

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

Научный руководитель: Матвеев Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», кафедра энергетических машин и систем управления, профессор;

Тесля Денис Николаевич, кандидат технических наук, военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», старший преподаватель кафедры авиационных двигателей.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (г. Казань).

Защита диссертации состоится 21 декабря 2023 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»: [https://ssau.ru/resources/dis\\_protection/idrisov](https://ssau.ru/resources/dis_protection/idrisov)

Автореферат разослан 20 октября 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.379.10

Виноградов А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 ( $\text{CO}_2$ ) 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. Использование альтернативных видов топлива, в частности, водорода и метано-водородных смесей, позволит существенно уменьшить выбросы  $\text{CO}_2$ , которые сейчас составляют в среднем 500 г  $\text{CO}_2$  на 1 кВт\*час. В обозримом будущем планируется снизить эмиссию  $\text{CO}_2$  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 ( $\text{NO}_x$ ), оксиды углерода (CO), несгоревшие углеводороды ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ) 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 ( $\text{H}_2$ ) 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 горелочном устройстве. 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, C. Marchetti, A.R. Martinez, T. Ohta, W. Seifritz, W.D. Van Vorst, T.N. Veziroğlu, 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, А.А. 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  $\text{NO}_x$ .

**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 «Силловые 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 редуцированных 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. Основной текст 185 страниц, 89 иллюстраций и 17 таблиц.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования. Отмечена научная новизна, практическая значимость, методы исследования и достоверность результатов выполненной работы, приведены результаты, выносимые на защиту автором. Представлена информация по апробации и публикации результатов.

**В первой главе** рассмотрены вопросы, связанные с общей проблемой снижения выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ за счет использования метано-водородных топлив в камерах сгорания авиационных ГТД и энергетических установок. Для проектирования камер сгорания значимым инструментом являются методики трехмерного численного моделирования, позволяющие предложить наиболее успешные конструктивные решения при минимальных затратах и рисках безопасности. При численном моделировании рабочего процесса камер сгорания особое внимание уделяется кинетическим механизмам окисления топлив и основным фундаментальным характеристикам горения.

Для моделирования процессов окисления метано-водородных топлив проведен обзор современных кинетических механизмов. Наиболее перспективными из них являются: Konnov2019, Stagni2016, Wang2018, NUIGMech1.0 и CRECK2020. В настоящее время многие стадии реакций и термохимические свойства промежуточных веществ в полной степени не изучены. Поэтому совершенствование кинетических

механизмов окисления метано-водородных топлив является актуальной задачей для проведения комплексных исследований в широком диапазоне граничных условий.

В работах С.К. Law, F. Halter, R.T.E. Hermanns, F.H.V. Coppens, S.S. Shy, E. Hu, А.А. Коннова, Т. Boushaki, E.J.K. Nilsson, J. Yang исследовано влияние добавок водорода в метано-воздушную смесь на нормальную скорость распространения пламени. Вместе с тем, опубликованные данные не в полной мере охватывают параметры рабочего процесса в КС авиационных ГТД и энергетических установок.

В работах R.K. Cheng, R.S. Barlow, S.M. Guo, B.A. Imteyaz представлены данные по экспериментальному исследованию горелочных устройств модельных камер сгорания на метано-водородном топливе. Показано, что при использовании топлива с высоким содержанием водорода увеличивается вероятность проскока пламени внутрь горелочного устройства.

Также в главе приведен обзор работ по моделированию горения метано-водородного топлива в реальных камерах сгорания и их элементах. Показано, что большинство прикладных работ сосредоточено на использовании подхода RANS, тогда как подход LES в основном используется для академических исследований, поскольку требует существенных вычислительных мощностей.

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 нормальной скорости распространения пламени при различных составах топлива. В результате анализа опубликованных работ были сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным установкам и системам измерения. В соответствии с поставленными задачами исследования модернизирован стенд научно-образовательного центра газодинамических исследований Самарского университета им. Королева для работы с метано-водородными топливами. Экспериментальные стенды и установки обеспечены всеми необходимыми системами для безопасной работы с водородосодержащими топливами, в том числе, системой сигнализации, и связанными с ней огнепреградительными и электромагнитными клапанами.

В главе описана созданная модельная КС для работы на метано-водородном топливе. Данная камера является прототипом используемых малоэмиссионных камер сгорания с предварительной подготовкой смеси в перспективных авиационных ГТД 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 1). Пилотная зона формируется за счет центрального тела, которое выступает в роли форсунки. В основной зоне предусмотрено два контура подачи топлива: выше по потоку от завихрителя и в следе за завихрителем.

В работе модернизирована установка по измерению нормальной скорости распространения пламени методом нулевого теплового потока для возможности проведения экспериментальных работ на чистом водороде и метано-водородных топливах. Погрешность определения скорости пламени не превышает  $\pm 1$  см/с.



