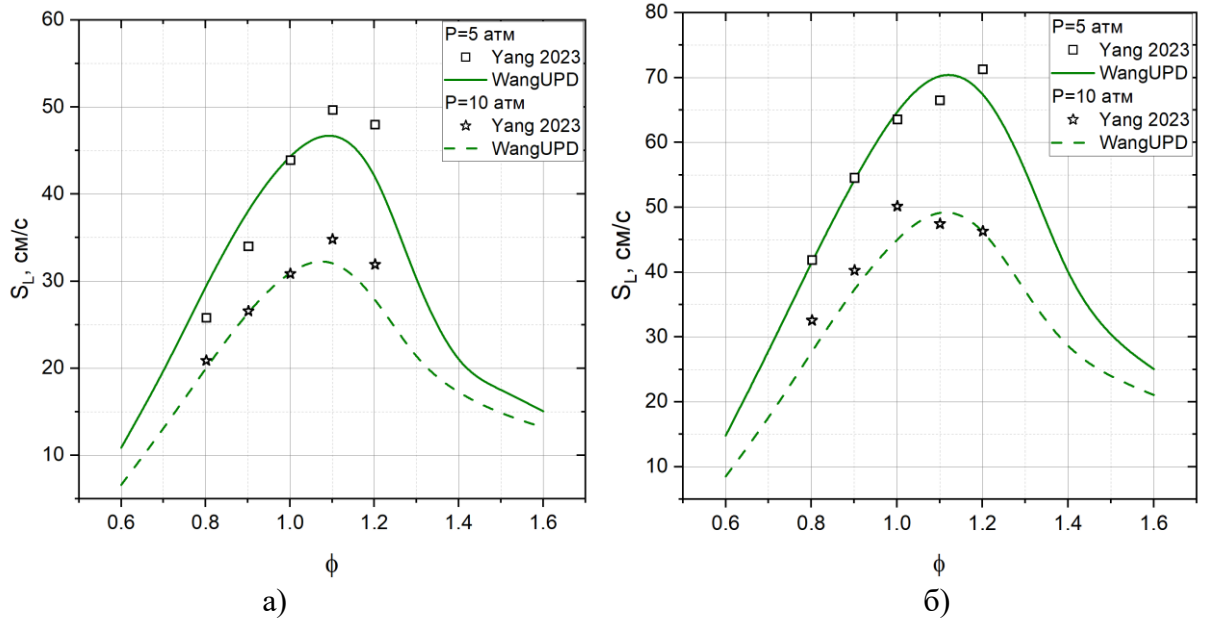


Рисунок 3.15 – Валидация разработанного кинетического механизма по нормальной скорости распространения пламени при различных давлениях

($T_k = 360$ K, $P_k = 5, 10$ атм)

а) $R_H = 50\%$; б) $R_H = 70\%$

Таким образом, проведенная валидация разработанного кинетического механизма WangUPD для различных начальных температур, давлений, коэффициента избытка топлива и объемной доли водорода в топливе показала на хорошее согласование как с опытными данными, представленными различными авторами [46, 62, 73, 78, 113, 214], так и с результатами собственных экспериментальных исследований. Поэтому для дальнейших расчетных исследований в широком диапазоне исследуемых параметров будет применяться разработанный кинетический механизм окисления метано-водородных топлив WangUPD.

3.4 Формирование и валидация зависимостей нормальной скорости распространения пламени от параметров рабочего процесса камер сгорания

Нормальная скорость распространения пламени (S_L), как отмечалось выше, является фундаментальной характеристикой процесса горения ТВС, которая зависит от коэффициента избытка топлива, начальной температуры,

давления и вида топлива. Для каждого конкретного вида топлива величину S_L можно представить в виде функции:

$$S_L = f(T_k, P_k, \phi),$$

где T_k и P_k – начальная температура и давление несгоревшей смеси, ϕ – коэффициент избытка топлива.

Однако, в программных продуктах для численного моделирования (например, ANSYS Fluent и других) данная зависимость представлена в виде константы для всего диапазона значений коэффициента избытка топлива или в виде степенной зависимости, где показатель степени – линейная функция от температуры и давления, что противоречит существующим теоретическим и экспериментальным работам и приводит к большим погрешностям при расчетах. Поэтому рекомендуется представлять значения нормальной скорости распространения пламени используя уравнения, которые будут учитывать все изменения температуры, давления и состава смеси.

Скорость пламени принято задавать в виде следующей зависимости [222]:

$$S_L = S_{L_0} \times \left(\frac{T_k}{T_0}\right)^\alpha \times \left(\frac{P_k}{P_0}\right)^\beta \quad (3.1)$$

где α – показатель степени при температуре; β – показатель степени при давлении; T_k – температура непрореагирующей смеси; P_k – давление непрореагирующей смеси; T_0 , P_0 , S_{L_0} – температура, давление и скорость пламени при нормальных условиях ($T_0 = 273\text{K}$, $P_0 = 1 \text{ атм}$). В работе [222] отмечено, что показатели степени α и β , а также S_{L_0} являются функциями от коэффициента избытка топлива ϕ . Зависимости S_{L_0} , α и β от коэффициента избытка топлива определяются для каждого конкретного вида топлива. В рамках настоящей работы по исследованию процессов горения метано-водородного топлива должна быть решена задача по определению

соответствующих зависимостей для топлив с различным содержанием водорода (R_H).

Для решения поставленной задачи использовался разработанный и валидированный кинетический механизм WangUPD (см. раздел 3.2 – 3.3), включающий 48 компонентов и 312 элементарных реакций. Определение нормальной скорости распространения пламени (S_L) осуществлялось путем моделирования адиабатического одномерного пламени предварительно подготовленной ТВС с использованием программного продукта ANSYS ChemKin [48].

Численное моделирование проводилось при следующих начальных условиях:

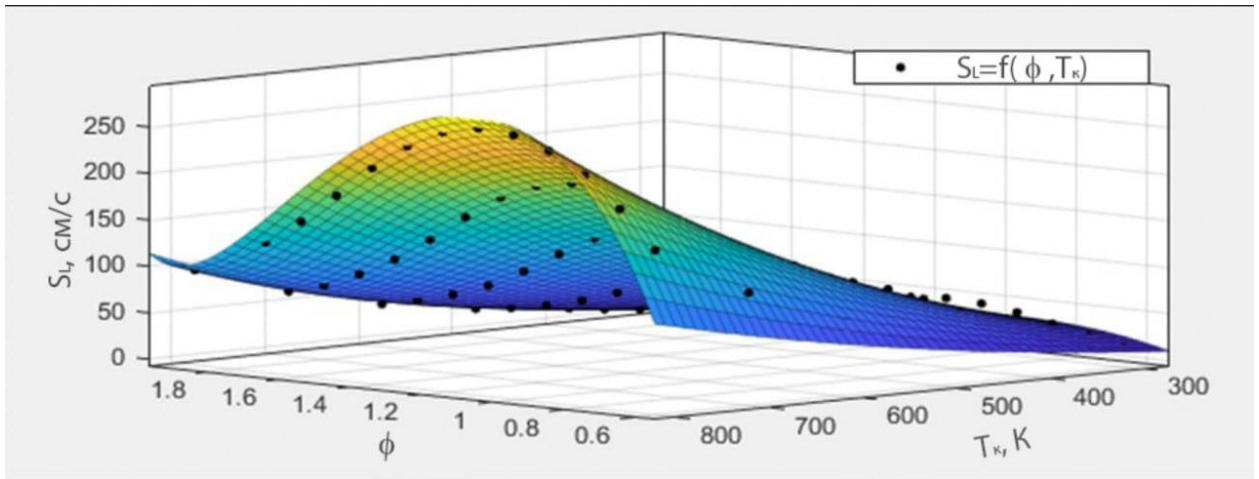
- давление: 1, 2, 5, 10, 20 атмосфер;
- начальная температура ТВС: 300, 400, 500, 600, 700, 800 К;
- $\phi = 0,6 - 2,5$ с шагом 0,1;
- $R_H = 0 - 100\%$ с шагом 5%.

Полученный массив данных по значениям нормальной скорости распространения пламени для каждого вида топлива (в зависимости от доли H_2 в топливе, R_H) был обработан в среде MATLAB для построения изоповерхностей зависимости S_L от коэффициента избытка топлива, давления и температуры (рисунок 3.16). В результате получены уравнения, описывающие зависимости $S_{L_0} = f(\phi)$, $\alpha = f(\phi)$, $\beta = f(\phi)$, для выбранных значений T_0 и P_0 при фиксированном значении R_H топливе. Пример полученных зависимостей для случая добавки водорода в размере $R_H = 30\%$ представлен ниже:

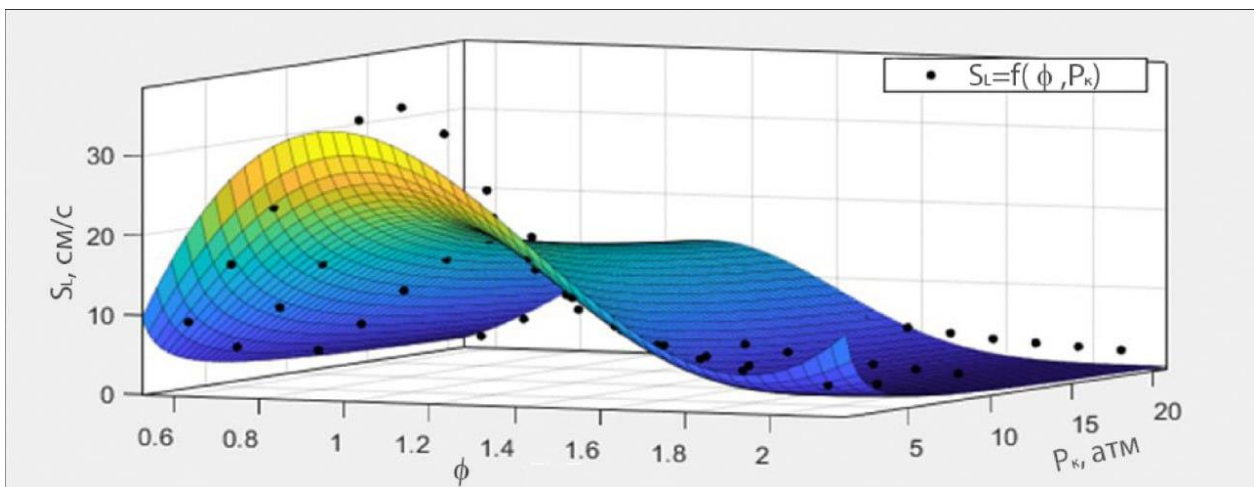
$$S_{L_0} = 66,44\phi^3 - 289,1\phi^2 + 373\phi - 115,4$$

$$\alpha = -0,9016\phi + 0,6209\phi^2 + 2,398$$

$$\beta = 2,357\phi - 1,109\phi^2 - 1,86$$



а)



б)

Рисунок 3.16 – Зависимость S_L от давления, температуры и коэффициента избытка топлива ϕ : а) $T_0 = 300\text{K}$, б) $P_0 = 1\text{ атм}$

Полученные уравнения записываются в виде развернутой формулы (3.1) для нормальной скорости распространения пламени ($R_H = 30\%$):

$$S_L = (66\phi^3 - 289\phi^2 + 373\phi - 115) \left(\frac{T_k}{300}\right)^{-0.9016\phi + 0.6209\phi^2 + 2.398} \left(\frac{P_k}{101325}\right)^{2.357\phi - 1.109\phi^2 - 1.86}.$$

Для других значений R_H в диапазоне от 0 до 100% получен набор аналогичных зависимостей для S_L , которые необходимо использовать для численного моделирования процесса горения метано-водородных топлив различных составов. Данные зависимости представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 Функции для S_{L0} , α , β при $R_H = 0..100\%$

Состав топлива Метан/Водород, %	S_{L0}	α	β
95/5	$63.1\phi^3 - 266.6\phi^2 + 335.6\phi - 103.7$	$-0.8635\phi + 0.6601\phi^2 + 2.315$	$3.767\phi - 1.632\phi^2 - 2.431$
90/10	$64.35\phi^3 - 272.7\phi^2 + 344.2\phi - 106.4$	$-0.8749\phi + 0.6586\phi^2 + 2.329$	$3.412\phi - 1.46\phi^2 - 2.254$
85/15	$60.45\phi^3 - 260.9\phi^2 + 334.3\phi - 103.5$	$-0.7976\phi + 0.5793\phi^2 + 2.341$	$3.417\phi - 1.48\phi^2 - 2.235$
80/20	$62.34\phi^3 - 269.7\phi^2 + 346.4\phi - 107.2$	$-0.7543\phi + 0.5524\phi^2 + 2.32$	$3.117\phi - 1.334\phi^2 - 2.088$
75/25	$64.49\phi^3 - 279.8\phi^2 + 360.1\phi - 111.4$	$-0.8611\phi + 0.6052\phi^2 + 2.372$	$2.894\phi - 1.222\phi^2 - 1.98$
70/30	$66.44\phi^3 - 289.1\phi^2 + 373\phi - 115.4$	$-0.9016\phi + 0.6209\phi^2 + 2.398$	$2.357\phi - 1.109\phi^2 - 1.86$
60/40	$62.93\phi^3 - 281.6\phi^2 + 372.3\phi - 114.8$	$-0.7541\phi + 0.4984\phi^2 + 2.389$	$2.561\phi - 1.15\phi^2 - 1.87$
50/50	$59.42\phi^3 - 274.2\phi^2 + 371.5\phi - 114.3$	$-0.6065\phi + 0.3759\phi^2 + 2.379$	$2.765\phi - 1.191\phi^2 - 1.873$
40/60	$85.4\phi^3 - 408.2\phi^2 + 570.9\phi - 175$	$-0.219\phi + 0.1522\phi^2 + 1.776$	$3.635\phi - 1.588\phi^2 - 2.526$
35/65	$53.86\phi^3 - 273.3\phi^2 + 398.4\phi - 120.9$	$-1.173\phi + 0.552\phi^2 + 2.824$	$2.321\phi - 0.9971\phi^2 - 1.595$
30/70	$54.6\phi^3 - 284.9\phi^2 + 428.1\phi - 128.5$	$-0.3304\phi + 0.1463\phi^2 + 2.388$	$2.341\phi - 1.009\phi^2 - 1.609$
25/75	$62.68\phi^3 - 330.8\phi^2 + 501.6\phi - 150.9$	$-0.4267\phi + 0.2146\phi^2 + 2.374$	$2.16\phi - 0.9108\phi^2 - 1.538$
20/80	$70.96\phi^3 - 379.3\phi^2 + 580.9\phi - 175.6$	$-0.5987\phi + 0.3147\phi^2 + 2.395$	$2.028\phi - 0.8329\phi^2 - 1.496$
15/85	$78.74\phi^3 - 426.6\phi^2 + 660.9\phi - 200.9$	$-0.7351\phi + 0.3931\phi^2 + 2.4$	$1.945\phi - 0.7787\phi^2 - 1.475$
10/90	$85.31\phi^3 - 483\phi^2 + 777.7\phi - 238$	$-0.9539\phi + 0.4919\phi^2 + 2.421$	$1.774\phi - 0.6824\phi^2 - 1.401$
0/100	$-0.3263\phi^3 - 119.4\phi^2 + 429.9\phi - 116.9$	$-1.302\phi + 0.3713\phi^2 + 2.851$	$0.7957\phi - 0.2668\phi^2 - 0.6729$

Способность сформированных моделей (см. таблицу 3.3) прогнозировать нормальную скорость распространения пламени метано-водородных топливных смесей оценивалась по экспериментальным данным из работ различных авторов [73,78,80,105,108,113,172,173], где были измерены значения S_L для смесей с долей водорода в топливе R_H до 50%.

На рисунке 3.6 представлены графики зависимости скорости пламени при нормальных условиях от процентного содержания водорода (R_H), для следующих составов смеси $\phi=0.7$ и $\phi=1.4$.

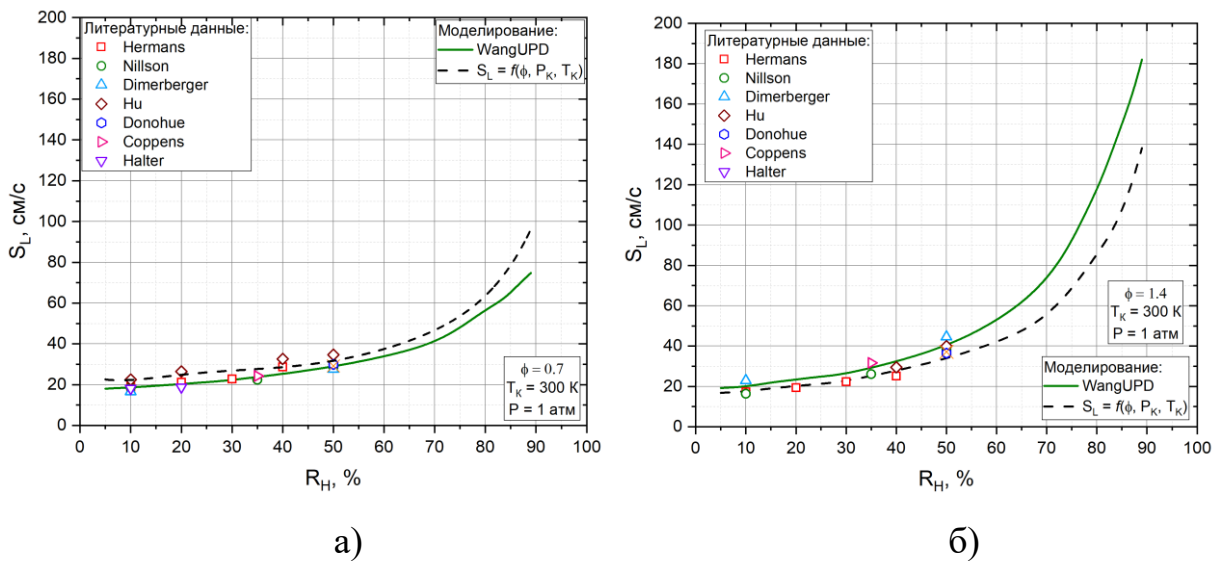


Рисунок 3.20 – Зависимость нормальной скорости распространения пламени (S_L) от объемной доли водорода (R_H):

а) $\phi=0.7$, б) $\phi=1.4$

Из представленных графиков видно, что полученные зависимости $S_L = f(T_k, P_k, \phi)$ (см. таблицу 3.3) хорошо согласуются с результатами расчета по модели WangUPD, а также – с экспериментальными данными из работ различных авторов.

Заключение по третьей главе

В результате проделанной работы на основе базовой модели Wang2018 был разработан кинетический механизм окисления метано-водородных топлив WangUPD, который валидирован с использованием

экспериментальных данных по нормальной скорости распространения пламени (S_L), полученных на установке Heat Flux научно-образовательного центра газодинамических исследований Самарского университета им. Королева, а также опытных данных других авторов.

Разработанный кинетический механизм WangUPD был применен для расчета нормальной скорости распространения пламени в широком диапазоне начальных температур, давлений, коэффициентов избытка топлива (ϕ) и содержания водорода в топливе (R_H). Полученные результаты вычислений использовались для аппроксимации нормальной скорости распространения пламени в виде развернутой формулы (3.1).

Проведенные исследования позволили сформировать рекомендации по формированию математической модели для расчета процессов горения метано-водородных топлив в рамках которых распространение фронта пламени определяется по уточненной зависимости $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$, что позволит более точно определить такие нестационарные явления рабочего процесса камер сгорания газотурбинных установок как проскок пламени.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ПРОСКОКА ПЛАМЕНИ В ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКОЙ МЕТАНО-ВОДОРОДО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

4.1 Экспериментальное исследование границ проскока пламени в горелочном устройстве с предварительной подготовкой метано-водородо-воздушной смеси и закруткой потока

В соответствии с поставленной задачей работы было проведено экспериментальное исследование границ проскока пламени при использовании метано-водородного топлива в горелочном устройстве с предварительной подготовкой ТВС и закруткой потока. Горелочное устройство с соответствующими системами подачи, регулировки и измерения расходов топлива и воздуха подробно описаны в разделе 2.4. Данное горелочное устройство является упрощенной моделью типового элемента фронтального устройства КС авиационных ГТД и созданных на их основе газотурбинных установок. Опыты проводились при атмосферном давлении и температуре смеси на входе в горелку $T_k = 373$ К. Расход воздуха изменялся в диапазоне $G_v = 6 - 9$ г/с, что обеспечивало приведенную среднерасходную скорость на срезе сопла горелки $\lambda_k = 0,06 - 0,09$. Доля водорода в метано-водородном топливе изменялась в диапазоне $R_H = 40 - 100\%$.

Методика проведения эксперимента

Для формирования более точного массива измеренных данных использовалась измерительная система, в которую включены датчики избыточного и дифференциального давления, термопары и расходомеры-регуляторы. Все приборы подключены к модулю дискретного ввода (Ethernet) MB210 фирмы ОВЕН, каждый из которых может считывать значения с 8 каналов ввода (рисунок 4.1).

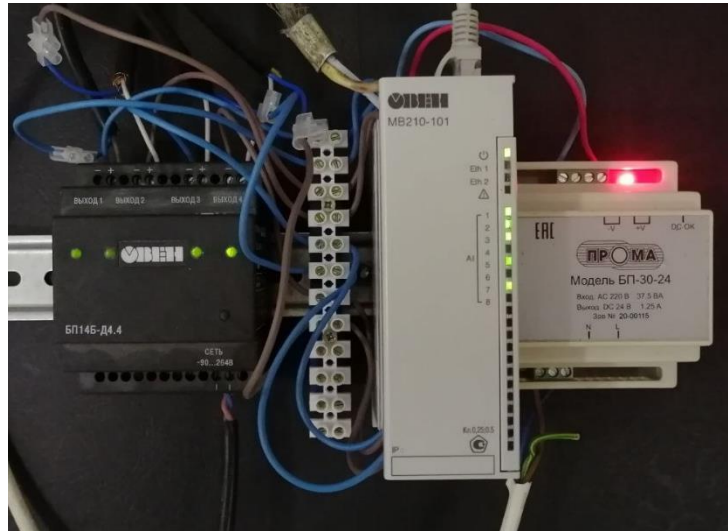


Рисунок 4.1– Система обработки замеренных параметров

Для фиксации и сбора данных в режиме реального времени установлена программа MASTER SCADA, с помощью которой ведется непрерывная запись данных на модуль ввода MB210-101 (рисунок 4.2).

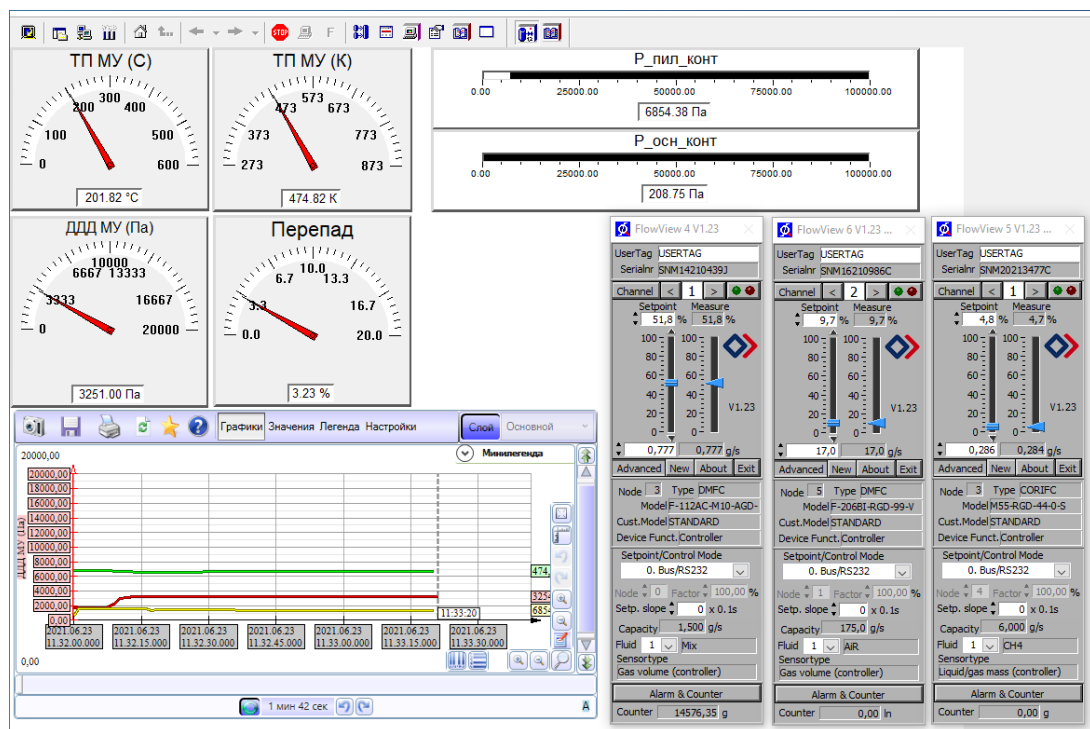


Рисунок 4.2 – Программа для фиксации и сбора данных в режиме реального времени

Используя данные, полученные в течение выбранного периода времени, формируется массив значений измеренных величин, затем выполняется их математическая обработка и полученные результаты вносятся в протокол испытаний.

При определении границ проскока пламени при использовании метано-водородных топлив важным фактором является поддержание требуемого соотношения (R_H) между расходами водорода и метана (или природного газа) при постоянном изменении их расходов до фиксации момента проскока пламени в горелочное устройство. Данная задача решена путем применения расходомеров-регуляторов для каждого из компонентов используемого топлива, у которых есть возможность выбрать режим «Ведущий-ведомый» для нескольких групп расходомеров. Задав требуемое соотношение между расходами водорода и метана (R_H), далее расходомеры-регуляторы поддерживают его в автоматическом режиме при изменении расхода одного из компонентов.

Методика проведения экспериментов (для одного из режимов) заключается в следующем:

- 1) на вход в горелочное устройство подается воздух заданной температуры T_k , и производится прогрев элементов экспериментальной установки;
- 2) после достижения устойчивого режима по температуре и расходу воздуха включается свеча зажигания и подача топлива, происходит розжиг ТВС;
- 3) после розжига производится контроль параметров по температуре воздуха на входе в установку (зеленая линия на мониторе, см. рис. 4.3), по температуре (синяя линия на мониторе) на участке до завихрителя (при проскоке пламени в эту зону и резком скачке температуры происходит автоматическое аварийное отключение подачи топлива) и перепаду давления на горелочном устройстве (красная линия на мониторе, см. рис. 4.3);
- 4) затем плавно увеличивается расход метано-водородного топлива, в диапазоне составов смеси до проскока пламени в горелочное устройство наблюдается стабильное горение в следе за горелочным устройством (рисунок 4.4a);

5) при дальнейшем увеличении расхода метано-водородного топлива структура пламени меняется, пламя проходит внутрь через узкое сечение сопла горелочного устройства (рисунок 4.4б), проскок пламени фиксируется визуально через подключенную высокоскоростную камеру, которая в реальном времени отображает процесс горения;

6) при проскоке пламени производится фиксация мгновенных значений расходов воздуха, метана и водорода;

7) включается отсечной клапан подачи топлива, вся магистраль и установка продуваются воздухом.

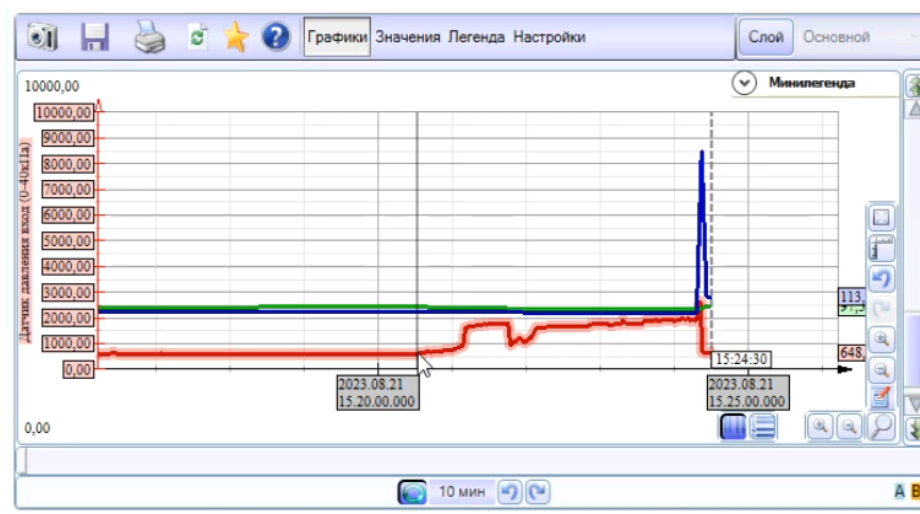


Рисунок 4.3 – График изменения температуры воздуха на входе, температуры на участке до завихрителя и перепада давления

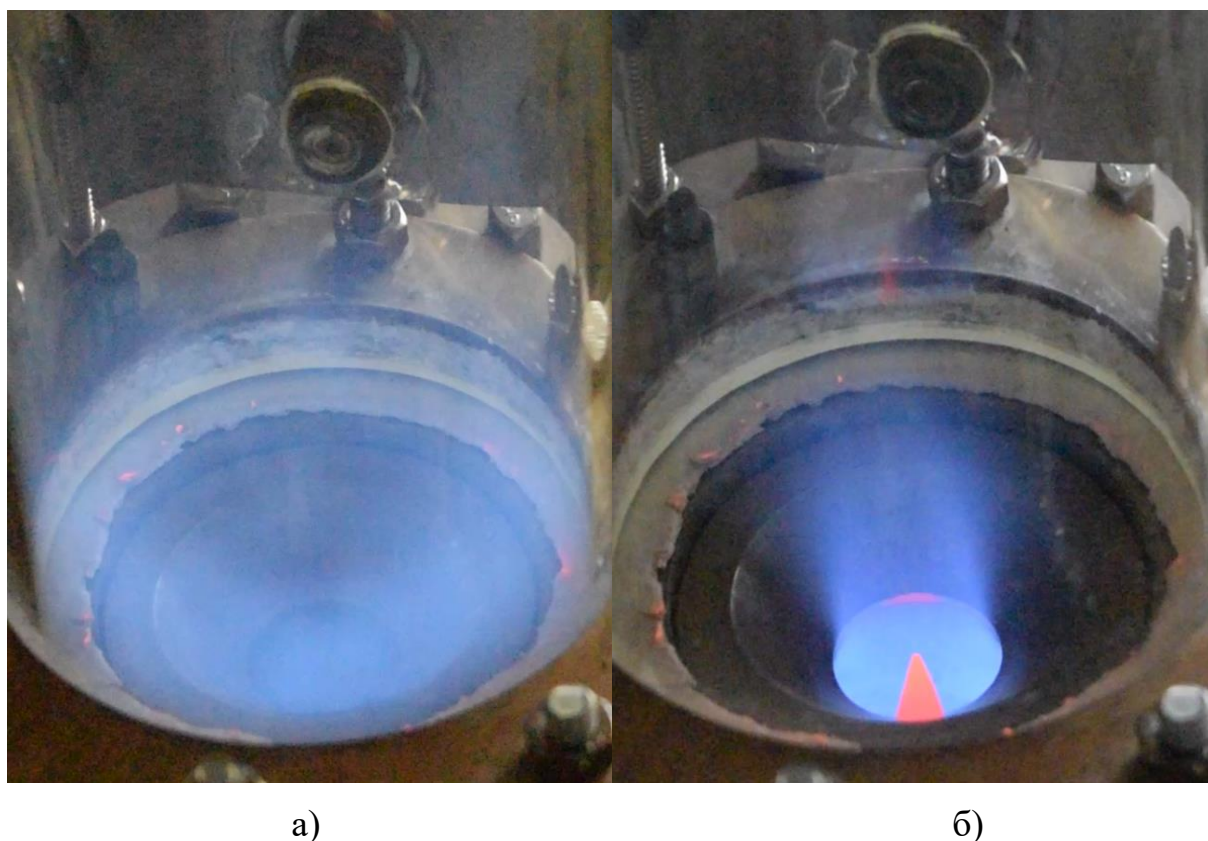


Рисунок 4.4 – Визуализация процесса горения в исследуемом горелочном устройстве:

а) устойчивое горение, б) горение при проскоке пламени

Для проведения оценки влияния скорости выхода на режим проскока пламени при увеличении расхода топлива (G_T , г/с) были проведены опыты с пошаговым изменением G_T на минимальную величину ($\Delta G_T = 0,1$ г/с) с последующей выдержкой режима на каждом шаге в течение времени t , которое изменялось от 10 до 90 с. Расход воздуха составлял $G_B = 7,6$ г/с; $T_k = 373$ К; $R_H = 60\%$. Представленные на рисунке 4.5а результаты показывают, что в исследуемом диапазоне параметров рабочего процесса скорость изменения режима работы горелочного устройства по составу ТВС не влияет на границу проскока пламени. Это свидетельствует о газодинамической природе явления проскока пламени, а не о калильном воспламенении от нагретого тела.

Также проведена статистическая оценка погрешности определения границы проскока пламени ($\alpha_{пр}$) по предложенной выше методике. Проскок пламени определялся для режима работы горелочного устройства со следующими параметрами: $G_B = 7,6$ г/с; $T_k = 373$ К; $R_H = 60\%$. Анализ проведен

по результатам 10 измерений (рисунок 4.5б). Среднее значение коэффициента избытка воздуха ($\alpha_{пр}$) при проскоке пламени составило $\alpha_{пр} = 1,924$. Среднеквадратичное отклонение σ , которое вычисляется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2}{n}},$$

составило $\sigma = 0,047$. Максимальное отклонение – 0,091. Таким образом отработанная методика позволяет с удовлетворительной степенью достоверности проводить дальнейшие исследования по определению проскока пламени [15, 16, 119].

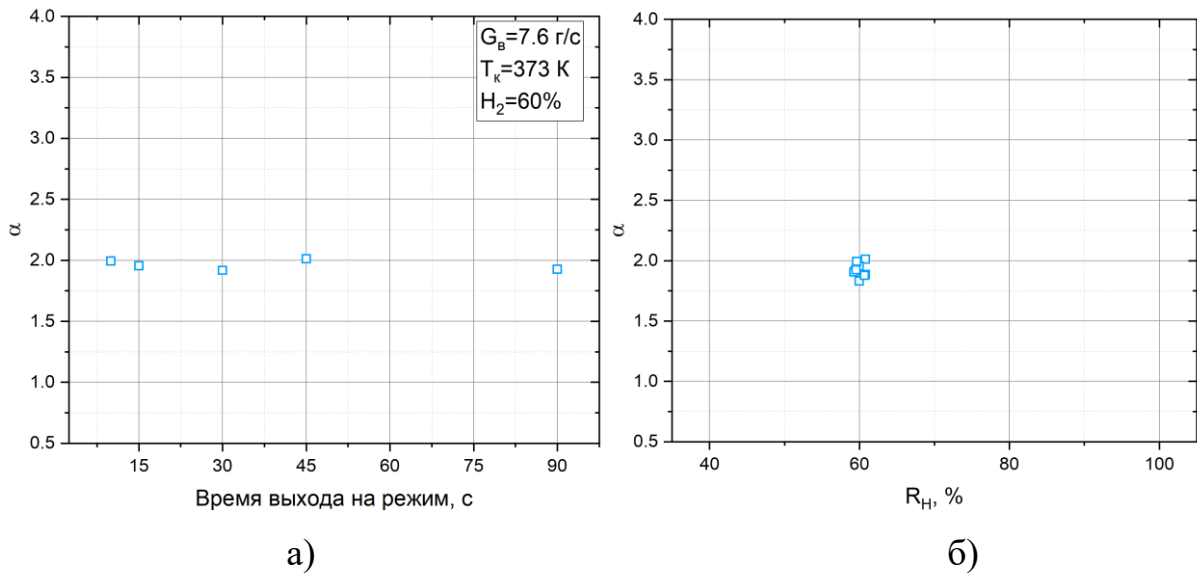


Рисунок 4.5 – Влияние скорости выхода на режим проскока пламени (а) и статистическая оценка погрешности измерения $\alpha_{пр}$ (б) при $G_B = 7,6$ г/с; $T_K = 373$ К; $R_H = 60\%$

На основе отработанной методики проводилось более детальное экспериментальное исследование по определению зависимостей проскока пламени от расходных характеристик горелки и состава метано-водородного топлива для R_H от 40 до 100% (рисунок 4.6).

Из результатов, представленных на рисунке 4.6, видно, что изменение доли водорода в топливе R_H от 40 до 100% приводит к практически пропорциональному увеличению коэффициента избытка воздуха ($\alpha_{пр}$), при котором наблюдается проскок пламени (примерно в 2,7 раза). С увеличением

приведенной скорости λ_k от 0,6 до 0,9 значение коэффициента избытка воздуха при проскоке пламени ($\alpha_{пр}$) уменьшается примерно на 15%. Таким образом, изменение доли водорода в топливе оказывает большее влияние на проскок пламени, чем варьирование приведенной скорости потока в указанных диапазонах.

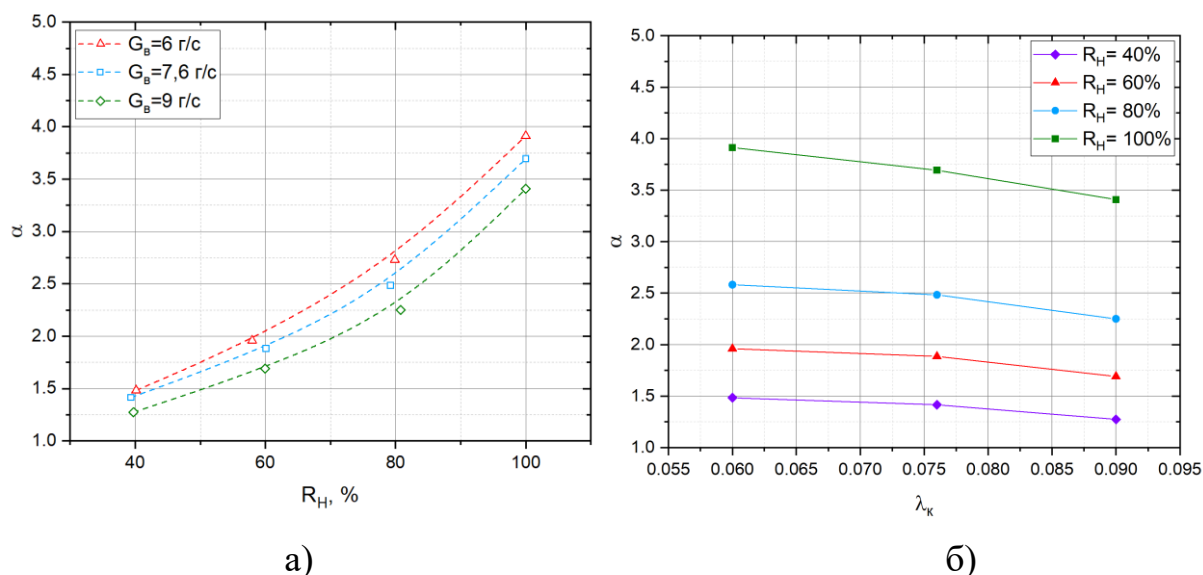


Рисунок 4.6 – Влияние режимных параметров горелочного устройства на проскок пламени

При визуализации процессов проскока пламени обнаружено явление нагрева центрального тела (см. рисунок 4.4), которое может влиять на параметры проскока по коэффициенту избытка воздуха ($\alpha_{пр}$). Для исключения этого фактора было проведено дополнительное исследование горелочного устройства (режим работы: $G_B = 7,6$ г/с, $T_K = 373$ К, $P_K = 1$ атм) для двух вариантов конструктивных решений: с центральным телом и без центрального тела. Из представленных на рисунке 4.7 результатов опытов видно, что при доле водорода в топливе до 80% для обоих вариантов конструкций горелочного устройства значения $\alpha_{пр}$ хорошо согласуются между собой. При $R_H = 100\%$ на горелочном устройстве с центральным телом обнаружен проскок пламени при коэффициенте избытка воздуха, имеющем на 15% большее значение, чем в случае горелочного устройства без центрального тела. Это обстоятельство требует дополнительных исследований. Вместе с тем для всего спектра составов метано-водородных топлив можно сделать вывод, что

подобные конструктивные элементы (центральное тело, не загромождающее выход из сопла горелки) практически не влияют на изменение границ проскока пламени ($\alpha_{пр}$).

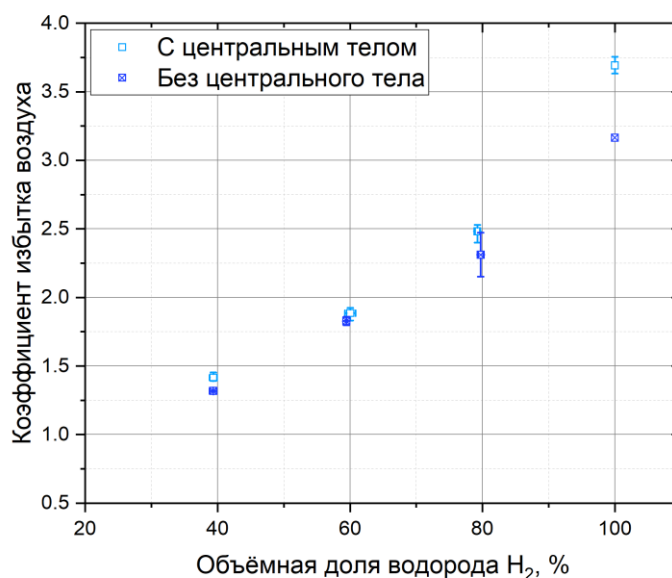


Рисунок 4.7 – Влияние геометрических параметров горелочного устройства на проскок пламени

Обобщая представленные экспериментальные результаты, можно заключить, что для типовых горелочных устройств КС ГТУ с предварительной подготовкой ТВС и закруткой потока при использовании метано-водородных топлив границы проскока пламени в значительной степени определяются долей водорода в топливе (R_H), а также режимными параметрами, такими как: среднерасходная скорость на срезе сопла горелки (λ_k) и характеристики закрученного потока на выходе из горелки.

4.2 Математическая модель для определения проскока пламени при горении метано-водородных топлив

Расчет течения и горения газовых смесей основан на решении системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса и соответствующих замыкающих соотношений. В основе системы уравнений лежат законы сохранения массы, импульса и энергии в сплошной среде. Также для

моделирования процессов горения газообразного топлива в работе использовались следующие математические модели:

1. Модель турбулентного течения смеси газов.
2. Модель турбулентного горения газообразного топлива.
3. Модель радиационного теплообмена.
4. Модель, описывающая изменение свойств среды.

Моделирование турбулентности

Для моделирования турбулентных течений в работе использовалось два метода. Первый из них – это метод решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). В данном методе мгновенные значения параметров потока представляются в виде суммы осредненного параметра потока и его пульсационной составляющей. Вследствие процедуры осреднения появляются новые незамкнутые корреляции (рейнольдсовы напряжения), которые требуют моделирования. Для замыкания уравнений напряжений Рейнольдса обычно используются однопараметрические (Spalart Almaras), двухпараметрические (k-epsilon, k-omega) и более (Reynolds Stress) модели турбулентности. В данной работе использовалась модель турбулентности Reynolds-Stress Model (RSM), которая не использует предположение об изотропности турбулентной вязкости, а для замыкания уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, решает уравнения переноса для рейнольдсовых напряжений совместно с уравнением для скорости турбулентной диссипации ϵ . Так как модель RSM описывает эффекты кривизны, закрученности, вращения, резкого изменения напряжений между слоями более строго, чем одно- и двухпараметрические модели турбулентности, то она имеет больший потенциал для более точного расчета сложных потоков.

Вторым подходом к моделированию турбулентных течений является метод моделирования крупных вихрей (LES), который позволяет разрешить наиболее крупные вихри, содержащие основную часть турбулентной

кинетической энергии, и смоделировать мелкомасштабные вихри. Главной предпосылкой служит то, что основную часть энергии несут крупные вихри, а мелкие вихри близки к изотропным и являются наиболее универсальными, поддающимися моделированию. Основные уравнения, применяемые в LES, базируются на фильтрации нестационарных уравнений Навье-Стокса по волновому числу или конечному пространственному размеру. Тем самым отфильтровываются масштабы вихрей, размер которых меньше размера применяемого фильтра. Все параметры, действующие в масштабах, меньше размеров сетки, называются подсеточными. Особенно важно адекватное подсеточное моделирование при исследовании процессов смешения.

Модель горения

Для расчета горения в Ansys Fluent имеется несколько моделей горения: Finite-Rate, Eddy Dissipation и Flamelet Generated Manifold (FGM). Рассмотрим последнюю модель подробнее.

Flamelet Generated Manifold (FGM) представляет собой метод, который основан на идее, что необходимо учитывать наиболее важные аспекты внутренней структуры фронта пламени. С этой точки зрения низкоразмерное химическое многообразие создается на основе одномерных структур пламени, включая почти все транспортные и химические явления, наблюдаемые в трехмерном пламени. Кроме того, распространение пламени обычно описывается уравнениями переноса для ограниченного числа управляющих переменных.

Flamelet Generated Manifold (FGM) можно рассматривать как комбинацию классического подхода flamelet с подходом manifold. Турбулентное пламя действительно рассматривается как совокупность одномерных пламен, однако они используются для построения низкоразмерного многообразия в композиционном пространстве и базы данных соответствующих теплехимических переменных. Поскольку конвективные и диффузионные явления переноса полностью учитываются при решении одномерных пламен, этот метод обеспечивает большую

точность, чем другие подходы, основанные на локальном химическом равновесии, и в то же время требует ограниченного числа управляющих переменных для описания процесса горения. В данной работе использована модель горения FGM с разработанным кинетическим механизмом WangUPD.

Учет скорости распространения ламинарного пламени

Водород имеет высокую реакционную способность, вследствие чего его скорость ламинарного пламени существенно выше, чем у обычных углеводородных топлив. Следовательно, при добавлении водорода к метану или другому углеводородному топливу скорость распространения ламинарного пламени заметно повышается.

В главе 3 на основе обобщения результатов расчетно-экспериментальных исследований сформированы зависимости вида: $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$, где T_k и P_k – температура и давление топливовоздушной смеси на входе в горелочное устройство, ϕ – коэффициент избытка топлива ($\phi = 1/\alpha$).

В программных продуктах для численного моделирования, типа ANSYS Fluent, зависимость нормальной скорости распространения пламени от температуры и давления задается константой для всего диапазона α или в виде степенной зависимости, где показатель степени – линейная функция от состава смеси, что противоречит существующим теоретическим и экспериментальным представлениям и приводит к погрешности при расчетах.

В работе проводилось сравнение нормальной скорости распространения пламени рассчитанная при помощи программного пакета ANSYS FLUENT относительно реальных скоростей, полученных в Chemkin и аппроксимированных в формулу, точность которой описана в главе 3. Полученные результаты представлены в виде графиков изменения нормальной скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха с выделением границ проскока пламени, полученных из обобщения экспериментальных данных раздела 4.2 (рисунок 4.8). На основе представленных данных видно, что для области, соответствующей области проскока пламени, значения скорости пламени, полученные из численного

пакета Ansys, существенно занижены относительно реальных скоростей. Для области проскока пламени ламинарная скорость пламени, рассчитанная по предложенной зависимости, для всего диапазона R_H составляет порядка 50 см/с. В то время как для CFD скорость пламени существенно ниже и отклонение достигает 100%. Соответственно, использование стандартной скорости распространения пламени при численном моделировании может привести к неверному определению характеристик проскока. На основании этих результатов можно сделать предположение, модель скорости распространения пламени, полученная при использовании в Ansys Fluent не работает. Поэтому для верного определения проскока пламени при численном моделировании необходимо закладывать при расчетах полученные зависимости нормальной скорости распространения пламени $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$.

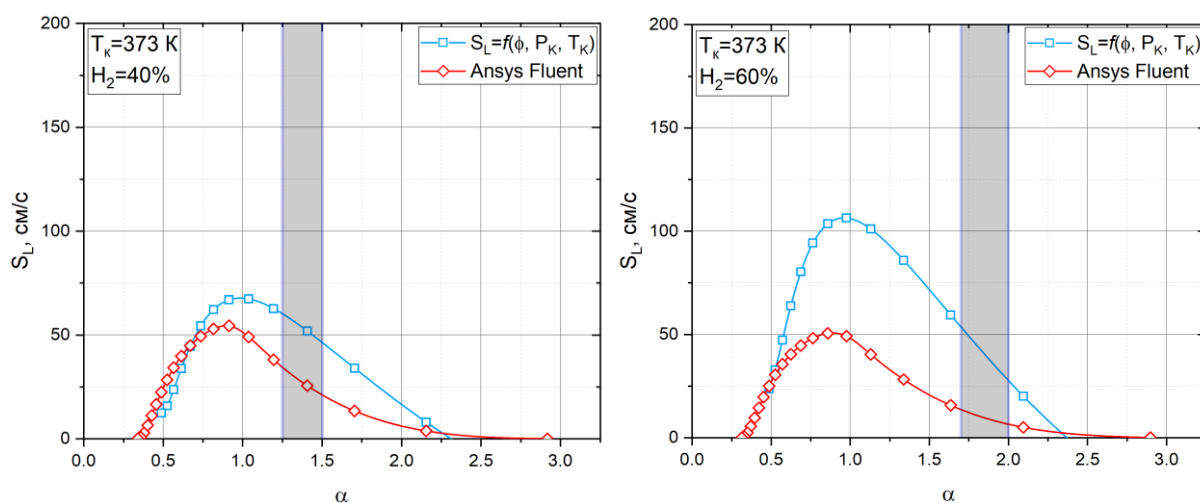


Рисунок 4.8 – Поле распределения значений скорости реакций:

а) по исходной модели б) по уточненной модели

Для этого необходимо задать скорость распространения пламени, используя пользовательские функции (User Defined Function).

Создание пользовательской функции для расчета нормальной скорости распространения пламени, зависящей от давления и температуры, и ее использование в CFD решатель проводилось для метано-водородных смесей с различным содержанием водорода. Общий вид пользовательской функции представлен на рисунке 4.9

```

1  #include "udf.h" 1
2  #include <pdf_props.h>
3
4  DEFINE_PROPERTY(user_LaminarFlameSpeed, cell, thread) 2
5  {
6      real fi, sl, z, Pk, Tk, Tt, Tv, sl0, T, P, ST, SP; 3
7
8      Pk = 400000; /*Задание давления в камере*/
9      Tt = 305; /*Задание температуры топлива на входе*/ 4
10     Tv = 703; /*Задание температуры воздуха на входе*/
11
12     z = C_FMEAN(cell, thread); /*Присвоение переменной z концентрации топлива*/ 5
13
14     Tk = Tv - z*(Tv - Tt); /*Вычисление температуры реагентов*/ 6
15
16     P = Pk / 101325; /*Вычисление компонент формулы*/ 7
17     T = Tk / 800; /*Вычисление компонент формулы*/
18
19     {if (0.005767 > z) /*Границы горения по z*/
20         sl = 0;
21     else if (z > 0.1620207)
22         sl = 0; 8
23
24     else
25         fi = (17.24*z) / (1 - z); /*Вычисление коэффициента избытка топлива и СРЛП*/
26         ST = 7.6 - 10.8*fi + 5.1*pow(fi, 2);
27         SP = -0.966 + 1.1*fi - 0.4715*pow(fi, 2);
28         sl0 = 145 * pow(fi, 3) - 850 * pow(fi, 2) + 1265 * fi - 325; 9
29         sl = 0.01*pow(T, ST)*pow(P, SP)*sl0;
30     }
31     return sl; 10
32 }

```

Рисунок 4.9 – Общий вид пользовательской функции для вычисления скорости распространения пламени

Далее приведено описание команд, входящих в пользовательскую функцию:

Команда 1 в данном макросе подключает библиотеку *UDF.h*, содержащую основные функции, используемые в программном пакете Fluent. Команда 2 представляет собой ссылку на используемую функцию, которая описана в подключенной библиотеке *UDF.h*. В скобках указывается название макроса и аргументы, которые в нем используются. В строке 3 описываются переменные, которые будут использованы в макросе. В блоке 4 переменным P_k , T_t , T_v присваиваются значения, соответствующие режиму работы камеры сгорания. Команда 5 представляет собой присвоение переменной z значения восстановленной концентрации топлива в ячейке. Команда 6 выполняет вычисление температуры компонентов ТВС по линейному закону в зависимости от концентрации топлива, и результат вычисления присваивается переменной T_k . Команда 7 выполняет вычисление значений относительных температур и давлений, необходимых для вычисления скорости пламени. Результат присваивается переменным P и T . В блоке 8 макроса задаются концентрационные пределы горения. При выходе значений z из данного

интервала процесс горения не осуществляется, а значит, скорость распространения пламени равна 0. Если же состав топлива удовлетворяет условиям, описанным выше, то вычисляется скорость пламени по формулам в блоке 9. После вычисления команда 10 возвращает в расчет вычисленную величину S_L .

4.3 Обработка метода определения проскока пламени в горелочном устройстве с предварительной подготовкой метано-водородо-воздушной смеси и закруткой потока

Для валидации разработанной математической модели проскока пламени при горении метано-водородных топлив было проведено расчетно-экспериментальное исследование определения границы проскока пламени в горелочном устройстве с предварительной подготовкой ТВС и закруткой потока (см. рис. 2.20–2.22). Данное горелочное устройство является упрощенной моделью типового элемента фронтального устройства КС авиационных ГТД и созданных на их основе газотурбинных установок. Режимы работы горелочного устройства и соответствующие полученные опытные данные были взяты из результатов экспериментальных исследований, описанных в разделе 4.1.

Для проведения численных расчетов была создана геометрическая модель исследуемого горелочного устройства на основе реальной конструкции экспериментальной установки, подробно описанной в главе 2. На базе созданной геометрической модели горелочного устройства построена соответствующая сеточная модель.

Сеточная модель

Сеточная модель была построена в ANSYS Fluent Mesher (рисунок 4.10). Трехмерная геометрическая модель расчетной области имеет цилиндрические формы, поэтому в данной задаче применено разбиение расчетной области на два типа элементов: в центре потока элементы представляют собой гексаэдры (6 граней), в пристеночном слое область состоит из полиэдрических 8-гранных

элементов. Так как в данной задаче необходимо достаточно точно отслеживать положение фронта пламени, в предполагаемой зоне тепловыделения, а также в области плохообтекаемого тела выполнено локальное измельчение элементов. При генерации сеточной модели важным параметром качества сетки является коэффициент скошенности, показывающий, насколько отдельный элемент отличается от своей правильной формы (например, правильным гексаэдром является куб). Принято, что для газодинамических расчетов значение данного параметра не должно превышать 0,96. В результате построения конечно-объемной модели максимальное значение параметра скошенности составило 0,93. Это является приемлемым для дальнейших расчетов. Размер элементов в предполагаемой области формирования фронта пламени составляет 0,8 мм.

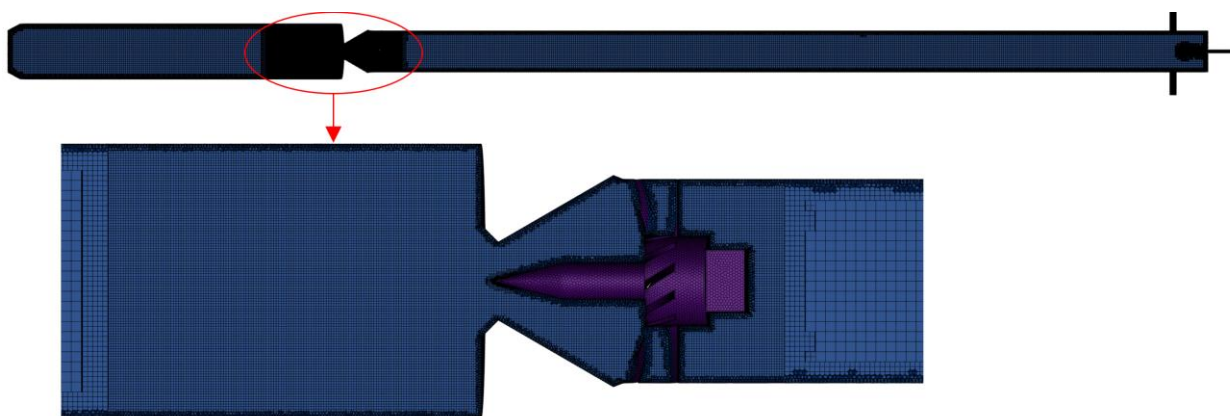


Рисунок 4.10 – Сеточная модель расчетной области для определения проскока пламени в горелочном устройстве

С учетом проведенных исследований сеточной зависимости суммарное количество элементов в модели составило порядка 6 миллионов элементов.

Граничные условия

Моделирование проскока пламени в горелочном устройстве с предварительной подготовкой метано-водородо-воздушной смеси и закруткой потока проводилось при различной объемной доле содержания водорода в топливе R_H . Исходные режимные параметры работы горелочного устройства

для расчета: температура на входе в горелочное устройство $T_k = 373$ К, расход воздуха $G_B = 7,6$ г/с, атмосферное давление, коэффициент избытка воздуха изменялся от режима устойчивого горения до фиксации явления проскока пламени. Численное моделирование выполнено с использованием расчетного модуля ANSYS Fluent 21.R2. Более подробно исходные данные для расчетов процессов горения представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры расчетных режимов

R_H	Температура воздуха на входе в КС T_k^* , К	Давление на входе в КС p_k , Па	Расход воздуха, G_B , г/с	Изменение коэффициента избытка воздуха, α	Стехиометрический коэффициент, L_0
40	373	101325	7,6	От 1,75 до 1	18,69
60				От 2,5 до 1,25	19,94
80				От 2,75 до 1,5	22,94
100				От 4 до 2	34,30

При моделировании проскока пламени в горелочном устройстве коэффициент избытка воздуха (α) изменялся последовательно, путем повышения расхода топлива при заданном фиксированном значении R_H . Критериями сходимости были суммарный расход, восстановленная концентрация топлива и температура на выходе. Проскок фиксировался по наличию тепловыделения и изменению значения полноты сгорания внутри горелочного устройства между лопатками завихрителя и выходным соплом (рисунок 4.11).

Результаты моделирования процессов горения в горелочном устройстве с закруткой потока

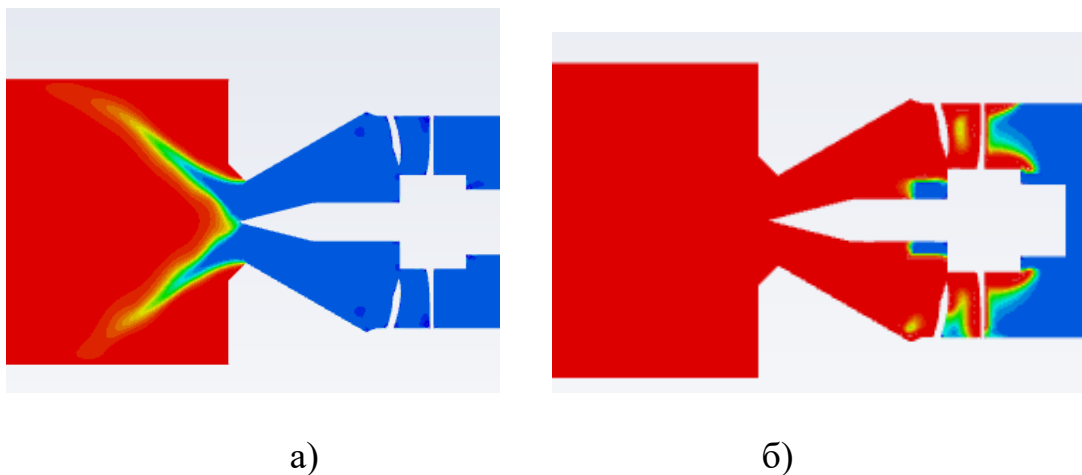
На первом этапе проведено численное моделирование проскока пламени в горелочном устройстве в стационарной постановке (RANS) с использованием модели турбулентно-химического взаимодействия Peters, в которой скорость турбулентного пламени рассчитывается по формуле [104]:

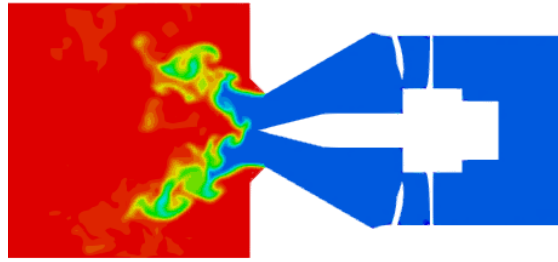
$$S_t = A(u')^{3/4} S_L^{1/2} \alpha^{-1/4} l_t^{1/4},$$

где: A – константа; u' – пульсация скорости; S_L – нормальная скорость пламени; α – коэффициент диффузии; l_t – масштаб турбулентности.

Константы для данной модели при горении метано-водородных топлив взяты из работы [104], а нормальная скорость распространения пламени (S_L) задана с помощью пользовательской функции ($UDF.h$), описанной ранее в разделе 4.2. Для каждого значения доли водорода в топливе (R_H) величина S_L вычислялась по разработанным в главе 3 зависимостям $S_L = f(\varphi, T, p)$, которые представлены в таблице 3.3.

В результате моделирования процессов горения в горелочном устройстве получены поля распределения температур при стабильном горении и при проскоке пламени в стационарной и нестационарной постановках (рисунок 4.11). Из рисунка видно, что в горелочном устройстве имеется зона стабилизации пламени в районе вершины конического насадка. Этот факт подтверждается как расчетами в стационарной (RANS) постановке (рисунок 4.11а), так и расчетами в нестационарной (LES) постановке (рисунок 4.11в). При обогащении ТВС до значения коэффициента избытка воздуха (α), соответствующего проскоку пламени в горелочное устройство ($\alpha_{пр}$), пламя из зоны стабилизации «садится» на вершину конуса этого насадка и проскакивает внутрь горелочного устройства вдоль поверхности конуса и затем цилиндрической части вплоть до лопаточного завихрителя (рисунок 4.11б). Это явление обусловлено снижением скорости потока ТВС вблизи поверхности конического насадка.





в)

Рисунок 4.11 – Поля распределений значений температуры потока в горелочном устройстве:

а) стабильный режим горения в стационарной постановке; б) режим при проскоке пламени в стационарной постановке; в) стабильный режим горения в нестационарной постановке

Для валидации разработанного метода определения проскока пламени в горелочном устройстве с предварительной подготовкой метано-водородо-воздушной смеси и закруткой потока проведено три серии расчетов при различных значениях добавок водорода в метано-водородное топливо ($R_H = 40 - 100\%$): 1) в стационарной постановке (RANS) с использованием стандартных зависимостей для нормальной скорости распространения пламени (S_{Lst}), реализованных в коммерческих программных пакетах (ANSIS Fluent и других); 2) в стационарной постановке (RANS) с использованием разработанных в главе 3 зависимостей для нормальной скорости распространения пламени $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$ (см. таблицу 3.3) и разработанного кинетического механизма WangUPD; 3) в нестационарной постановке (LES) с использованием разработанных в главе 3 зависимостей для нормальной скорости распространения пламени $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$ (см. таблицу 3.3) и разработанного кинетического механизма WangUPD. Сравнение расчетных и

экспериментальных данных, полученных в результате исследования, представлено на рисунке 4.12.

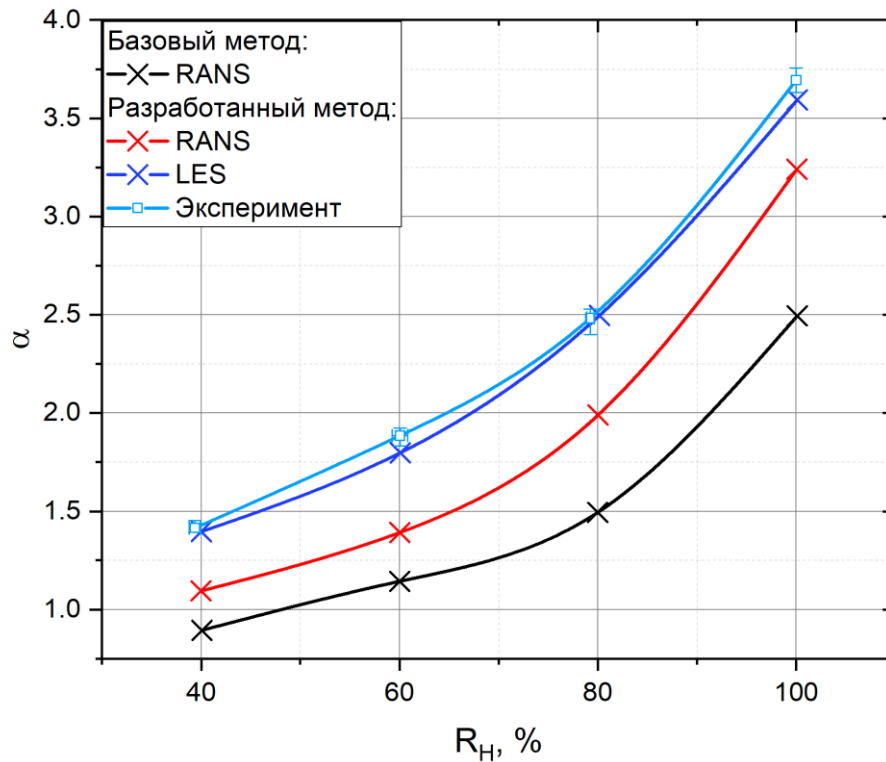


Рисунок 4.12 – Изменение границы проскока пламени в горелочное устройство от доли водорода в топливе

Представленные результаты показывают, что границы проскока пламени, определенные при численном моделировании в стационарной постановке (RANS) с использованием стандартных зависимостей для нормальной скорости распространения пламени (S_{Lst}), реализованных в коммерческих программных пакетах (ANSIS Fluent и других), отличаются от экспериментальных данных на 40 – 50% во всем диапазоне добавок водорода. Этот результат не может являться приемлемым даже для инженерных расчетов. Модернизация математической модели с учетом использования разработанных зависимостей для нормальной скорости пламени $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$ и кинетического механизма WangUPD позволяет при использовании численных расчетов в стационарной постановке (RANS) в два раза сократить отклонение от экспериментальных данных (погрешность до 20%). Так как проскок пламени представляет собой нестационарное явление и чувствителен

к крупномасштабным пульсациям турбулентного потока, которые не описываются в стационарных подходах, для верного описания проскока пламени должны использоваться методы моделирования в нестационарной постановке, например метод крупных вихрей (LES) [155]. Как видно из рисунка 4.12, погрешность данного метода при использовании разработанных зависимостей для $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$ и кинетического механизма WangUPD не более $\pm 5\%$.

Однако в инженерной практике подход с использованием метода моделирования крупных вихрей (LES) широко применять для реальных конструкций КС ГТД и энергетических установок достаточно проблематично из-за значительной трудоемкости метода и высоких требований к вычислительной технике. Кроме того, при разработке новых изделий необходимо выполнять большое количество численных расчетов различных вариантов конструкций камер сгорания.

Поэтому по результатам проведенных в данной работе исследований предлагается на этапе предварительного проектирования проводить определение границ предполагаемого проскока пламени (α) на основе численного моделирования проскока в стационарной постановке (RANS) с использованием разработанных зависимостей для нормальной скорости распространения пламени $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$ и кинетического механизма WangUPD ($\alpha_{пр}$), а также с учетом коэффициента запаса $K_{запаса} = 1,25$:

$$\alpha \text{ (предполагаемого проскока)} = K_{запаса} \cdot \alpha_{пр} .$$

Впоследствии на этапе поверочного расчета граница предполагаемого проскока может быть верифицирована численным расчетом с использованием метода крупных вихрей (LES), а также подтверждена экспериментально для отобранных вариантов конструкций КС.

Проскок пламени при моделировании в LES постановке происходит при более высоком значении коэффициента избытка воздуха (α), чем при моделировании в RANS постановке, из-за наличия пульсаций скорости потока в пограничном слое. На рисунке 4.13 представлена соответствующая

зависимость изменения мгновенной скорости потока от времени на границе пристеночного слоя конического насадка, где и происходит первичный проскок пламени в горелочное устройство.

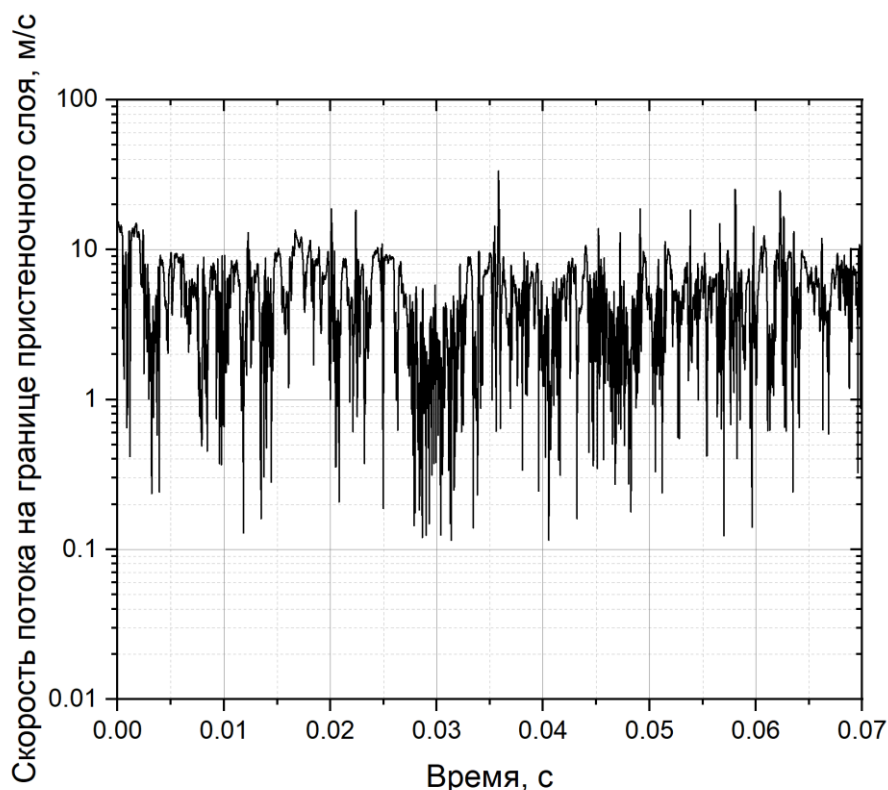


Рисунок 4.13 – Пульсации скорости потока на границе пристеночного слоя конического насадка горелочного устройства

Из рисунка видно, что в результате турбулентных пульсаций скорость потока ТВС на границе пристеночного слоя может достигать минимальных значений около 10 – 15 см/с, что сопоставимо со значениями скорости распространения пламени для различных ТВС при соответствующих значениях коэффициента избытка воздуха. Поэтому задача определения границ проскока пламени может сводиться к правильному расчету скорости распространения ламинарного пламени и скорости потока на границе пристеночного слоя.

Таким образом, в результате проведенного расчетно-экспериментального исследования сформирован метод определения границ проскока пламени при использовании метано-водородного топлива в КС

газотурбинных двигателей и энергетических установок, алгоритм реализации которого представлен на рисунке 4.14.

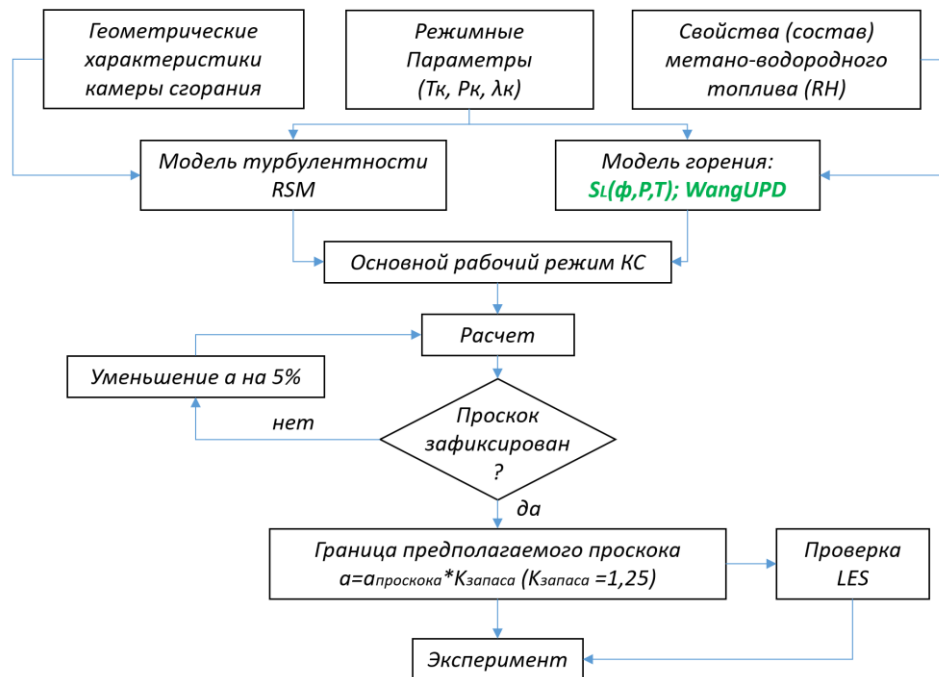


Рисунок 4.14 – Метод определения границ проскока пламени

Заключение по четвертой главе

В результате проведенных исследований процессов горения метано-водородных топлив в горелочном устройстве с предварительной подготовкой ТВС и закруткой потока получены следующие результаты:

1. Получены новые экспериментальные данные по границам проскока пламени при сжигании предварительно подготовленных метано-водородо-воздушных смесей с долей водорода в топливе R_H от 40 до 100% в горелочных устройствах с закруткой потока, отличающиеся диапазоном исследуемых параметров и видом используемого топлива. Обобщая представленные экспериментальные результаты, можно заключить, что для типовых горелочных устройств КС ГТД и энергетических установок с предварительной подготовкой ТВС и закруткой потока при использовании метано-водородных топлив границы проскока пламени в значительной степени определяются долей водорода в топливе (R_H), а также режимными параметрами, такими как:

среднерасходная скорость на срезе сопла горелки (λ_k) и характеристики закрученного потока на выходе из горелки.

2. Показано, что разработанная математическая модель, учитывающая новый кинетический механизм окисления метано-водородных топлив WangUPD и новые зависимости $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$, при прогнозировании границ проскока пламени в исследуемом горелочном устройстве на основе численного моделирования в стационарной постановке (RANS) позволяет в два раза сократить отклонение от экспериментальных данных и улучшить точность моделирования проскока пламени на этапе предварительного проектирования. Рекомендовано для этого случая применять корректировочный коэффициент $K_{запаса} = 1,25$ для увеличения предполагаемого значения коэффициента избытка воздуха при проскоке пламени на этапе предварительного проектирования камер сгорания.

3. Прогнозирование границ проскока пламени при моделировании в трехмерной нестационарной постановке методом крупных вихрей (LES) с использованием разработанной математической модели позволяет качественно и количественно определить проскок пламени с погрешностью, не превышающей $\pm 5\%$.

Таким образом, предложенный метод определения границ проскока пламени, включающий в себя новый кинетический механизм окисления метано-водородных топлив (WangUPD), математическую модель зависимости нормальной скорости распространения пламени метано-водородных топлив от температуры, давления и состава смеси ($S_L = f(\phi, P_k, T_k)$) и соответствующий алгоритм расчета, может применяться для прогнозирования явления проскока пламени при использовании метано-водородных топлив в КС ГТД и энергетических установок, во фронтальной плите которых установлены горелочные устройства с предварительной подготовкой ТВС и закруткой протока в основном контуре.

ГЛАВА 5 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСКОКА ПЛАМЕНИ ПРИ СЖИГАНИИ МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В МОДЕЛЬНОЙ И ПОЛНОРАЗМЕРНОЙ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТАНОВОК

В настоящей главе разработанный метод определения границ проскока пламени был апробирован с целью выработки рекомендаций по возможности использования метано-водородных топлив с различным содержанием H_2 в смеси в реальных камерах сгорания газотурбинных двигателей и энергетических установок без риска возникновения проскока пламени в горелочное устройство. Исследования проведены на двух объектах:

1) модельной камере сгорания (см. рисунок 2.9), которая является прототипом используемых малоэмиссионных камер сгорания с предварительной подготовкой смеси в перспективных авиационных газотурбинных двигателях и энергетических установках;

2) камере сгорания полноразмерной газотурбинной установки ГТЭ-65.

Используемый метод моделирования проскока пламени включает в себя подготовку геометрической модели с возможными упрощениями, выделение расчетной области разбиением на сеточную модель, настройкой математической модели и CFD моделированием процессов горения. Экспериментальные исследования выполнены на стендах Самарского университета им. Королева с целью валидации используемого метода на реальной камере сгорания.

5.1 Расчетно-экспериментальное исследование проскока пламени при сжигании метано-водородного топлива в модельной камере сгорания

В данном разделе описано моделирование процессов проскока пламени при горении метано-водородных топлив в модельной камере сгорания с различным содержанием водорода в топливе ($R_H = 0 - 100\%$) и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на стенде

научно-образовательного центра газодинамических исследований Самарского университета им. Королева (см. главу 2).

Геометрическая и сеточная модель

Для проведения численных расчетов была создана геометрическая модель камеры сгорания на основе реальной конструкции модельной КС, подробно описанной в разделе 2.2 (рисунок 2.8).

Геометрическая модель камеры сгорания (рисунок 5.1) состоит из входного участка, в который подается подогретый воздух, системы подготовки ТВС, через которую подается метано-водородное топливо и обеспечивается смешение топлива с воздухом, завихрителя, пилотной топливной форсунки, жаровой трубы и выходного участка. Построение трехмерной геометрической модели проводилось с помощью САД системы Siemens NX 8.5.

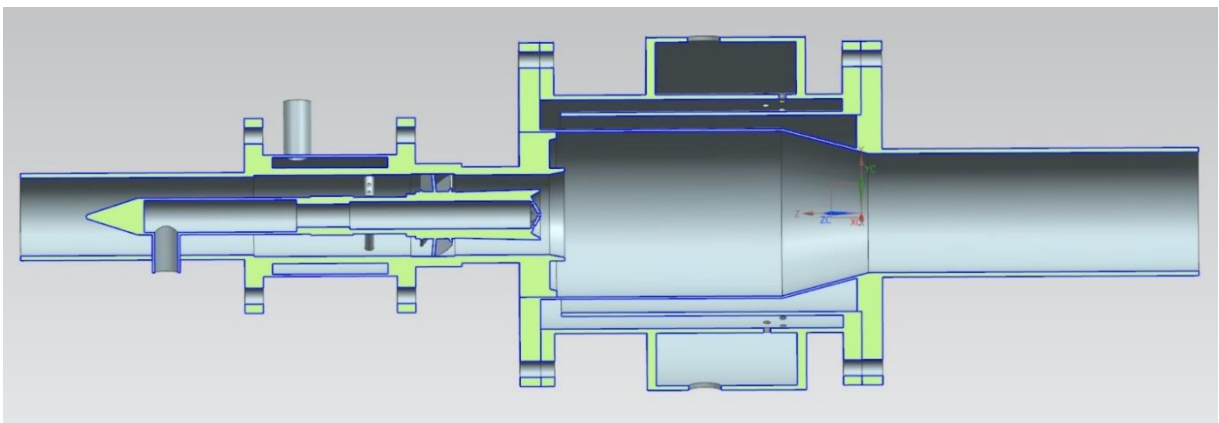


Рисунок 5.1 – Трехмерная геометрическая модель камеры сгорания

Для моделирования процессов в камере сгорания была сгенерирована сеточная конечно-элементная модель проточной части камеры сгорания со следующими параметрами:

- максимальное значение параметра скошенности – 0,89647;
- общее количество элементов – 11 375 600;
- количество призматических элементов в пограничном слое – 3.

Конечно-элементная модель имеет загущение элементов в области подачи топлива через основной контур и в области зоны горения, как показано на рисунке 5.2.

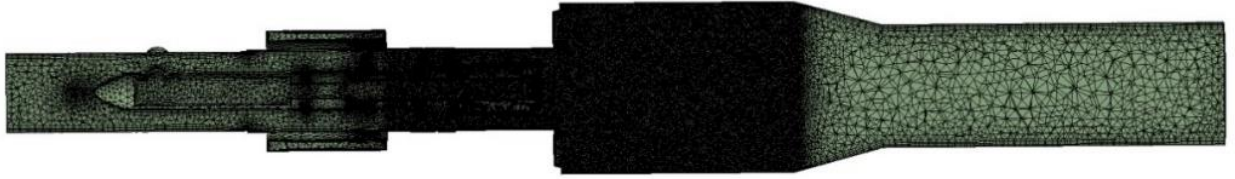


Рисунок 5.2 – Сеточная модель камеры сгорания

Структура течения

На первом этапе было проведено исследование влияния доли водорода (R_H) в топливе на рабочий процесс модельной камеры сгорания. Моделирование процессов горения выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent 21 R2 с использованием нового кинетического механизма окисления метано-водородных топлив (WangUPD), разработанной математической модели зависимости нормальной скорости распространения пламени метано-водородных топлив от температуры, давления и состава смеси ($S_L = f(\phi, P_k, T_k)$), а также выбранных моделей турбулентности и горения, подробно описанных в разделе 4.2.

В таблице 5.1 представлены исходные данные для расчета. Перепад давления во всех расчетах выдерживался постоянным и равным 5%. Постоянными параметрами также были температура на входе (T_k), давление (P_k) в камере сгорания и предполагаемая температура на выходе (T_r) из камеры сгорания (для сохранения режима работы условного двигателя). Для поддержания постоянного значения температуры на выходе $T_r = 1990$ К (что соответствует $\alpha = 1,6$ при сжигании чистого метана) были рассчитаны величины необходимого коэффициента избытка воздуха в камере сгорания (α_{kc}) с учетом соответствующего стехиометрического коэффициента (L_0) для каждого значения R_H в применяемом метано-водородном топливе (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета камеры сгорания с жаровой трубой

№ п/п	ΔP	$\alpha_{КС}$	$T_{к, К}$	$P_{к, атм}$	$G_{f_premix, \%}$	$G_{f_pilot, \%}$	$R_{H, \%}$	Lo	$T_{г, К}$ (равновесная)
1	5%	1,600	673	1	100	0	0	17,24	1990
2	5%	1,606	673	1	100	0	10	17,47	1990
3	5%	1,620	673	1	100	0	20	17,76	1990
4	5%	1,618	673	1	100	0	30	18,11	1990
5	5%	1,648	673	1	100	0	40	18,56	1990
6	5%	1,665	673	1	100	0	50	19,14	1990
7	5%	1,682	673	1	100	0	60	19,94	1990
8	5%	1,698	673	1	100	0	70	21,11	1990
9	5%	1,762	673	1	100	0	80	22,94	1990
10	5%	1,813	673	1	100	0	90	26,29	1990
11	5%	1,908	673	1	100	0	100	34,30	1990

Результаты расчета в стационарной постановке (RANS) параметров потока на выходе из камеры сгорания представлены в таблице 5.2. Расхождение между заданным на входе в КС значением коэффициента избытка воздуха (α) и полученным в результате расчета коэффициентом избытка воздуха в выходном сечении ($\alpha_{КС}$) составляет менее 1% для всех вариантов расчетов, что свидетельствует об адекватности формирования геометрической и сеточной модели КС, задания граничных условий и проведения численного моделирования.

Таблица 5.2 – Результаты расчета параметров потока на выходе из КС

№	$R_H, \%$	α	$\alpha_{КС}$	Расхождение $\alpha, \%$
1	0	1,600	1,615	0,94%
2	10	1,606	1,606	Менее 0,5%
3	20	1,620	1,620	Менее 0,5%
4	30	1,618	1,618	Менее 0,5%
5	40	1,648	1,648	Менее 0,5%
6	50	1,665	1,665	Менее 0,5%
7	60	1,682	1,682	Менее 0,5%
8	70	1,698	1,699	0,06%
9	80	1,762	1,762	Менее 0,5%
10	90	Проскок пламени		

11	100	Проскок пламени
----	-----	-----------------

Температурное поле в продольном сечении камеры сгорания и расположение фронта пламени, которое можно идентифицировать по значениям скорости образования продуктов сгорания (PFR), при различных значениях $R_H = 40, 80, 90\%$ представлены на рисунках 5.3–5.5. Стоит отметить, что форма пламени для всех исследуемых вариантов практически не меняется, представляет собой пламя М-типа и имеет две зоны стабилизации: на внешнем радиусе горелочного устройства и внешнем радиусе центрального тела. При добавках водорода $R_H > 80\%$ был зафиксирован проскок пламени внутрь горелочного устройства (см. рис. 5.5).

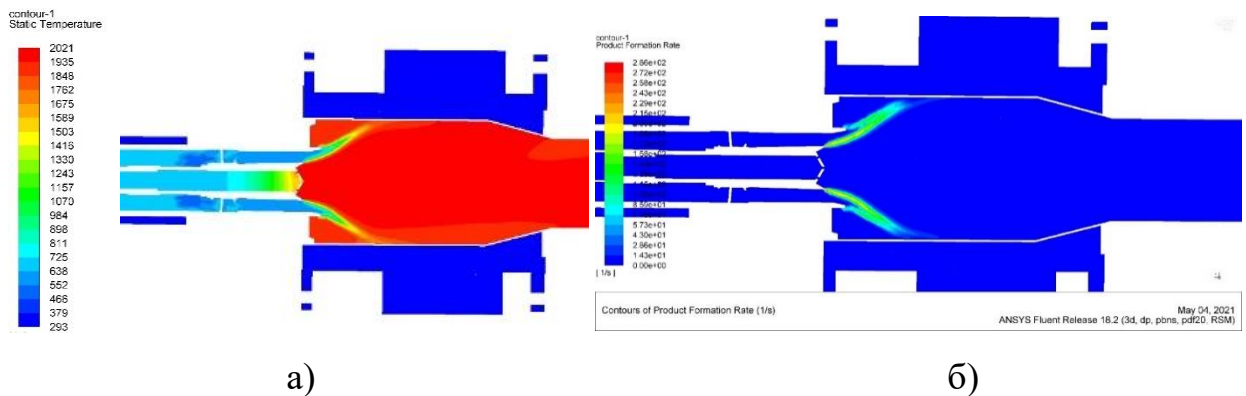


Рисунок 5.3 – а) Поле распределения температуры и б) фронта пламени при $R_H=40\%$

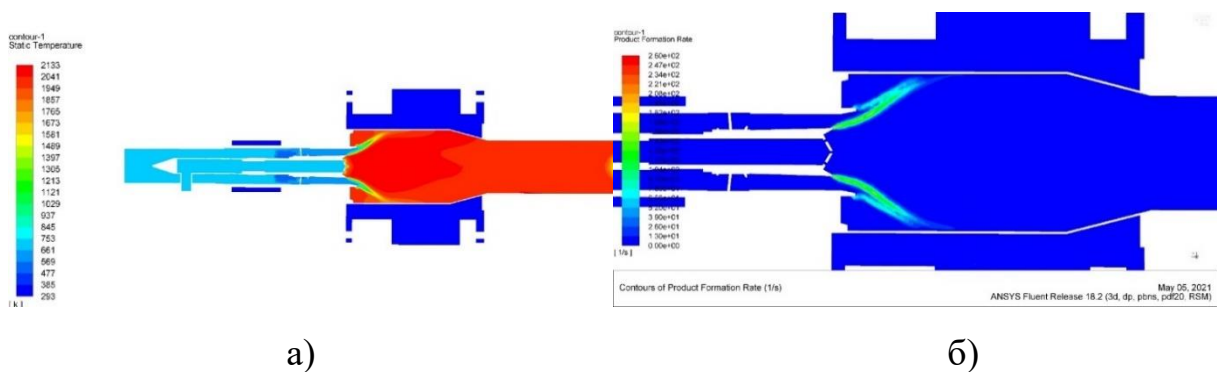


Рисунок 5.4 – а) Поле распределения температуры и б) фронта пламени при $R_H=80\%$

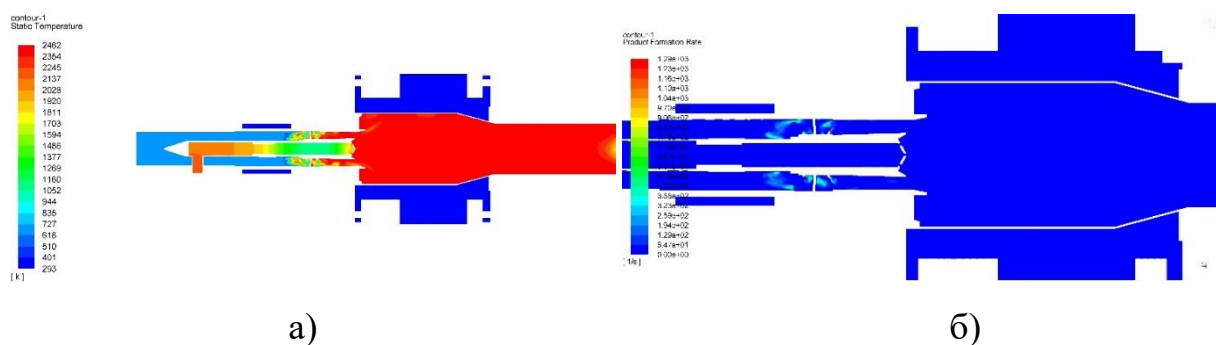


Рисунок 5.5 – а) Поле распределения температуры и б) фронта пламени при $R_H=90\%$

Для проведения экспериментальных исследований по влиянию добавок водорода в исходное топливо на основные характеристики модельной КС и с целью обеспечения безопасных условий работы установки были проведены расчеты по определению границы проскока пламени для заданных режимов работы камеры сгорания. В соответствии с разработанным методом определения границ проскока пламени при использовании метано-водородного топлива (см. раздел 4.3) по результатам численного моделирования в стационарной постановке (RANS) была определена граница предварительного проскока пламени, а также граница предполагаемого проскока пламени с учетом рекомендованного коэффициента запаса $K_{запаса}=1,25$ (рисунок 5.6). Полученные границы предполагаемого проскока, согласно изложенному выше алгоритму (см. рисунок 4.14), были верифицированы с использованием нестационарного численного моделирования методом крупных вихрей (LES), в результате которого была определена точка стабильной работы КС (без явления проскока пламени) для режима испытаний с $R_H = 40\%$. Полученные с использованием нестационарного моделирования (LES) результаты подтвердили правильность оценки границы предполагаемого проскока пламени, полученные на основе стационарного моделирования (RANS) с использованием рекомендованного коэффициента запаса $K_{запаса}=1,25$ (рисунок 5.6).

Полученные поля распределения температуры при стабильной работе в стационарной (рисунок 5.7а) и нестационарной постановке (рисунок 5.7в) и

при проскоке пламени (рисунок 5.7б) вдоль пограничного слоя представлены на рисунке 5.7.

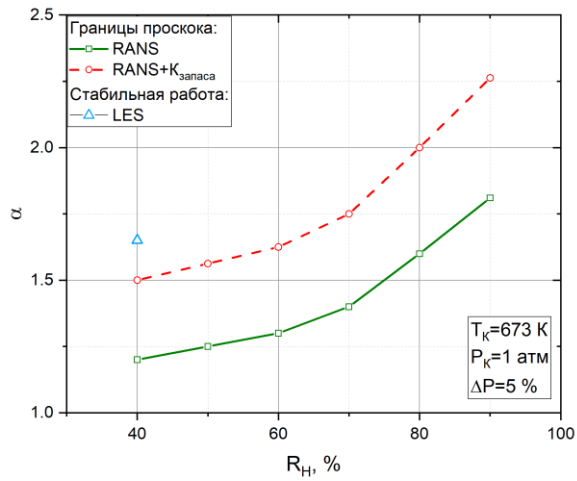


Рисунок 5.6 – Границы проскока пламени в модельной камере сгорания

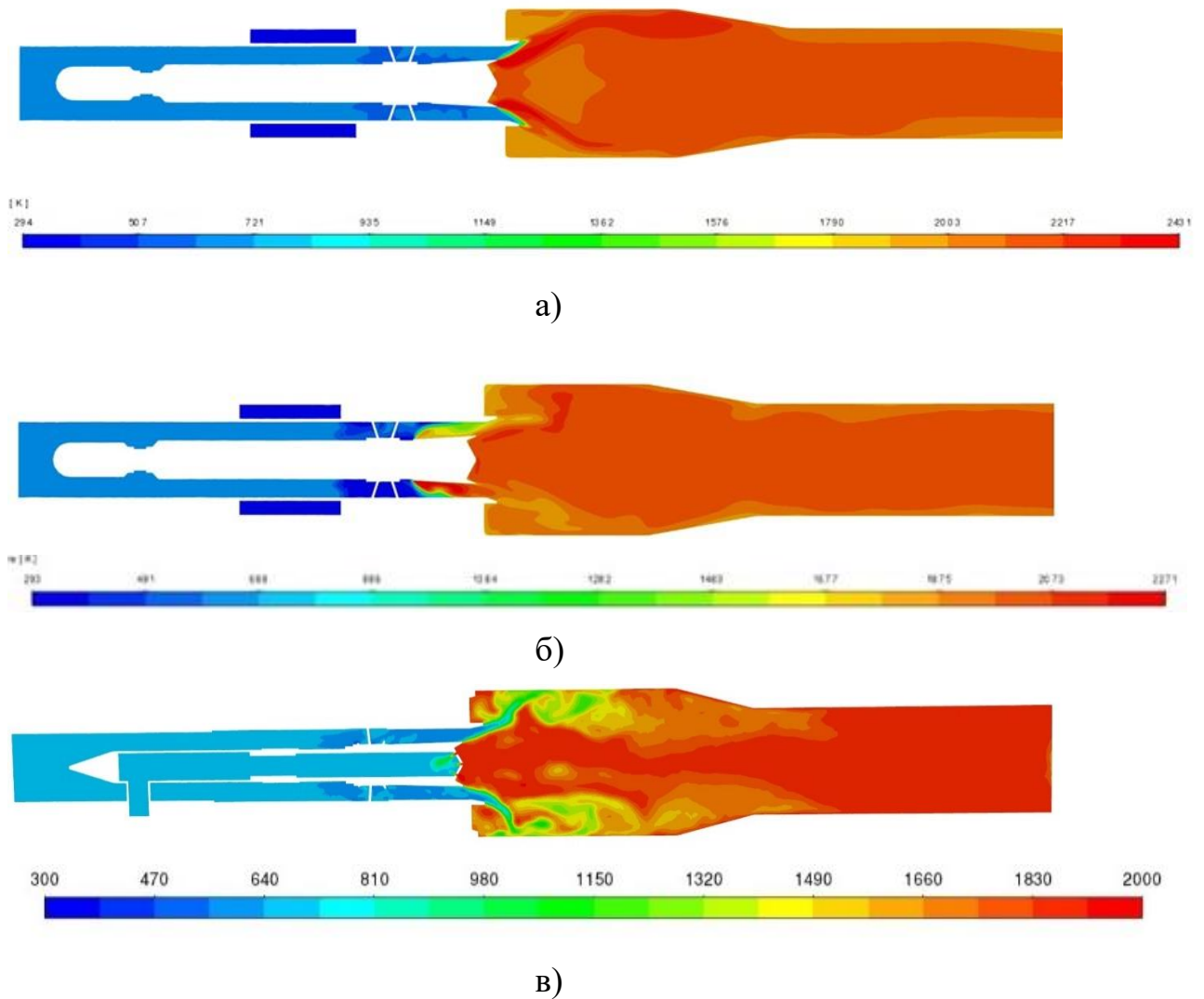


Рисунок 5.7 – Поле распределения температуры при $R_H = 40\%$;

а) RANS, $\alpha=1.3$; б) RANS, $\alpha=1.2$; в) LES, $\alpha=1.65$

По результатам расчетно-экспериментального исследования процесса горения метано-водородного топлива с различными значениями R_H в модельной камере сгорания на основе разработанного метода была определена граница проскока пламени, а соответственно и зона устойчивой работы, по коэффициенту избытка воздуха в КС. Полученные результаты моделирования были подтверждены опытными данными при работе КС в устойчивой зоне без проскока пламени внутрь горелочного устройства при добавках водорода до $R_H = 60\%$ включительно (рисунок 5.8). В целях безопасной эксплуатации установки модельная КС не вводилась в режим работы с проскоком пламени.

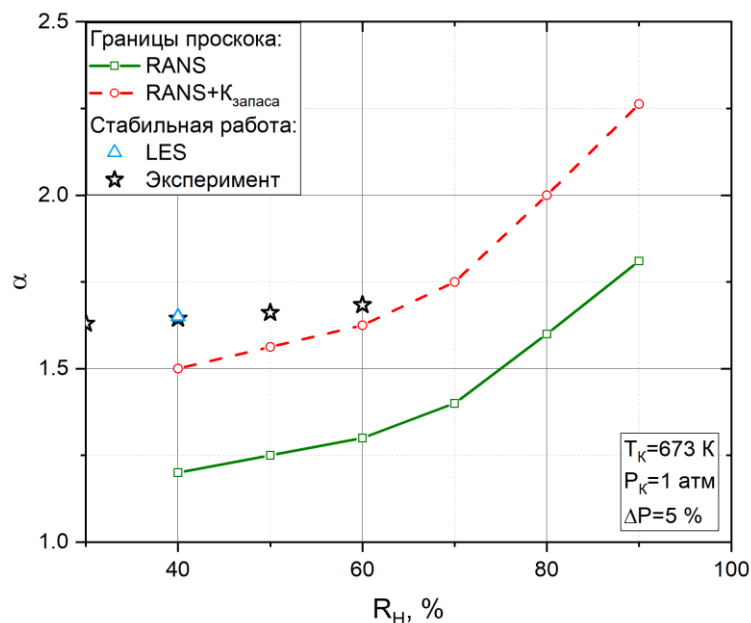
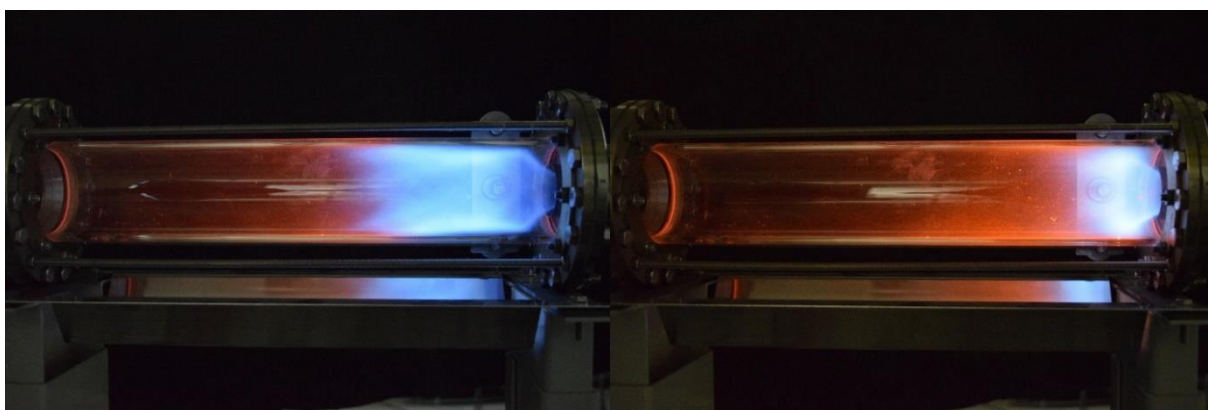


Рисунок 5.8— Границы проскока пламени в модельной камере сгорания

Также для сравнения конфигурации пламени были проведены экспериментальные исследования в модельной камере сгорания с кварцевой трубкой, обеспечивающей визуализацию рабочего процесса в следе за горелочным устройством (рисунок 5.9). Получены изображения формы и положения фронта пламени с различной долей водорода в топливе: $R_H = 0\%$ и $R_H = 50\%$. Из рисунка 5.9 видно, что добавка водорода сокращает длину фронта пламени, так как увеличивается скорость распространения пламени и топливо выгорает на более коротком участке. При увеличении объемной доли водорода до 50% длина фронта пламени сокращается в 2 раза (с ≈ 150 до ≈ 75 мм) [10].



а)

б)

Рисунок 5.9 – Фото рабочего процесса модельной камеры сгорания с кварцевой трубкой с различной долей водорода ($\Delta P=5\%$, $T_k=673\text{K}$, $\alpha=\text{var}$, $T_r=1800\text{K}$)

а) $R_H=0\%$, б) $R_H=50\%$

Таким образом разработанный метод определения границ проскока пламени при использовании метано-водородных топлив апробирован на модельной камере сгорания. Расчетная модель соответствует экспериментальным исследованиям. Данный метод может быть использован для определения проскока пламени на этапе предварительного проектирования камер сгорания газотурбинных двигателей и энергетических установок.

5.2 Моделирование проскока пламени при сжигании метано-водородного топлива в камере сгорания газотурбинной установки ГТЭ-65

В имеющихся источниках в настоящее время не существует четкой градации возможного применения водорода без существенных доработок в конструкции камер сгорания. Основываясь на данных различных источников, можно предположить, что использование метано-водородного топлива в газотурбинных установках требует дополнительных конструктивных доработок в камерах сгорания или изменения организации рабочего процесса внутри жаровой трубы камеры сгорания ГТУ. При небольших концентрациях

H_2 (R_H до 20%), доработки, как правило, практически не потребуются или производятся в системе подачи топлива и горелочных устройствах.

При R_H от 20 до 60...70%, как правило, требуется доработка фронтального устройства, например, с предварительным смешением DLE.

При R_H от 70 до 100% потребуются разработка новой КС, с учетом всех особенностей физико-химических характеристик горения водорода. Особое внимание в данном случае требуется уделить мероприятиям по предотвращению проскока пламени.

В данном разделе проведена апробация предложенного метода определения проскока пламени. Также выполнено исследование влияния доли водорода в метано-водородном топливе на проскок пламени в исходной конструкции ГТЭ-65 для выработки более детальных рекомендаций по вопросу применения метано-водородного топлива в современных КС.

Геометрическая и сеточная модель

Исходная модель камеры сгорания газотурбинной установки ГТЭ-65 представляет шестимодульную, трубчато-кольцевую конструкцию. Каждый из модулей (индивидуальной КС) содержит горелочное устройство, жаровую трубу, газосборник. Газодинамические процессы моделировались в одной индивидуальной КС, что соответствует 1/6 части кольцевого канала. Геометрическая модель индивидуальной камеры сгорания ГТЭ-65.1 представлена на рисунке 5.10.

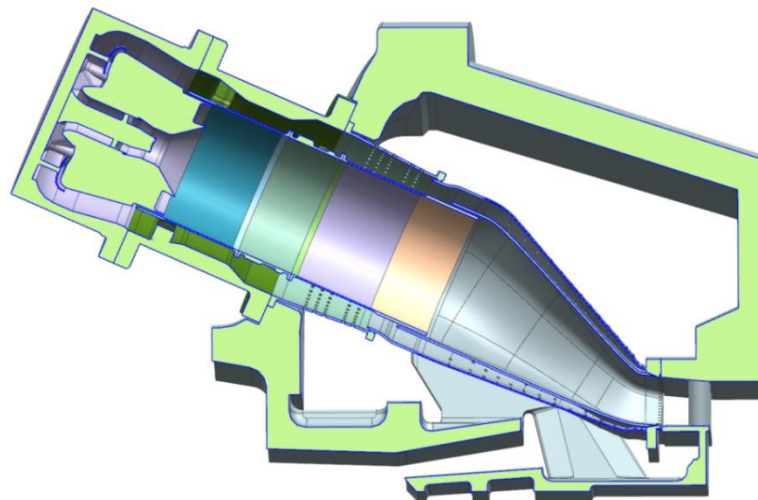


Рисунок 5.10 – Геометрическая модель индивидуальной камеры сгорания ГТЭ-65

Для моделирования процессов горения в камере сгорания была сгенерирована конечно-элементная сетка (рисунок 5.11).

Описание сеточной модели:

- максимальное значение параметра скошенности – 0.96;
- общее количество элементов – 25 млн;
- количество призматических слоев на стенках – 3;
- минимальный линейный размер элемента, м – 4×10^{-4} ;
- размер элемента в зоне горения, м – 3×10^{-3} .

Для повышения качества получаемых результатов внутри жаровой трубы была выделена газодинамическая область, на которую была наложена структурированная конечно-элементная сеточная модель. Структурированный участок имеет меньший размер ячеек, особенно в зоне горения, что позволит получить более качественный расчет процессов смешения, горения и обнаружения проскока пламени.

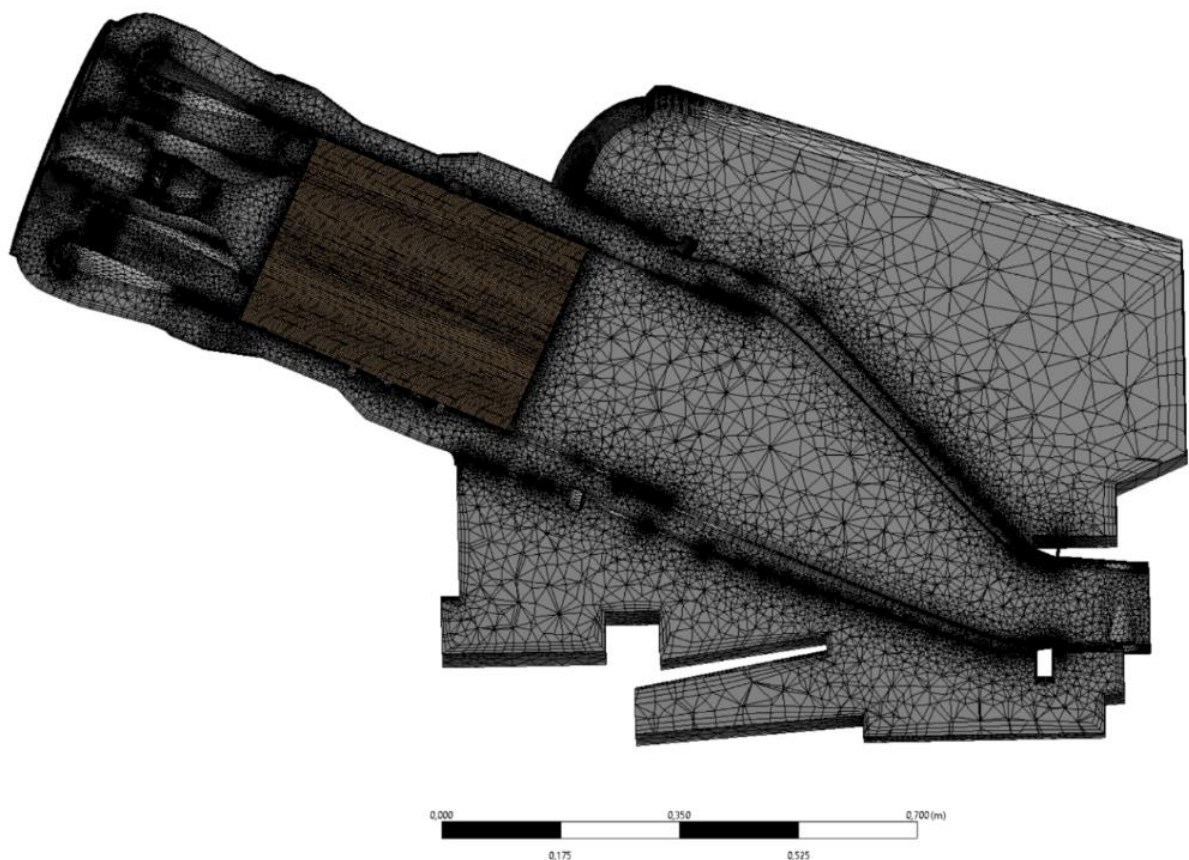


Рисунок 5.11 – Внешний вид сетки в продольном сечении КС

Граничные условия

Для расчета характеристик камеры сгорания необходим набор параметров, которые задаются в качестве граничных условий для расчета. Исходные данные для трехмерного моделирования камеры сгорания ГТЭ-65. представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Исходные данные при моделировании камеры сгорания ГТЭ-65

Режим работы	P^* , атм	$Tв^*$, К	$Gв$, кг/с	$Gт$, кг/с	R_H , %
100%	16	673	150	3	0–100

При трехмерном моделировании важно правильно задать неравномерность входных параметров для КС. В качестве начальных условий на входе в камеру сгорания при расчете использовался равномерный 5% профиль интенсивности турбулентности. В качестве топлива при проведении расчетов использовался чистый метан (CH_4) с добавками водорода (H_2) до 100%. В качестве окислителя - воздух ($O_2 - 21\%$, $N_2 - 79\%$). В рассчитываемой камере сгорания топливо подавалось из пяти различных контуров.

Цель данной работы – определение максимально возможной доли водорода в камере сгорания ГТЭ-65.

Для выделенного режима была рассчитана равновесная температура $Tг=1659$ К. Для сохранения средней температуры продуктов сгорания на выходе из КС были посчитаны коэффициенты избытка воздуха для каждого варианта состава топлива (рисунок 5.12). Далее были посчитаны расходы топлива в зависимости от объемного содержания водорода; давление, расход и температура воздуха оставались неизменными (таблица 5.4).

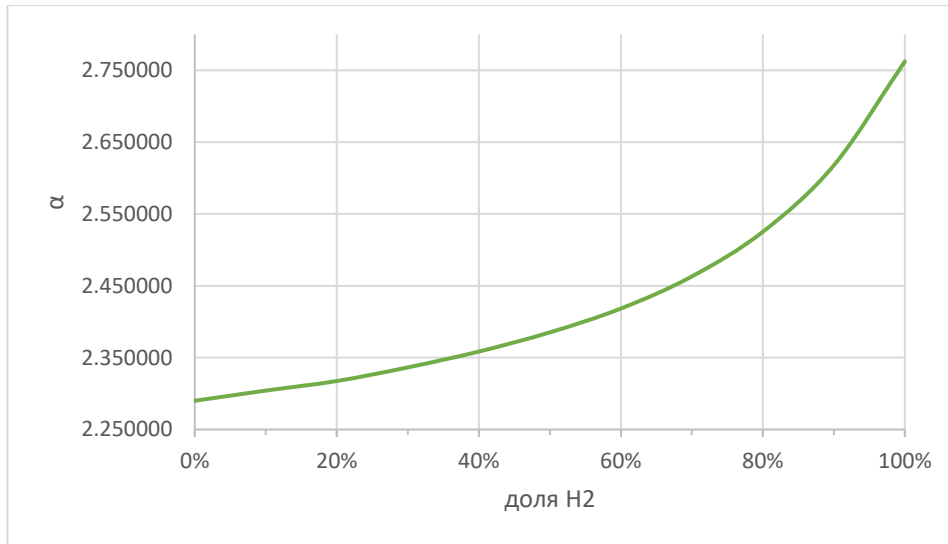


Рисунок 5.12 – Изменение коэффициента избытка воздуха от доли H₂ при заданной температуре

Таблица 5.4 – Значения коэффициента избытка воздуха и доли топлива по контурам для каждого варианта состава топлива

R _H , %	L ₀	α	Gt сумм	R _H , %	L ₀	α	Gt сумм
0	17.24	2.29	0.631	60	19.94	2.42	0.516
10	17.47	2.30	0.619	70	21.11	2.46	0.479
20	17.76	2.32	0.605	80	22.94	2.53	0.430
30	18.11	2.34	0.589	90	26.29	2.62	0.362
40	18.56	2.36	0.569	100	34.3	2.76	0.263
50	19.14	2.39	0.546	60	19.94	2.42	0.516

Результаты моделирования процессов горения в камере сгорания ГТЭ-65.

Исходя из таблицы 5.4, расчет проводился в диапазоне R_H = 0..100%. В результате расчетов получены поля распределения полной скорости, статической температуры и степени завершенности реакции (рисунок 5.13–5.15).

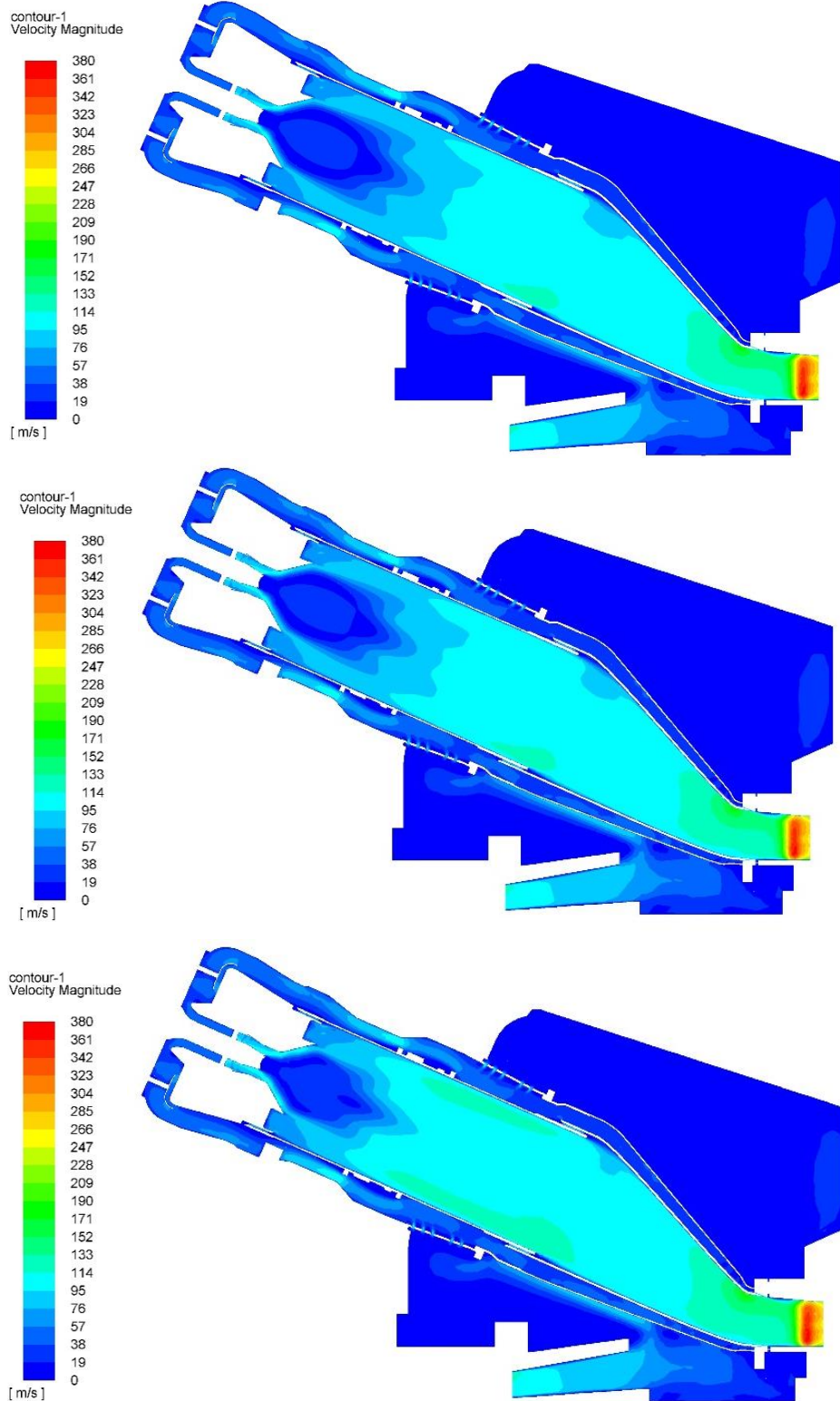


Рисунок 5.13 – Поля распределения полной скорости при $R_H = 0, 30, 60\%$.

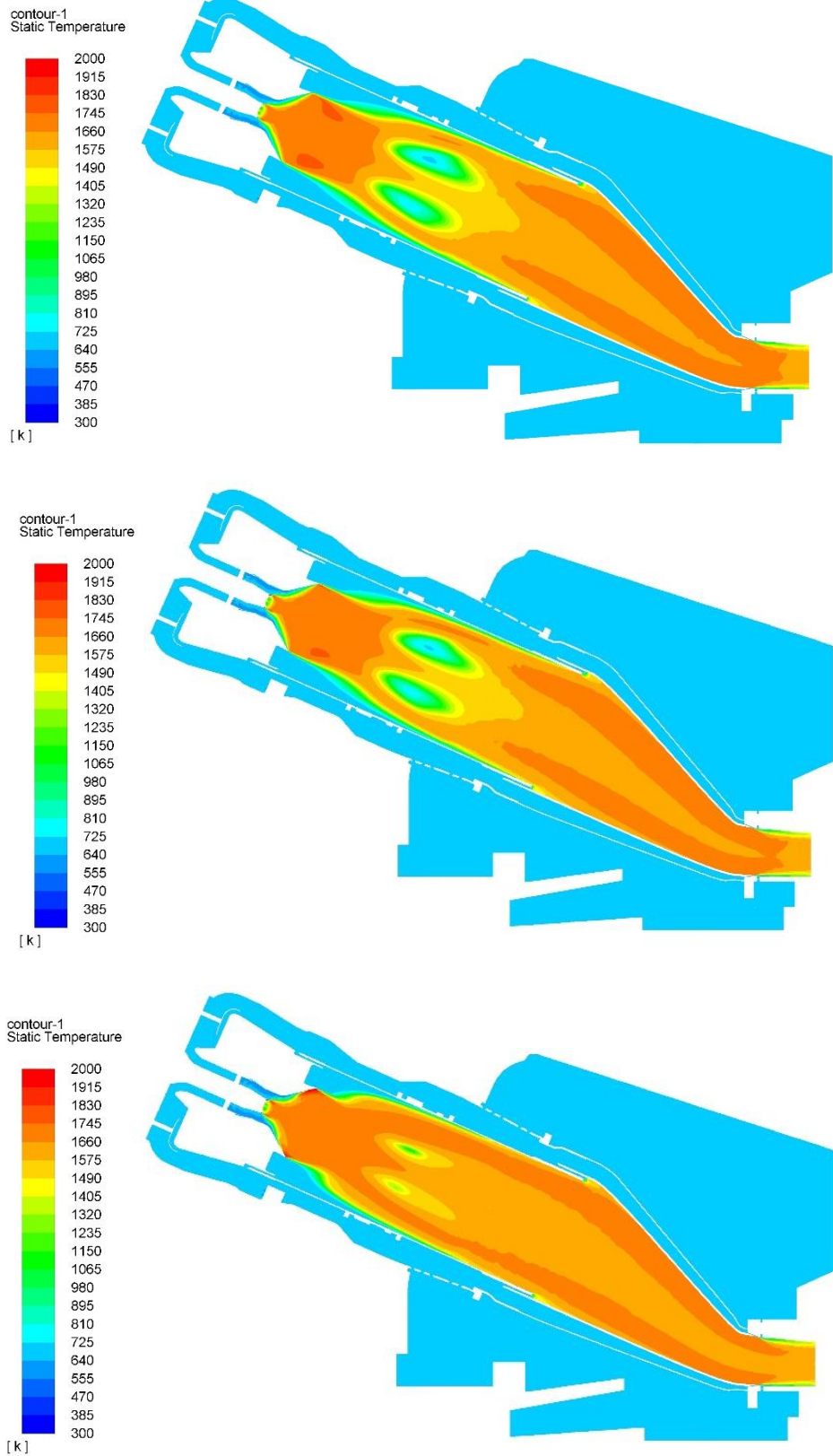


Рисунок 5.14 – Поля распределения статической температуры при $Re_H = 0, 30, 60\%$.

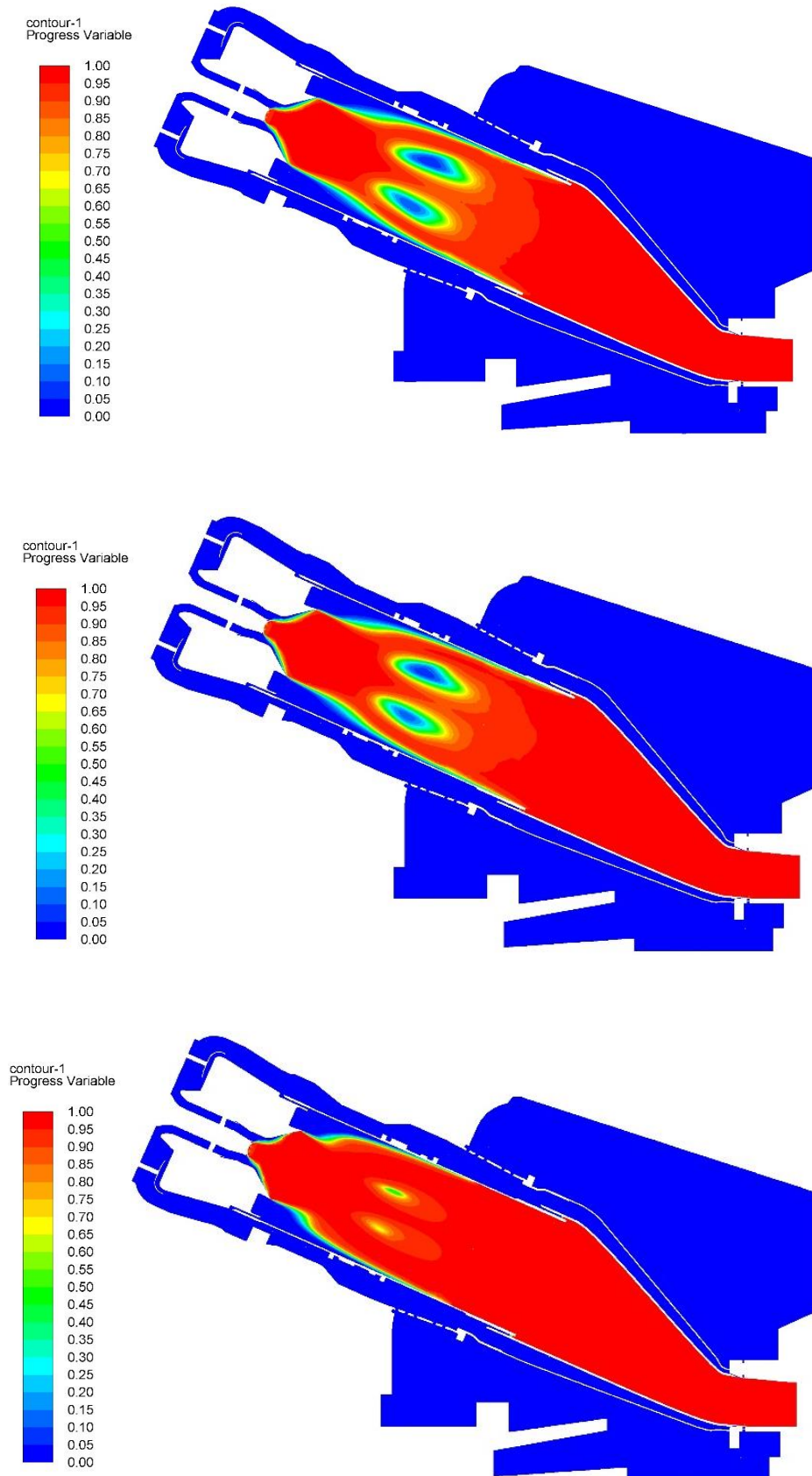


Рисунок 5.15 – Поля распределения степени завершенности реакций при $R_H = 0, 30, 60\%$.

Анализируя поля скорости (рисунок 5.13), видно, что зона обратных токов сокращается с увеличением добавки водорода. Таким образом можно сделать вывод, что пламя будет хуже стабилизироваться в данной области. При этом до при $R_H = 30\%$ уменьшение незначительное. Исходя из этого можно утверждать, что при $R_H > 20\text{--}30\%$ необходимо вносить изменения в систему подачи топлива и горелочных устройствах.

Максимальная температура в жаровой трубе находится в основной зоне горения и составляет порядка 1800 К (рисунок 5.14). Стоит отметить, что температура непосредственно за горелочными устройствами увеличивается, так как с ростом доли водорода увеличивается интенсивность горения. Также при добавках более 20–30% фронт пламени смещается к горелочным устройствам, из-за чего возможны прогары в центральном горелочном устройстве. При 50% добавки водорода в топливо температура за горелками увеличивается на 150–200 градусов.

На рисунке 5.15 представлены поля распределения степени завершенности реакций при добавке водорода. Исходя из рисунка наблюдается, что при увеличении доли водорода полнота сгорания топлива увеличивается.

При добавках при $R_H = 70\%$ происходит проскок пламени через центральное горелочное устройство (рисунок 5.16). Поэтому дальнейшее увеличение доли водорода в исходной конструкции ГТЭ-65 не является целесообразным.

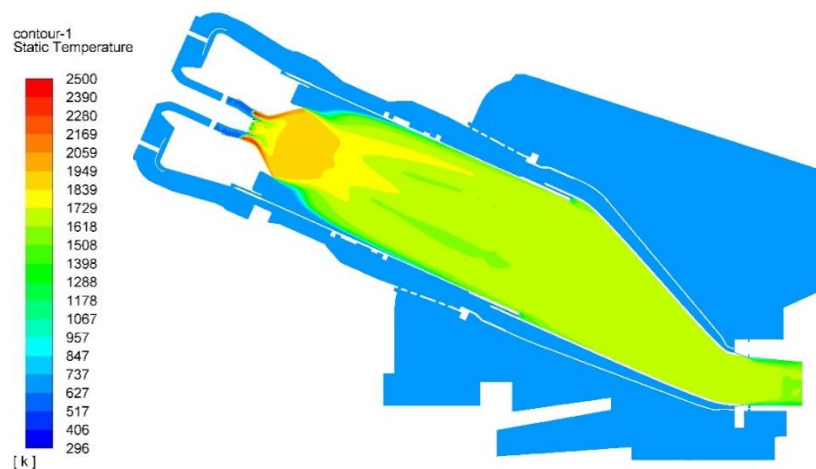


Рисунок 5.16 – Поля распределения статической температуры при проскоке пламени

Таким образом, при добавках водорода в исходную конструкцию ГТЭ-65 было получено, что при добавках более 60% водорода в топливо происходит проскок пламени через центральное горелочное устройство. Однако незначительные доработки придется делать уже при добавках 25–30% водорода по объему, так как уже при таком составе топлива фронт пламени смещается вверх по потоку и появляется опасность прогара элементов центрального горелочного устройства. До 20%, скорее всего, никаких доработок не потребуется.

На рисунке 5.17 представлена зависимость эмиссии CO_2 на 1 кВт*ч от % доли содержания водорода в топливе, рассчитанная для исходной конструкции ГТЭ-65. Исходя из предполагаемых норм эмиссии CO_2 менее 340 г CO_2 на 1 кВт*ч и того, что при добавках 70% водорода в топливо по объему происходит проскок пламени через центральное горелочное устройство, можно сделать вывод, что зона оптимального содержания водорода в топливе, с учетом коэффициента запаса, для исходной конструкции ГТЭ-65 находится в промежутке до 50% по объему, что позволит обеспечить снижение выбросов CO_2 с 450 до 340 г/кВт*час.

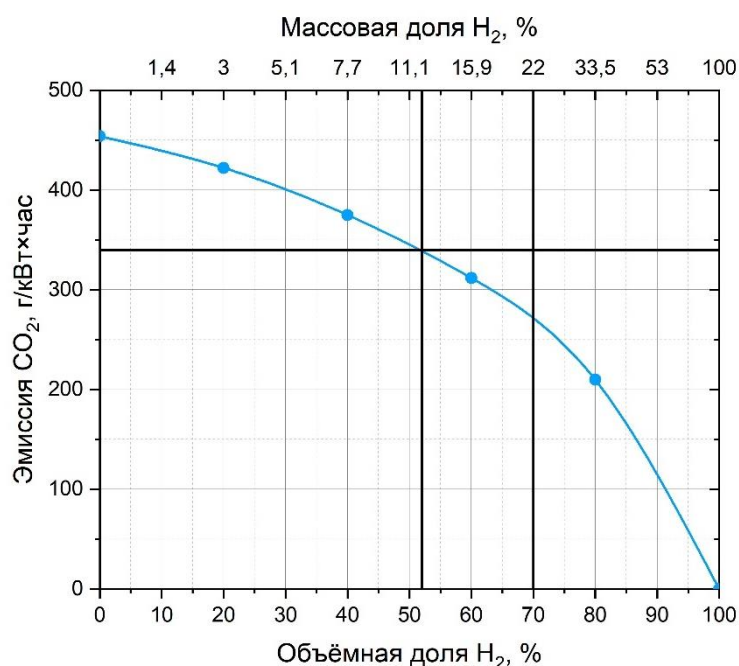


Рисунок 5.17 – Эмиссия CO_2 на 1 кВт*ч от доли водорода

Стоит отметить, что тепловая нагрузка на фронтную плиту с ростом добавок водорода будет выше, поэтому необходимо решать вопрос с тепловым состоянием стенок вблизи зоны горения.

Заключение по пятой главе

В результате расчетно-экспериментального исследования влияния доли водорода на процессы горения в исследуемой камере сгорания можно сделать следующие выводы:

- Выявлено, что добавка водорода сокращает длину фронта пламени, так как увеличивается скорость распространения пламени и топливо выгорает на более коротком участке.
- По результатам расчетно-экспериментального исследования была определена граница устойчивой работы модельной КС, которая подтверждена опытными данными при работе КС без проскока пламени внутрь горелочного устройства при добавке водорода до 60%.
- Применительно к полноразмерной КС ГТУ выполнено исследование влияния доли водорода в метано-водородном топливе на проскок пламени в исходной конструкции ГТЭ-65. В результате проведенных исследований установлено, что при добавках водорода в исходную конструкцию ГТЭ-65 более 70% водорода в топливо на рабочих режимах вероятен проскок пламени через центральное горелочное устройство. Соответственно, граница устойчивой работы, с учетом коэффициента запаса, составляет от 0 до 50%, что позволит обеспечить снижение выбросов CO_2 с 450 до 340 г/кВт*час.

Таким образом разработанный метод численного определения проскока пламени апробирован на модельной камере сгорания и камере сгорания ГТЭ-65. Расчетная модель соответствует экспериментальным исследованиям. Данный метод может быть использован для определения проскока пламени на этапе предварительного проектирования камер сгорания газотурбинных установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных расчетно-экспериментальных исследований рабочего процесса камер сгорания, работающих на метано-водородном топливе, решена актуальная научная задача о разработке метода определения границ проскока пламени на этапе предварительного проектирования камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей и созданных на их базе энергетических установок.

В процессе работы получены следующие результаты:

1. Разработан и валидирован новый метод определения границ проскока пламени при горении метано-водородных топлив, применение которого уменьшает погрешность прогнозирования проскока пламени с 40–50% до 5% в горелочных устройствах камер сгорания ГТД и ГТУ.
2. Разработан новый кинетический механизм (48 компонентов, 312 реакций), отличающийся дополнительным учетом четырех элементарных реакций и уточнением констант скоростей для наиболее значимых реакций, влияющих на нормальную скорость распространения пламени. Разработанный механизм позволяет моделировать нормальную скорость распространения метано-водородного пламени с погрешностью, не превышающей 5%, применительно к параметрам рабочего процесса камер сгорания ГТД и ГТУ.
3. Получены новые зависимости, позволяющие моделировать нормальную скорость распространения метано-водородного пламени применительно к параметрам рабочего процесса камер сгорания ГТД и ГТУ, отличающиеся учетом более широкого диапазона температур, давлений, состава смеси и вида используемого топлива.
4. Получены новые экспериментальные данные по границам проскока пламени в широком диапазоне $R_H = 0 - 100\%$ и скоростей потока на выходе из горелочного устройства, характерных для КС авиационных ГТД и энергетических установок.

5. Проведена апробация разработанного метода определения границ проскока пламени метано-водородных топлив для численного расчета в трехмерной постановке рабочего процесса модельной и полноразмерной камеры сгорания. Выработаны рекомендации по применению водорода в КС авиационного типа и КС ГТЭ-65, позволяющие использовать метано-водородные топлива с объемной долей водорода в топливе до 50%, что обеспечивает снижение выбросов парниковых газов до 35%.

6. Создан комплекс экспериментальных установок и моделей, обеспечивающий проведение работ с водородосодержащими газовыми смесями в соответствии с требуемыми нормативами безопасности, позволяющий обеспечивать заданные режимы работы и определять основные характеристики модельных горелочных устройств и камер сгорания авиационных ГТД и ГТУ, работающих на метано-водородном топливе.

Таким образом, в результате данной работы предложен метод, обеспечивающий большую, по сравнению с традиционными численными методами, точность определения границ проскока пламени при горении метано-водородного топлива, что повышает эффективность предварительного проектирования камер сгорания авиационных ГТД и ГТУ. Перспективой дальнейшего развития темы является использование данного метода для совершенствования конструктивных особенностей фронтальных устройств КС с целью доведения доли водорода более 50%.

Результаты работы были применены при создании конструктивного облика КС типа НК (ПАО «ОДК-Кузнецов»), работающей на перспективном виде топлива и опытного образца КС газотурбинной установки ГТЭ-65.1 с низкими выбросами оксидов азота для работы на метано-водородном топливе (АО «Силовые машины»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксютин, О.Е. Концепция крупномасштабного развития инновационных систем производства и распределения метано-водородного топлива как эффективного альтернативного энергоносителя [Текст] / О.Е. Аксютин, А.Г. Ишков, В.Г. Хлопцов, В.А. Казарян, А.Я. Столяревский //International gas union, 2012. – С. 1–13.
2. Бирюк, В.В. Газ в моторах [Текст]/ В.В. Бирюк, С.В. Лукачев, Д.А. Угланов, Ю.И. Цыбизов. - Самара: Изд-во Самар. Ун-та, 2021.
3. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст]/ Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г. Л. Агафонова, под ред. П. А. Власова. – М., ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
4. Владимиров, А.В. Новые технологии снижения вредных выбросов и CO₂ в продуктах сгорания ГТУ и ГТД путем подмешивания и постепенного перехода к водородному топливу [Текст]/ А. В. Владимиров, Е.Д. Свердлов, А. Н. Дубовицкий// Авиационные двигатели, 2022. - Т. 2, № 15.
5. Водородная экономика предлагает многообещающий путь к декарбонизации [Электронный ресурс]. – URL: <https://about.bnef.com/blog/hydrogen-economy-offers-promising-path-to-decarbonization/> (дата обращения: 01.12.2020).
6. Водородное топливо [Электронный ресурс]// Extxe, 2019. – URL: <https://extxe.com/11839/vodorodnoe-toplivo/#3>
7. Волков, К.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений [Текст]/ К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. – М.: Физматлит, 2008. – 364 с.
8. Волков, С.А. Исследование путей обеспечения международных требований по эмиссии вредных веществ отечественными турбореактивными двухконтурными двигателями нового поколения [Текст]/ С.А. Волков, А.И. Ланшин// Экологические проблемы авиации/ Труды ЦИАМ. – М., 2010. – С. 283-290.

9. Гольцев, В.Ф., Гомзякова И.И. Исследование влияния гомогенизации горючей смеси и давления на образование вредных веществ в камерах сгорания перспективных газотурбинных двигателей [Текст]/ В. Ф. Гольцев, И.И. Гомзякова// Экологические проблемы авиации / Труды ЦИАМ. – М., 2010. – С. 291-303.
10. Гураков Н.И. Расчетно-экспериментальное исследование горения метановодородных смесей в модельной камере сгорания газотурбинной установки / Н.И. Гураков, О.В. Коломзаров, Д.В. Идрисов, С.С. Новичкова, Л.Ш. Эмирова, В.Ю. Абрашкин, С.С. Матвеев, С.Г. Матвеев, Н.И. Фокин, Н.О. Симин, А.А. Ивановский, Д.С. Тарасов // Физика горения и взрыва — 2023. — №2. — С. 16-23.
11. Гусев, А.Л. Применение водорода в автомобильных двигателях внутреннего сгорания в блокадном Ленинграде [Текст]/ А.Л. Гусев, Ю.П. Дядюченко// Безопасность и экономика водородного транспорта: сб. тезисов докладов 2 межд. симп. – Саров, 2003. – С.11-13.
12. Европейский альянс чистого водорода [Электронный ресурс]. – URL: https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-clean-hydrogen-alliance_en (дата обращения: 01.12.2020).
13. Зельдович, Я.Б. Математическая теория горения и взрыва [Текст]/ Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
14. Зубрилин, И. А. Влияние процесса горения на структуру закрученного потока за горелочным устройством камеры сгорания газотурбинной установки [Текст]/ И. А. Зубрилин, А. А. Диденко, Д. Н. Дмитриев, Н. И. Гураков, М. Эрнандэс Моралес// Вестник Московского авиационного института, 2019. – Т. 26. – №. 3. – С. 124-136.
15. Идрисов Д.В. Границы устойчивости пламени метан-водородных смесей/ Д.В. Идрисов, Н.И. Гураков, О.В. Коломзаров, А.С. Семенихин, А.Д. Попов, А.А. Литарова, С.С. Матвеев, А.А. Кузнецова // Краткие сообщения по физике – 2023. — С. 44-54.

16. Идрисов Д.В. Расчетно-экспериментальное исследование границы устойчивой работы при горении метановодородной смеси / Д.В. Идрисов, С.С. Матвеев, А.А. Литарова, А.Д. Попов, О.В. Коломзаров, В.Ю. Абрашкин, Л.Ш. Эмирова, С.С. Новичкова // Неравновесные процессы: плазма, горение, атмосфера. – Москва, 2022. – С.82-84.
17. Интеграция энергетической системы. Водород [Электронный ресурс]. – URL: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-system-integration/hydrogen_en (дата обращения: 01.12.2020).
18. Киверин, А.Д. Механизмы развития интенсивных динамических процессов при сжигании водорода в камерах сгорания ДВС, ТВТ, 60:1[Текст]/ А.Д. Киверин, А.Е. Смыгалина// Теплофизика высоких температур, 2022. – Т. 60, № 1. – С.103-107.
19. Козлов, С.И. Автомобили с водородными поршневыми двигателями [Текст]/ С. И. Козлов, В.И. Фатеев, С.В. Люгай// Транспорт на альтернативном топливе, 2014. – №4. – С.15-23.
20. Кузнецов, Н.Д. Использование водорода в качестве топлива в авиации [Текст]/ Н. Д. Кузнецов// Атомно-водородная энергетика и технология; гл.ред. В.А. Легасов. Вып.3. - М: Энергоиздат, 1980. - С.161-171.
21. Ланский, А.М. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД [Текст]/ А.М. Ланский, С.В. Лукачев, С.Г. Матвеев. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2009. – 335 с.
22. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст]/А. Лефевр. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
23. Матвеев С.С. Исследование нормальной скорости распространения пламени метановоздушной смеси при обогащении водородом и разбавлении водяным паром / С.С. Матвеев, Д.В. Идрисов, А.А. Литарова, А.Д. Попов, Н.И. Гураков, М.Ю. Анисимов, Л.Ш. Эмирова // Неравновесные процессы: плазма, горение, атмосфера. – Москва, 2022. – С.79-81.
24. Матвеев, С.С. Методика определения эмиссии оксидов углерода камерами сгорания газотурбинных двигателей с использованием детальной

- химической кинетики окисления суррогатов керосина [Текст]: дисс. канд. тех. наук: 05.07.05/ Матвеев Сергей Сергеевич. – Самара, 2017. – 175 с.
25. Митрова, Т. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию [Текст]/ Т. Митрова, Ю. Мельников, Д. Чугунов// Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – М., 2019. – 61 с.
26. Обзор современных технологий сжигания альтернативного топлива с высоким содержанием водорода в газовых турбинах [Текст]: отчет о НИР (заключ.)/ Самарский ун-т; рук. С.С. Матвеев; испон.: И.В. Чечет [и др.]. – Самара., 2020. – 160 с.
27. Орлов, М.Ю. Моделирование процессов в камере сгорания: учеб. Пособие [Текст]/ М.Ю. Орлов, С.В. Лукачев, С.Г. Матвеев. – Самара: изд-во Самарского университет, 2017. – 292 с.
28. ОСТ 1 01021-93 Стенды испытательные авиационных газотурбинных двигателей. Общие требования [Текст]. – Введ. 1994- 07- 01. – 1993. – 18 с.
29. Палкин, В.А. Обзор работ за рубежом по применению альтернативных видов топлива в авиации [Текст]/ В.А. Палкин// Авиационные двигатели, 2021. – №4 (13). – С. 63-84.
30. Первый в мире демонстрационный образец водородной газовой турбины Power to X to Power [Электронный ресурс]// World-Energy, 2020. – URL: <https://www.world-energy.org/article/9684.html> (дата обращения: 01.12.2020).
31. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 [Текст]/ под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. ИНЭИ РАН–Московская школа управления СКОЛКОВО. – М., 2019. – 210 с.
32. Радченко, Р.В. Водород в энергетике [Текст]: учеб. пособие / Р.В. Радченко, А.С. Мокрушин, В.В. Тюльпа. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229 с.
33. Раменский, А.Ю. Исследование рабочих процессов автомобильного двигателя на бензин-водородных топливных композициях [Текст]: дис. канд. технич. наук: защищена 20.04.1982/ Раменский Александр Юрьевич. – М., 1982. – 202с.

34. Российская Федерация. Распоряжение правительства. План мероприятий Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года [Электронный ресурс]. - М., 12 октября 2020 г. №2634-р.
35. Седнин, В.А. Возможность использования водорода в газотурбинных установках [Текст]/ В. А. Седнин, А. В. Седнин, А. А. Матявин// Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2023. – Т. 66, № 2. – С. 158–168.
36. Семенихин А.С. Кинетические модели горения метановодородных смесей: краткий обзор и их валидация / А.С. Семенихин, С.С. Матвеев, И.В. Чечет, С.Г. Матвеев, Д.В. Идрисов, Н.И. Гураков, Д.В. Радин, С.С. Новичкова, Н.И. Фокин, Н.О. Симин, А.А. Ивановский, Д.С. Тарасов // Теплоэнергетика. — 2022. — № 10. — С. 79-89.
37. Смирнов Е. М., Гарбарук А. В. Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений [Текст] //СПб: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – 2010. – 127 с.
38. Титова, Н.С. Исследование воспламенения и горения водорода и метана в газовых потоках при возбуждении электронных степеней свободы молекул кислорода [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.02.05: защищена 02.03.2012 / Титова Наталья Сергеевна. – М., 2012 Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова. – 176 с.
39. Федорченко Д.Г., Цыбизов Ю.И., Воротынцев И.Е Опыт и перспективы использования криогенных и газокompозитных топлив [Текст] / Д.Г. Федорченко, Ю.И. Цыбизов, И.Е. Воротынцев // Авиационные двигатели, 2023. – Т. 2, № 19. – С.43-50.
40. Филиппов, С. Топливные элементы и водородная энергетика [Текст]/ С. Филиппов, А. Голодницкий, А. Кашин// Энергетическая политика. – 2020. – 17 ноября.

41. Шлякотин, В.Е. Оценка энергетических затрат на производство водородного топлива [Текст]/ В.Е. Шлякотин// Авиационные двигатели, 2022. – №4 (17).
42. Юлкин М.А. Низкоуглеродное развитие: от теории к практике / М. А. Юлкин// Центр экологических инвестиций, 2018. – 80 с.
43. Юн, А.А. Расчет и моделирование турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений в программном комплексе Fastest-3D [Текст]/А. А. Юн, Б. А. Крылов. – М.: МАИ, 2007. – 115 с.
44. A Revolution in Combustion Technology for Power Generation Gas Turbines [Электронный ресурс]. – URL: https://psm.com/wp-content/uploads/2019/09/PSM_FlameSheet.pdf (дата обращения: 17.10.2020).
45. Abdel-Raheem, M. A. Large eddy simulation of hydrogen–air premixed flames in a small-scale combustion chamber [Text] / M. Abdel-Raheem, S. Ibrahim, W. Malalasekera, A. Masri // Int J Hydrogen Energy, 2015. – №40(7). – P.3098–3109.
46. Alekseev, V.A. The Effect of Temperature on the Adiabatic Burning Velocities of Diluted Hydrogen Flames: A Kinetic Study Using an Updated Mechanism [Text]/ V.A. Alekseev, M. Christensen, A.A. Konnov// Combustion and Flame, 2015. – V. 162, I. 5. – P. 1884–1898.
47. Ali, A. Numerical and experimental study of swirl premixed CH₄/H₂/O₂/CO₂ flames for controlled-emissions gas turbines [Text] / A. Ali, M.A. Nemitallah, A. Abdelhafez, B. Imteyaz, M.M. Kamal, M. M. M.A. Habib // International Journal of Hydrogen Energy, 2020. – V.45, Is. 53. –P. 29616-29629.
48. Ansys Inc. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения: 03.08.2018).
49. Baigmohammadi, M. Comprehensive experimental and simulation study of the ignition delay time characteristics of binary blended methane, ethane, and ethylene over a wide range of temperature, pressure, equivalence ratio, and dilution [Text] / M. Baigmohammadi, V. Patel, S. Nagaraja, A. Ramalingam, S. Martinez, S.

Panigrahy, A. Mohamed, K.P. Somers, U. Burke, K.A. Heufer, A. Pekalski, H.J. Curran// *Energy Fuels*, 2020. – V. 34. – P. 8808-8823.

50. Baldwin, R.R. Rate Constants for Hydrogen + Oxygen System, and for H Atoms and OH Radicals + Alkanes [Text]/ R.R. Baldwin, R.W. Walker// *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1979. – V. 75. – P. 140-154.

51. Baldwin, R.R. Second Limit of Hydrogen + Oxygen Mixtures: The Reaction $H + HO_2$ / R.R. Baldwin, M.E. Fuller, J.S. Hillman, D. Jackson, R.W. Walker// *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1974. – V. 70. – P. 635-641.

52. Bancalari, E. Advanced hydrogen gas turbine development program [Text] / E. Bancalari, P. Chain, I.S. Diakunchak // *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2007. – V. 2. – P. 977-987.

53. Barlow, R. S. Effects of preferential transport in turbulent bluff-body-stabilized lean premixed CH_4 /air flames [Text] / R.S. Barlow, M.J. Dunn, M.S. Sweeney, S. Hochgreb // *Combustion and Flame*, 2012. – № 159(8). – P. 2563–2575.

54. Barlow, R. S. Preferential transport effects in premixed bluff-body stabilized CH_4/H_2 flames [Text]/ R.S. Barlow, M.J. Dunn, G. Magnotti // *Combustion and Flame*, 2015. – № 162(3). –P. 727–735.

55. Bastiaans, R.J.M. DNS of lean hydrogen combustion with flamelet-generated manifolds [Text] / R.J.M. Bastiaans, A.W. Vreman, H. Pitsch // *Center for Turbulence Research Annual Research Briefs*, 2007. – № 28(1983). – P.195–206.

56. Baulch, D.L. Evaluated Kinetic Data for Combustion Modeling: Supplement II. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* [Text]/ D.L. Baulch, C.T. Bowman, C.J. Cobos, R.A. Cox, Th. Just, J.A. Kerr, M.J. Pilling, D. Stocker, J. Troe, W. Tsang, R.W. Walker, J. Warnatz// *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2005. – V. 34, I. 3 – P. 757-1397.

57. Bonzani, F. Meeting the Demand for High Fuel Flexibility: The Ansaldo Energia Experience [Text] / F. Bonzani // *Ansaldo Energia*, 2012. – P. 1-23.

58. Bonzani, F. Operating Experience of High Flexibility Syngas Burner for IGCC Power Plant [Text] / F. Bonzani, P. Gobbo // Proceedings of ASME Turbo Expo, 2007. – P. 65–71.
59. Bosschaart, K. J. The Laminar Burning Velocity of Flames Propagating in Mixtures of Hydrocarbons and Air Measured with the Heat Flux Method [Text]/ K. J. Bosschaart, L. P. H. de Goey, J. M. Burgers// Combustion and Flame, 2004. – V. 136. - P. 261–269.
60. Bosschaart, K.J. Detailed analysis of the heat flux method for measuring burning velocity [Text]/ K.J. Bosschaart, L.P.H. de Goey// Combust Flame, 2003. – V. 132. – P. 170-180.
61. Bougrine, S. Numerical study of laminar flame properties of diluted methane-hydrogen-air flames at high pressure and temperature using detailed chemistry [Text] / S. Bougrine, S. Richard, A. Nicolle, D. Veynante // Int J Hydrogen Energy, 2011. – V. 36, I. 18. – P. 12035-12047.
62. Boushaki, T. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane-air premixed flame: experimental and numerical analysis [Text] / T. Boushaki, Y. Dhue, L. Selle, B. Ferret, T. Poinso // Int J Hydrogen Energy, 2012. – V. 37, I. 11. – P. 9412-9422.
63. Burke, M.P. A Quantitative Explanation for the Apparent Anomalous Temperature Dependence of $\text{OH} + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ through Multi-Scale Modeling [Text]/ M.P. Burke, S.J. Klippenstein, L.B. Harding// Proceedings of the Combustion Institute, 2013. – V. 34. – P. 547- 555.
64. Burke, M.P. Comprehensive H_2/O_2 Kinetic Model for High-Pressure Combustion [Text]/ M.P. Burke, M. Chaos, Y. Ju, F.L. Dryer, S.J. Klippenstein// International Journal of Chemical Kinetics, 2011. – V. 44, I. 7. – P. 444-474.
65. Burke, M.P. Ephemeral collision complexes mediate chemically termolecular transformations that affect system chemistry [Text] / M.P. Burke, S.J. Klippenstein // Nat. Chem, 2017. – V. 9. – 1078 p.

66. Cappelletti, A. Investigation of a pure hydrogen fueled gas turbine burner [Text] / A. Cappelletti, F. Martelli // International Journal of Hydrogen Energy, 2017. – V. 42, I.15. – P. 10513-10523.
67. Capriolo, G. An experimental and kinetic study of propanal oxidation [Text] / G. Capriolo, V.A. Alekseev, A.A. Konnov // Combustion and Flame, 2018. – V.197. – P.11-21.
68. Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications [Электронный ресурс]. – URL: <http://combustion.ucsd.edu>. (дата обращения: 17.10.2020).
69. Cheng, R. K. Laboratory investigations of a low-swirl injector with H₂ and CH₄ at gas turbine conditions [Text] / R.K. Cheng, D. Littlejohn, P.A. Strakey, T. Sidwell // Proceedings of the Combustion Institute, 2009. – № 32(2). – P. 3001–3009.
70. Cocchi, S. Experimental Characterization of a Hydrogen Fuelled Combustor with Reduced NO_x Emissions for a 10 MW Class Gas Turbine [Text] / S. Cocchi, M. Provenzale, S. Sigali, L. Carrai // Proceedings of ASME Turbo Expo, 2008. – P. 991–1000.
71. Colin, O A thickened flame model for large eddy simulations of turbulent premixed combustion [Text] / O. Colin, F. Ducros, D. Veynante, T. Poinsot // Physics of Fluids, 2000. – № 12(7). – P. 1843–1863.
72. Conaire, M. Ó A comprehensive modeling study of hydrogen oxidation [Text] / M. Ó Conaire, H.J. Curran, J.M. Simmie, W.J. Pitz, C.J. Westbrook // Int J Chem Kinet, 2004. – V.36, №11. – P. 603-622.
73. Coppens, F.H.V. Effects of hydrogen enrichment on adiabatic burning velocity and NO formation in methane + air flames [Text] / F.H.V.Coppens, J.De Ruyck, A.A.Konnov // Experimental Thermal and Fluid Science, 2007. – V.31, I.5. – P.437-444.
74. Coppens, F.H.V. The effects of composition on burning velocity and nitric oxide formation in laminar premixed flames of CH₄+H₂+O₂+N₂ [Text] / F.H.V. Coppens, J.D. Ruyck, A.A. Konnov // Combust Flame, 2007. – V. 149, №4. – P. 409-417

75. Dayma, G. New insights into the peculiar behavior of laminar burning velocities of hydrogen-air flames according to pressure and equivalence ratio [Text]/ G. Dayma, F. Halter, P. Dagaut// *Combustion and Flame*, 2014. – V. 161(9). – P. 2235-2241.
76. De, A. Parametric study of upstream flame propagation in hydrogen-enriched premixed combustion: effects of swirl, geometry and premixedness [Text] / A. De, S. Acharya // *Int J Hydrogen Energy*, 2012. – №37(19). – P.14649–14668.
77. Decarbonising aviation: the sustainable way forward: A just transition to a net positive world. RSB [Электронный ресурс]. - 2021. – URL: <https://advancedbiofuelsusa.info/decarbonising-aviation-the-sustainable-way-forward/> (дата обращения: 01.12.2020).
78. Dirrenberger, P. Measurements of laminar flame velocity for components of natural gas [Text] / P. Dirrenberger, H. Le Gall, R. Bounaceur, O. Herbinet, P.A. Glaude, A.A. Konnov F. Battin-Leclerc // *Energy Fuels*, 2011. – V. 25, I. 9. – P. 3875-3884.
79. Dodo, S. Performance of a Multiple-Injection Dry Low NO_x Combustor with Hydrogen-Rich Syngas Fuels [Text]/ S. Dodo, T. Asai, H. Koizumi, H. Takahashi, S. Yoshida, H. Inoue// *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013. – V. 135, № 1. – P. 1-7.
80. Donohoe, N. Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures [Text] / N. Donohoe, A. Heufer, W. Metcalfe, H. Curran, M. Davis, O. Mathieu, D. Plichta, A. Morones, E. Petersen, F. Güthe // *Combustion and Flame*, 2014. – V.161, I.6. – P.1432-1443.
81. Dowdy, D.R. The use of expanding spherical flames to determine burning velocities and stretch effects in hydrogen/air mixtures [Text]/ D.R. Dowdy, D. B. Smith, S. C. Taylor, A. Williams// *Proc. Combust. Inst*, 1991. - V. 23. – P. 325-332.
82. Dresser-Rand. Siemens SGT-200 Gas Turbine [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dresser-rand.com/products-solutions/0-15-mw/siemens-sgt-200-gas-turbine/> (дата обращения: 17.10.2020).

83. Frassoldati, A. A wide range modeling study of NO_x formation and nitrogen chemistry in hydrogen combustion [Text] / A. Frassoldati, T. Faravelli, E. Ranzi // Int J Hydrogen Energy, 2006. – № 31(15). – P.2310–28.
84. Funke, H. H.-W. Numerical and experimental characterization of low NO_x Micromix combustion principle for industrial hydrogen gas turbine applications [Text] / H.H.W. Funke, S. Börner, J. Keinz, K. Kusterer, D. Kroniger, J. Kitajima, M. Kazari, A. Horikawa // ASME Turbo Expo, 2012. – V. GT2012- 69421. – P. 1-11.
85. Funke, H.H.W. Experimental and Numerical Study on Optimizing The DLN Micromix Hydrogen Combustion Principle for Industrial Gas Turbine Applications [Text] / H.H.-W. Funke, J. Keinz, K. Kusterer, A.H. Ayed, M. Kazari, J. Kitajima, A. Horikawa, K. Okada // ASME Turbo Expo, 2015. – V. GT2015-42043. – P. 1-11
86. Gadde, S. Advanced f class gas turbines can be a reliable choice for igcc applications [Text] / S. Gadde, J. Xia, G. Mcquiggan // Advanced F Class Gas Turbines Can be a Reliable Choice for IGCC Applications, 2006. – P. 1-13.
87. Garcia-Armingol, T. Operational issues in premixed combustion of hydrogen-enriched and syngas fuels [Text] / T. Garcia-Armingol, J. Ballester // International Journal of Hydrogen Energy, 2015. – V. 40. – P.1229-1243.
88. GE. GE10-1 Gas Turbine [Электронный ресурс]. – URL: <http://pdf.directindustry.com/pdf/ge-gas-turbines/ge10-1-gas-turbine/34155-466657.html> (дата обращения: 17.10.2020).
89. Giacomazzi, E. LES analysis of a syngas turbulent premixed dump-combustor at 5 bar [Text] / E. Giacomazzi, D. Cecere, F. Donato, F. Picchia, N. Arcidiacono, S. Daniele// Int. Conf. on Processes and Technologies for a Sustainable Energy, 2010. – V. 32. – P. 1-11.
90. Glarborg, P. Modeling Nitrogen Chemistry in Combustion [Text]/ P. Glarborg, J.A. Miller, B. Ruscic, S.J. Klippenstein// Progress in Energy and Combustion Science, 2018. – V. 67. – P. 31-68.

91. Gockeler, K. Laminar burning velocities and emissions of hydrogen-methane-air-steam mixtures [Text] / K. Gockeler, O. Kruger, C.O. Paschereit // *J Eng Gas Turbines Power*, 2014. – V.137, I. 3. – P. 1-8.
92. Goldmeer, J. Power to gas: hydrogen for power generation [Text] / J. Goldmeer // *E Power*, 2017. – P. 1–18.
93. Goswami, M. The effect of elevated pressures on the laminar burning velocity of methane þ air mixtures [Text]/ M. Goswami, S.C.R. Derks, K. Coumans, W. J. Slikker, M. H. de Andrade Oliveira, R.J.M. Bastiaans, et al// *Combust Flame*, 2013. V. 160. – P. 1627-35.
94. Griebel, P. Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology [Text] / P. Griebel // Detlef Stolten, Emonts, 2016. – P. 1011–1032.
95. Gu, X.J. Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane-air mixtures [Text]/ X.J. Gu, M. Z. Haq, M. Lawes, R. Woolley// *Combust Flame*, 2000. – V. 21(1e2). – P. 41-58.
96. Guo, S. M. Effect of hydrogen enrichment on swirl/bluff-body lean premixed flame stabilization [Text] / S. Guo, J. Wang, W. Zhang, M. Zhang, Z. Huang // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2000. – № 45(18). –P. 10906–10919.
97. Gurakov, N.I. Numerical and Experimental Study of Combustion of Methane–Hydrogen Mixtures in a Model Combustion Chamber of a Gas-Turbine Power Plant [Text]/ N.I. Gurakov, O.V. Kolomzarov, D.V. Idrisov, S. S. Novichkova, L. Sh. Elmirova, V. Y. Abrashkin, S.S. Matveev, S. G. Matveev, N. I. Fokin, N. O. Simin, A. A. Ivanovskiy, D. S. Tarasov// *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2023. – Vol. 59. № 2. – P. 137-144.
98. Gurakov, N.I. Simulation of Carbon Monoxide Emission during Combustion of a Liquid Fuel Injected by a Pressure Swirl Atomizer into the Combustion Chamber [Text]/ N.I. Gurakov, I. A. Zubrilin, O. V. Kolomzarov, D.V. Idrisov, V. M. Anisimov, A.D. Popov, V. Y. Abrashkin, S. G. Matveev, S.S. Matveev// *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2023. – Vol. 59. № 2. – P. 180-184.
99. Gurakov, N.I. Simulation of pollutant emissions in a small-sized combustion chamber with a gas fuel for various regime modes [Text]/ N.I. Gurakov, I. A.

- Zubrilin, I. V. Chechet, V. M. Anisimov, S.S. Matveev, D.V. Idrisov, M. Y. Anisimov// ASME 2019 Gas Turbine India Conference. GTINDIA, 2019. –V. 2.
100. Gurakov, N.I. Stability Limits of the Methane–Hydrogen Mixture Combustion [Text]/ N.I. Gurakov, O.V. Kolomzarov, D.V. Idrisov, A.A. Litarova, A.S. Semenikhin, A.A. Kuznetsova, S.S. Matveev // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2023. – Vol. 50, № 4. – P. 150-157.
101. Haj Ayed, A. CFD based exploration of the dry-low-NOx hydrogen micromix combustion technology at increased energy densities [Text] / A. HajAyed, K.Kusterer, H.H.-W. Funke, J.Keinz, D.Bohn //Propulsion and Power Research, 2017. – V. 6, Is. 1. – P. 15-24.
102. Haj Ayed, A. Experimental and numerical investigations of the DLN hydrogen micromix combustion chamber of an industrial gas turbine [Text] / A. Haj Ayed, K. Kusterer, H.H.-W. Funke, C. Striegan, D. Bohn // Propuls. Power Res, 2015. – № 4 (3). – P. 123–131.
103. Haj Ayed, A. Improvement study for the dry-low-NOx hydrogen micromix combustion technology [Text] / A. Haj Ayed, K. Kusterer, H.H.-W. Funke, C. Striegan, D. Bohn // Propuls. Power Res, 2015. – № 4 (3). – P. 132–140.
104. Halouane, Y. CFD simulations of premixed hydrogen combustion using the Eddy Dissipation and the Turbulent Flame Closure models [Text]/ Y. Halouane, A. Dehbi// International Journal of Hydrogen Energy, 2017. – V. 42, I. 34. – P. 21990-22004.
105. Halter, F. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures [Text] / F. Halter, C. Chauveau, N. Djebaili-Chaumeix, I. Gokalp // Proc Combust Inst, 2005. – V. 30. I. 1. – P. 201-208.
106. Han, W. Large eddy simulation/dynamic thickened flame modeling of a high Karlovitz number turbulent premixed jet flame [Text] / W. Han, H. Wang, G. Kuenne, E. R. Hawkes, J. H. Chen, J. Janicka, C. Hasse // Proceedings of the Combustion Institute, 2019. – № 37(2). – P.2555–2563.

107. Harding, L.B. Ab Initio Methods for Reactive Potential Surfaces [Text]/ L.B. Harding, S.J. Klippenstein, A.W. Jasper// Physical Chemistry Chemical Physics, 2007. – V. 9, I. 31. – P. 4055-4070.
108. Hermanns, R. Laminar burning velocity of methane-hydrogen-air mixtures [Text]: thesis for PhDR: protected 10.07/ Roy Hermanns. – Eindhoven, 2007. – P. 144.
109. Hernandez-Perez, F.E. Large-eddy simulation of lean hydrogen–methane turbulent premixed flames in the methane-dominated regime [Text] / F.E. Hernandez-Perez, C.P. Groth, O.L. Gulder // Int J Hydrogen Energy, 2014. – № 39(13). – P.7147–7157.
110. Hong, Z. A New Shock Tube Study of the $H + O_2 \rightarrow OH + O$ Reaction Rate Using Tunable Diode Laser Absorption of H_2O near $2.5 \mu m$ [Text]/ Z. Hong, D.F. Davidson, E.A. Barbour, R.K. Hanson// Proceedings of the Combustion Institute, 2011. – V. 33, I. 1. – P. 309-316.
111. Hong, Z. On the Rate Constants of $OH + HO_2$ and $HO_2 + HO_2$: A Comprehensive Study of H_2O_2 Thermal Decomposition using Multi-Species Laser Absorption [Text]/ Z. Hong, K.-Y. Lam, R. Sur, S. Wang, D.F. Davidson, R.K. Hanson// Proceedings of the Combustion Institute, 2013. – V. 34, I. 1. – P. 565-571.
112. Hossaini, M. Review of the new combustion technologies in modern gas turbines [Обзор новых технологий сжигания в современных газовых турбинах] [Text] / M. Hossaini. - Padua: IntechOpen, 2012. – 245 p.
113. Hu, E. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane-hydrogen-air flames [Text] / H. Hu, Z. Huang, J. He, C. Jin, J. Zheng // Int J Hydrogen Energy, 2009. – V. 34, I. 11. – P. 4876-4888.
114. Hu, E. Measurements of laminar burning velocities and onset of cellular instabilities of methane-hydrogen-air flames at elevated pressures and temperatures [Text] / E. Hu, Z. Huang, J. He, J. Zheng, H. Miao // Int J Hydrogen Energy, 2009. – V. 34, I. 13. – P.5574-5584.

115. Hu, E. Shock tube study on ignition delay of hydrogen and evaluation of various kinetic models [Text] / E. Hu, L. Pan, Z. Gao, X. Lu, X. Meng, Z. Huang // International Journal of Hydrogen Energy, 2016. – V.41, I.30. – P.13261-13280.
116. Huang, J. Experimental and kinetic study of shock-initiated ignition in homogeneous methane–hydrogen–air mixtures at engine relevant conditions [Text]/ J. Huang, W.K. Bushe, P.G. Hill, S.R. Munshi// Int. J. Chem. Kinet, 2006. – V. 38, Is. 4. – P. 221–233.
117. Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 [Электронный ресурс] – URL: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2020-07/20200720_Hydrogen%2520Powered%2520Aviation%2520report_FINAL%2520web.pdf (дата обращения: 01.12.2020).
118. Idirsov, D.V. Laminar Burning Velocity of the Surrogate of Aircraft Kerosene and its Components [Text]/ D.V. Idirsov, S.S. Matveev, S. G. Matveev, A.D. Popov, A. N. Belousov// 2021 International Scientific and Technical Engine Conference (EC), 2021. – P. 1 – 4.
119. Idirsov D.V. Experimental and numerical study of lean flame blow-out during methane-hydrogen mixture combustion with a different hydrogen addition / D.V. Idirsov, N.I. Gurakov, O.V. Kolomzarov, I.V. Chechet, V.M. Anisimov, S.S. Matveev, S.G. Matveev, N.I. Fokin, D.S. Tarasov, A.A. Ivanovskii, N.O. Simin // Proceeding of the International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments. – Samara, 2022. – P.75.
120. Ilbas, M. Laminar burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-methane-air mixtures: an experimental study [Text] / M. Ilbas, A.P. Crayford, I. Yilmaz, P.J. Bowen, N. Syred // Int J Hydrogen Energy, 2006. – V 31, I. 12. – P. 1768-1779.
121. Imteyaz, B. Operability of a premixed combustor holding hydrogen-enriched oxy-methane flames: An experimental and numerical study [Text] / B. Imteyaz, M. Habib, M. Nemitallah, A. Abdelhafez, R. Ben-Mansour // International Journal of Energy Research, 2020. – P.3049 – 3063.

122. Imteyaz, B.A. Combustion behavior and stability map of hydrogen-enriched oxy-methane premixed flames in a model gas turbine combustor [Text] / B.A. Imteyaz, M.A. Nemitallah, A.A. Abdelhafez, M.A. Habib // International Journal of Hydrogen Energy, 2018. – № 43(34). – P. 16652–16666.
123. Inoue, K. Development of hydrogen and natural gas co-firing gas turbine [Text]/ K. Inoue, K. Miyamoto, S. Domen, I. Tamura, T. Kawakami, S. Tanimura// Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2018. – V. 55, № 2.
124. Ji, C. A comprehensive study of light hydrocarbon mechanisms performance in predicting methane/hydrogen/air laminar burning velocities [Text] / C. Ji, D. Wang, J. Yang, S. Wang // Int J Hydrogen Energy, 2017. – V. 42, I. 27. – P. 17260-17274.
125. Jones, R.M. Fuel Flexibility Concepts and Experience for Power Generation with Hydrogen Based Fuels [Text] / R.M. Jones, T. Raddings, J. Dicampoli // Power-GEN Europe; GE Power & Water. – Vienna, 2013. – P. 1–11.
126. Kanpp, K. Fuel Flexibility Capabilities of Alstom's GT24 and GT26 Gas Turbines [Text] / K. Kanpp, K. Syed, M. Stevens // Power-GEN Asia, 2012. – P. 1–16.
127. Karkach, S.P. Ab Initio Analysis of the Transition States on the Lowest Triplet H₂O₂ Potential Surface [Text]/ S.P, Karkach, V.I. Osheroov// The Journal of Chemical Physics, 1999. – V. 110, I. 24. – P. 11918-11927.
128. Kawasaki. Kawasaki Gas Turbine Generator Sets [Электронный ресурс]. – URL: http://global.kawasaki.com/en/energy/equipment/gas_turbines/index.html (дата обращения: 17.10.2020).
129. Kawasaki. L30A-01D/DLH Gas Turbine. – URL: https://global.kawasaki.com/en/corp/sustainability/green_products/L30A-01D_DLH.html (дата обращения: 17.10.2020).
130. Kéromnès, A. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures [Text] / A. Kéromnès, W.K. Metcalfe, K.A. Heufer, N. Donohoe, A.K. Das, C.-J. Sung // Combust Flame, 2013. – V. 160. – P. 995-1011.

131. Keyser, L.F. Kinetics of the Reaction $\text{OH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ from 254 to 382 K [Text]/ L.F. Keyser// The Journal of Physical Chemistry, 1988. – V. 92, I. 5. – P. 1193-1200.
132. Kim, H. Flame characteristics of hydrogen-enriched methane–air premixed swirling flames [Text] / H. Kim, V. Arghode, M. Linck, A. Gupta// International Journal of Hydrogen Energy, 2009. – № 34(2). –P. 1063–1073.
133. Kim, H. Hydrogen addition effects in a confined swirl-stabilized methane-air flame [Text] / H. Kim, V. Arghode, M. Linck, A. Gupta // International Journal of Hydrogen Energy, 2009. – № 34(2). – P. 1054–1062.
134. Klippenstein, S.J. From theoretical reaction dynamics to chemical modeling of combustion [Text] / S.J. Klippenstein // Proc. Combust. Inst, 2017. –V. 36. – P. 77-111.
135. Kolomzarov O.V. Experience in carrying out experimental studies for a dual-circuit burner using methane-hydrogen mixtures / O.V. Kolomzarov, V.Yu. Abrashkin, N.I. Gurakov, D.V. Idrisov, A.S. Semenikhin, A.S. Savchenkova, D.V. Radin, I.V. Chechet, N.I. Fokin, N.O. Simin // Proceeding of the International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments. – Samara, 2022. – P.81.
136. Konnov, A.A. Adiabatic laminar burning velocities of $\text{CH}_4+\text{H}_2+\text{air}$ flames at low pressures [Text] / A.A. Konnov, R. Riemeijer, L.P.H. Goey //Fuel, 2009. – V. 89, I. 3. – P. 13692-1396.
137. Konnov, A.A. Remaining Uncertainties in the Kinetic Mechanism of Hydrogen Combustion [Text]/ A.A. Konnov// Combustion and Flame, 2008. – V. 152, I. 4. – P. 507-528.
138. Konnov, A.A. Yet another kinetic mechanism for hydrogen combustion [Text] / A.A. Konnov // Combustion and Flame, 2019. – V.203. – P.14-22.
139. Konnov, AA. The effect of temperature on the adiabatic laminar burning velocities of CH_4 –air and H_2 –air flames [Text]/A.A.Konnov// Fuel, 2010. – V. 89. – P. 2211-2216.

140. Krejci, M.C. Laminar Flame Speed and Ignition Delay Time Data for the Kinetic Modeling of Hydrogen and Syngas Fuel Blends [Text]/ M.C. Krejci, O. Mathieu, A.J. Vissotski, S. Ravi, T.G. Sikes, E.L. Petersen, A. Keromnes, W. Metcalfe, H.J. Curran// *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013. – V. 135, I. 2. – № 021503.
141. Kwon, O.C. Flame/stretch interactions of premixed hydrogen fueled flames: measurements and predictions [Text]/ O. C. Kwon, G. M. Faeth// *Combustion and Flame*, 2011. – V. 124(4). P. 590-610.
142. Lam, K.K. Hydrogen Enriched Combustion Testing of Siemens Industrial SGT-400 at Atmospheric Conditions [Text] / K.K Lam, P. Geipel, J. Larfeldt // *Proceedings of ASME Turbo Expo*, 2014. – V. 137, I. 2. – P. 1–10.
143. Larfeldt, J. Hydrogen co-firing in Siemens low NO_x industrial gas turbines [Text]/ J. Larfeldt, M. Andersson, A. Larsson, D. Moell// *Siemens: Ingenuity for life*, 2017.
144. Law, C.K. Effects of hydrocarbon substitution on atmospheric hydrogen-air flame propagation [Text] / C.K. Law, O.C. Kwon // *Int J Hydrogen Energy*, 2004. – V. 29, I. 8. – P. 867-879.
145. Lazutkin, G. V. New Dampers Made of MR Material for Aircraft Engine Pipeline Supports [Text]/ G. V. Lazutkin, K.V. Boyarov, D.P Davydov// *Russian Aeronautics*, 2021. – Vol. 64, I. 1. – P. 44-51.
146. Leung, K.M. Detailed kinetic modeling of C₁-C₃ alkane diffusion flames [Text] / K.M. Leung, R.P. Lindstedt // *Combustion and Flame*, 1995. – № 102. – P. 129–160.
147. Li, J. An updated comprehensive kinetic model of hydrogen combustion [Text] / J. Li, Z. Zhao, A. Kazakov, F.L. Dryer // *Int J Chem Kinet*, 2004. – V.36. – P.566-575.
148. Li, R. Chemical mechanism development and reduction for combustion of NH₃/H₂/CH₄ mixtures [Text] / R. Li, A. Konnov, G. He, F. Qin, D. Zhang // *Fuel*, 2019. – V.257.

149. Li, R. Comparative analysis of detailed and reduced kinetic models for CH₄ + H₂ combustion [Text] / R. Li, G. He, F. Qin, C. Pichler, A. Konnov // Fuel, 2019. – V.246, I.15. – P.244-258.
150. Li, Y. Numerical study on the combustion and emission characteristics of a methanol/diesel reactivity-controlled compression ignition (RCCI) engine [Text] / Y. Li, M. Jia, Y. Liu, M. Xie // Appl Energy, 2013. – V. 106. – P. 184-197.
151. Liu, Y. Kinetic Study of the OH + HO₂ → H₂O + O₂ Reaction Using Ring Polymer Molecular Dynamics and Quantum Dynamics [Text]/ Y. Liu, H. Song, J. Li// Physical Chemistry Chemical Physics, 2020. – V. 22. – P. 23657-23664.
152. Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors, Matheson Gas [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.mathesongas.com/pdfs/products/Lower-\(LEL\)-&-Upper-\(UEL\)-Explosive-Limits-.pdf](https://www.mathesongas.com/pdfs/products/Lower-(LEL)-&-Upper-(UEL)-Explosive-Limits-.pdf) (дата обращения: 17.10.2020).
153. Mandilas, C. Effects of hydrogen addition on laminar and turbulent premixed methane and iso-octane-air flames [Text] / C. Mandilas, M.P. Ormsby, C.G.W. Sheppard, R. Woolley // Proceeding of the Combustion Institute, 2007. – V. 31, I. 1. – P. 1443-1450.
154. Masten, D.A. Shock Tube Study of the Reaction H + O₂ → OH + O Using OH Laser Absorption [Text]/ D.A. Masten, R.K. Hanson, C.T. Bowman// Journal of Physical Chemistry, 1990. – V. 94, I. 18. – P. 7119-7128.
155. Matveev S.S. Review of advances in the field of methane-hydrogen mixtures application in industrial gas turbines / S.S. Matveev, N.I. Gurakov, D.V. Idrisov, S.S. Novichkova, A.S. Savchenkova, D.S. Tarasov, N.I. Fokin, A.A. Ivanovskii // Proceeding of the International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments. – Samara, 2022. – P.89.
156. Matveev, S. S. Laminar burning velocities of benzene + air flames at room and elevated temperatures [Text]/ Y. V. Soloveva – Sokolova, I. V. Chechet, S. G. Matveev, A.A. Konnov// Fuel, 2016. – V. 175. – P. 302-309.

157. Matveev, S. S. Laminar burning velocities of surrogate components blended with ethanol [Text]/ S.S. Matveev, D.V. Idrisov, S. G. Matveev, A.A. Konnov// Combustion and Flame, 2019. – V. 209. – P. 389-393.
158. Matveev, S. S. Simulation of CO and CO₂ emissions in model combustion chamber based on the combination les and Reactor Network model [Text]/ S.S. Matveev, D.V. Idrisov, S. G. Shepakina// E3S Web of Conferences, 2019. – V. 80.
159. Menter, F.R. A scaleadaptive simulation model for turbulent flow prediction [Text] / F.R. Menter, M. Kuntz, R. Bender // AIAA Paper, 2003. – № 0767. – P. 1-11.
160. Menter, F.R. A scale-adaptive simulation model using two-equation models [Text] / F.R. Menter, Y. Egorov // AIAA Paper, 2005. – № 1095. – P. 1-11.
161. Metcalfe, W.K. A Hierarchical and Comparative Kinetic Modeling Study of C₁-C₂ Hydrocarbon and Oxygenated Fuels [Text] / W. K. Metcalfe, S. M. Burke, S. S. Ahmed, H. J. Curran // Intl. J. Chemical Kinetics, 2013. – V.45. – P.638-675.
162. Mével, R. Experimental and Modeling Study of the Oxidation of Silane by Nitrous Oxide Behind Reflected Shock Waves [Text]/ R. Mével, S. Javoy, G. Dupré// Conference: Journées d'études of the Belgian Section of the Combustion Institute, 2010. – V. 21. – P. 1-2.
163. Michael, J.V. Initiation in H₂/O₂: Rate Constants for H₂ + O₂ → H + HO₂ at High Temperature [Text]/ J.V. Michael, J.W. Sutherland, L.B. Harding, A.F. Wagner// Proceedings of the Combustion Institute, 2000. – V. 28, I. 2. – P. 1471-1478.
164. Michael, J.W. Rate Constants for the Reactions of H with H₂O and OH with H₂ by the Flash Photolysis-Shock Tube Technique over the Temperature Range 1246-2297 K [Text]/ J.V. Michael, J.W. Sutherland // The Journal of Physical Chemistry, 1998. – V. 92, I. 13. – P. 3853-3857.
165. Moell, D. Numerical investigation of hydrogen enriched natural gas in the sgt-800 burner [Text] / D. Moell, D. Lorstad, X.S. Bai // ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, 2015. – № GT2015-44040. – P. 1-10.

166. Monge-Palacios, M. Ab Initio and Transition State Theory Study of the $\text{OH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2(3\Sigma_g^-)/\text{O}_2(1\Delta_g)$ Reactions: Yield and Role of $\text{O}_2(1\Delta_g)$ in H_2O_2 Decomposition and in Combustion of H_2 [Text]/ M. Monge-Palacios, S.M. Sarathy// Physical Chemistry Chemical Physics, 2018. – V. 20, I. 6. – P. 4478-4489.
167. Morehead, H. Siemens Technology Improvements Enhance IGCC Plant Economics [Text] / H. Morehead, F. Hannemann. – San Francisco, 2005.
168. Mousavipour, S.H. Theoretical Study on the Kinetic and Mechanism of $\text{H} + \text{HO}_2$ Reaction [Text]/ S.H. Mousavipour, V. Saheb// Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2007. – V. 80, I. 10. – P. 1901-1913.
169. Mueller, M.A. Flow Reactor Studies and Kinetic Modeling of the H_2/O_2 Reaction [Text]/ M.A. Mueller, T.J. Kim, R.A. Yetter, F.L. Dryer// International Journal of Chemical Kinetics, 1999. – V. 31, I. 2. – P. 113-125.
170. Navarro, R. Introduction to hydrogen production [Text]/ R.Navarro, R. Guil, J.Fierro // Compendium of Hydrogen Energy. Volume 1: Hydrogen Production and Purification. Ed. by V. Subramani, A. Basile and T. N. Veziroglu. - Woodhead Publishing. – 2015.
171. Nemitallah, M.A. Experimental and computational study on stability characteristics of hydrogen-enriched oxy-methane premixed flames [Text] / M.A. Nemitallah, B. Imteyaz, A. Abdelhafez, M.A. Habib // Applied Energy, 2019. – № 250. – P. 433–443.
172. Nilsson, E.J.K. The comparative and combined effects of hydrogen addition on the laminar burning velocities of methane and its blends with ethane and propane [Text] / E.J.K. Nilsson, A. Sprang, J. Larfeldt, A.A. Konnov // Fuel, 2017. – V. 189. – P. 369-376.
173. Okafor, E.C. Effects of hydrogen concentration on premixed laminar flames of hydrogen-methane-air [Text] / E.C. Okafor, A. Hayakawa, Y. Nagano, T. Kitagawa // Int J Hydrogen Energy, 2014. – V. 39, I. 5. – P. 2409-2417.
174. Ottino, G.M. Combustion Modeling Including Heat Loss Using Flamelet Generated Manifolds: A Validation Study in OpenFOAM [Text] / G. M. Ottino, A.

- Fancello, M. Falcone, R.J.M. Bastiaans, L. P.H. De Goey // Flow, Turbulence and Combustion, 2016. – № 96(3). – P.773–800.
175. Park, O. Combustion characteristics of alternative gaseous fuels [Text]/ O. Park, P. S. Veloo, N. Liu, F. N. Egolfopoulos// Proc. Combust. Inst, 2011. – V. 33. – P. 887-94.
176. Petersen, E. L. Ignition of lean methane-based fuel blends at gas turbine pressures [Text]/ E.L. Petersen, J.M. Hall, S.D. Smith, J. Vries, A.R. Amadio, M.W. Crofton// J. Eng. Gas Turbines Power, 2007. – V. 129, Is. 4. – P. 937–944.
177. Poyyapakkam, M. Hydrogen Combustion Within a Gas Turbine Reheat Combustor [Text] / M. Poyyapakkam, J. Wood, A. Ciani, F. Guethe, K. Syed, S. Mayers, A. Ciani, F. Guethe, K. Syed // Proceedings of ASME Turbo Expo, 2012. – P. 847-854.
178. Ramaekers, W.J.S. The Application of Flamelet Generated Manifolds in Modelling of Turbulent Partially-Premixed Flames [Text] / W.J.S. Ramaekers, B.A. Albrecht, J.A. Van Oijen, L.P.H. de Goey, R.G.L.M. Eggels // Proceedings of the Fluent Benelux User Group Meeting, 2005. – P. 1-16.
179. Reiss, F. The ALSTOM GT13E2 Medium BTU Gas Turbine [Text] / F. Reiss, T. Griffin, K. Reyser // Proceedings of ASME Turbo Expo, 2002. – P. 1–8.
180. Samuelsen, S. The Gas Turbine Handbook [Text] / S. Samuelsen. – USA: National Energy Technology Laboratory, 2006. – P. 447.
181. Sellevåg, S.R. The Temperature and Pressure Dependence of the Reactions $H + O_2 (+M) \rightarrow HO_2 (+M)$ and $H + OH (+M) \rightarrow H_2O (+M)$ [Text]/ S.R. Sellevåg, Y. Georgievskii, J.A. Miller// The Journal of Physical Chemistry A., 2008. – V. 112, I. 23. – P. 5085-5095.
182. Shanbhogue, S.J. Flame macrostructures, combustion instability and extinction strain scaling in swirl-stabilized premixed CH_4/H_2 combustion [Text]/ S.J. Shanbhogue, Y.S. Sanusi, S. Taamallah // Combustion and Flame, 2016. – V. 163. – P. 494-507.

183. Shimizu, K. Updated Kinetic Mechanism for High-Pressure Hydrogen Combustion [Text]/ K. Shimizu, A. Hibi, M. Koshi, Y. Morii, N. Tsuboi// Journal of Propulsion and Power, 2011. – V. 27, I. 2. – P. 383-395.
184. Shy, S.S. Effects of H₂ or CO₂ addition, equivalence ratio, and turbulent straining on turbulent burning velocities for lean premixed methane combustion [Text] / S.S. Shy, Y.C. Chen, C.H. Yang, C.C. Liu, C.M. Huang // Combustion and Flame, 2008. – V. 153, I.4. – P. 510-524.
185. Siemens. SGT-600 Industrial Gas Turbine [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines/sgt-600.html> (дата обращения: 17.10.2020).
186. Sigali, S. Electricity from hydrogen with combined cycles The Fusina Project [Электронный ресурс] / S. Sigali// ModernPowerSystem, 2008. – URL: <https://www.modernpowersystems.com/features/featurefusina-combined-cycle-project-planning-to-run-on-pure-hydrogen/> (дата обращения: 17.10.2020).
187. Smith, G.P. Foundational Fuel Chemistry Model Version 1.0 (FFCM-1) [Электронный ресурс]/ G.P. Smith, Y.Тao, H.Wang. – URL: <http://nanoenergy.stanford.edu/ffcm1> (дата обращения: 17.10. 2020).
188. Smith, G.P. Кинетический механизм GRI 3.0 [Электронный ресурс]/ G.P. Smith, D. M. Golden, F. Frenklach, N. W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C. T. Bowman, R. K. Hanson, S. Song, W. C. Jr. Gardiner, V. V. Lissianski, Z. Qin. – URL: <http://www.me.berkeley.edu/grimech/> (дата обращения: 05.09.2018).
189. Song, Q. Revisiting the Gaussian Process Regression for Fitting High-Dimensional Potential Energy Surface and its Application to the OH + HO₂ → O₂ + H₂O reaction [Text]/ Q. Song, Q. Zhang, Q. Meng// The Journal of Chemical Physics, 2020. – V. 152, I. 13. – № 134309.
190. Sridharan, U.C. Kinetics and Product Channels of the Reactions of HO₂ with O and H Atoms at 296 K [Text]/ U.C. Sridharan, L.X. Qiu, F. Kaufman// The Journal of Physical Chemistry, 1982. – V. 86, I. 23. – P. 4569-4574.

191. Srinivasan, N.K. The Thermal Decomposition of Water [Text]/ N.K. Srinivasan, J.V. Michael// International Journal of Chemical Kinetics, 2006. – V. 38, I. 3. – P. 211-219.
192. Stagni, A. Skeletal mechanism reduction through species-targeted sensitivity analysis [Text] / A. Stagni, A. Frassoldati, A. Cuoci, T. Faravelli, E. Ranzi // Combustion and Flame, 2016. – V. 163. –P.382-393.
193. Stetson, N. Introduction to hydrogen storage [Text]/ N.Stetson, S. McWhorter, C.Ahn// Compendium of Hydrogen Energy. Volume 2: Hydrogen Storage, Distribution and Infrastructure. Edited by R. Gupta, A. Basile and T. Veziroglu - Woodhead Publishing. – 2016.
194. Stuttaford, P. FlameSheet™ combustor engine and rig validation for operational and fuel flexibility with low emissions [Text] / P. Stuttaford, H. Rizkalla, K. Oumejjoud, N. Demougeot, J. Bosnoian, F. Hernandez, M. Yaquinto, A. P. Mohammad, D. Terrell, R. Weller // Proceedings of ASME Turbo Expo, 2016. – P. 1–11.
195. Sun, H. High-pressure laminar flame speeds and kinetic modeling of carbon monoxide/hydrogen combustion [Text] / H.Sun, S.Y. Yang// Proceedings of the Combustion Institute, 2007. – V. 31 (1). – P. 439-446.
196. Sun, P. Well Converged Quantum Rate Constants for the $H_2 + OH \rightarrow H_2O + H$ Reaction via Transition State Wave Packet [Text]/ P. Sun, Z. Zhang, J. Chen, S. Liu, D.H. Zhang// The Journal of Chemical Physics, 2018. – V. 149, I. 6. – № 064303.
197. Sun, Z.Y. Propagation characteristics of laminar spherical flames within homogeneous hydrogen-air mixtures [Text]/ Z. Y. Sun, G. X. Li// Энергия, 2016. – V. 116. – P. 116-127.
198. Sutherland, J. W. Rate Constant for the Reaction of $O(3P)$ with H_2 by the Flash Photolysis–Shock Tube and Flash Photolysis–Resonance Fluorescence Techniques; $504K \leq T \leq 2495 K$ [Text]/ J.W. Sutherland, J.V. Michael, A.N. Pirraglia, F.L. Nesbitt, R.B. Klemm// Symposium (International) on Combustion, 1988. – V. 21, I. 1. – P. 929-941.

199. Taamallah, S. Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion: Technology, fundamentals, and numerical simulations [Text] / S. Taamallah, K. Vogiatzaki, F.M. Alzahrani, E.M.A. Mokheimer, M.A. Habib, A.F. Ghoniem // *Appl. Energy*, 2015. – V. 154. – P. 1020–1047.
200. The CRECK Modeling Group [Электронный ресурс]. – URL: <http://creckmodeling.chem.polimi.it/menu-kinetics/menu-kinetics-detailed-mechanisms> (дата обращения: 17.10.2020)
201. Troe, J. Detailed Modeling of the Temperature and Pressure Dependence of the Reaction $H + O_2 (+M) \rightarrow HO_2 (+M)$ [Text]/ J. Troe// *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000. – V. 28, I. 2. – P. 1463-1469.
202. Tse, S.D. Morphology and burning rates of expanding spherical flames in H_2/O_2 /inert mixtures up to 60 atmospheres [Text]/ S. D. Tse, D. L. Zhu, C. K. Law// *Proc. Combust. Inst*, 2000. – V. 28. – P. 1793-1799.
203. Vagelopoulos, C. M. Direct experimental determination of laminar flame speeds [Text]/ C. M. Vagelopoulos, F. N. Egolfopoulos// *Symposium (International) on combustion*, 1998. – V.27, I. 1. – P. 513-519.
204. Validation of C0-C1 [Электронный ресурс] – URL: https://www.universityofgalway.ie/media/researchcentres/combustionchemistrycentre/files/C0_C1.pdf (Дата обращения: 04.09.2023).
205. Van Oijen, J.A. State-of-the-art in premixed combustion modeling using flamelet generated manifolds [Text] / J. A. Van Oijen, A. Donini, R.J.M. Bastiaans, J.H.M. Thije Boonkamp, L.P.H. de Goey // *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016. – № 57. – P.30– 74.
206. Varga, T. Optimization of a hydrogen combustion mechanism using both direct and indirect measurements [Text] / T. Varga, T. Nagy, C. Olm, I.G. Zsély, R. Pálvölgyi, É. Valkó // *Proc Combust Inst*, 2015. – V. 35. – P. 589-596.
207. Wang, H. Mech Version II. High-Temperature Combustion Reaction Model of $H_2/CO/C_1-C_4$ Compounds [Электронный ресурс] / H. Wang, X. You, A.V. Joshi, S.G. Davis, A. Laskin, F. Egolfopoulos, C.K. Law. – URL: http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm, May 2007 (дата обращения: 17.10.2020)

208. Wang, S. Shock Tube and Laser Absorption Study of CH₂O Oxidation via Simultaneous Measurements of OH and CO [Text]/ S. Wang, D.F. Davidson, R.K. Hanson// The Journal of Physical Chemistry, 2017. – V. 121, I. 45. – P. 8543-8744.
209. Wang, T. Automatic generation of a kinetic skeletal mechanism for methane-hydrogen blends with nitrogen chemistry [Text] / T. Wang, X. Zhang, J. Zhang, X. Hou // International Journal of Hydrogen Energy, 2018. – V.43, I.6. – P.3330-3341.
210. Welsch, R. Rigorous Close-Coupling Quantum Dynamics Calculation of Thermal Rate Constants for the Water Formation Reaction of H₂ + OH on a High-Level PES [Text]/ R. Welsch// The Journal of Chemical Physics, 2018. – V. 148, I. 20. – №. 204304.
211. Wu, J. Advanced gas turbine combustion system development for high hydrogen fuels [Text] / J. Wu, P. Brown, I. Diakunchak, A. Gulati, M. Lenze, B. Koestlin // Proceedings of ASME Turbo Expo; ASME: Montreal, 2007. – P. 1085-1091.
212. Yanez, J. An analysis of flame instabilities for hydrogen-air mixtures based on Sivashinsky equation [Text]/ J. Yanez, M. Kuznetsov// Physics Letters A, 2016. – V. 380. – P. 2549-2560.
213. Yang, X. Statistical Analysis on Rate Parameters of the H₂–O₂ Reaction System [Text]/ X. Yang, X. Shen, P. Zhao, C.K. Law// The Journal of Physical Chemistry A., 2021. – V. 125, I. 47. – P. 10223-10234.
214. Yang, J. Laminar burning velocities and Markstein numbers for pure hydrogen and methane/hydrogen/air mixtures at elevated pressures [Text] / J. Yang, M. AL-Khafaji, A.S. Tomlin, H.M. Thompson, G. de Boer, K. Liu, M.E. Morsy // Fuel 2023. – V. 354, 129331.
215. Yeung, P. Straining and Scalar Dissipation on Material Surfaces in Turbulence [Text] / P. Yeung, S. Girimaji, S. Pope // Combustion and Flame, 1990. – № 365(79). – P.340–365.
216. Yu, G. Laminar flame speeds of hydrocarbon+air mixtures with hydrogen addition [Text] / G.Yu, C.K. Law, C.K. Wu // Combust Flame, 1986. – V.63, № 3. – P. 339-347.

217. Zhang, Y. A chemical kinetic investigation of laminar premixed burning characteristics for methane-hydrogen-air mixtures at elevated pressures [Text] / Y. Zhang, J.Fu, J.Shu, M. Xie, J. Liu. // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2020. – V.111. – P.141-154.
218. Zhang, Y. Assessing the predictions of a NO_x kinetic mechanism on recent hydrogen and syngas experimental data [Text] / Y. Zhang, O. Mathieu, E.L. Petersen, G. Bourque, H.J. Curran // Combustion and Flame, 2017. – V.182. – P.122-141.
219. Zhang, Y. Assessing the Predictions of a NO_x Kinetic Mechanism using Recent Hydrogen and Syngas Experimental Data [Text] / Y. Zhang, O. Mathieu, E.L. Petersen, G. Bourque, H.J. Curran // Combustion and Flame, 2017. – V. 182. – P. 122–141.
220. Zheng, Y. Large-eddy simulation of mixing and combustion in a premixed swirling combustor with synthesis gases [Text] / Y. Zheng, M. Zhu, D.M. Martinez, X. Jiang // Comput Fluids, 2013. –V. 88. –P. 702-714.
221. Zhou, C.W. An experimental and chemical kinetic modeling study of 1,3-butadiene combustion: Ignition delay time and laminar flame speed measurements [Text] / W. Zhou, Y. Li, U. Burke, C. Banyon, K.P. Somers, S. Khan, J.W. Hargis, T. Sikes, E.L. Petersen, M. AlAbbad, A. Farooq, Y. Pan, Y. Zhang, Z. Huang, J. Lopez, Z. Loparo, S.S. Vasu, H.J. Curran // Combustion and Flame, 2018. – V.197. – P.423–438.
222. Zubrilin, I. A. Measurements and Experimental Database Review for Laminar Flame Speed Premixed CH₄ [Text]/ I. A. Zubrilin, S.S. Matveev, S. G. Matveev, D.V. Idrisov// Air Flames/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – V. 302, I. 1.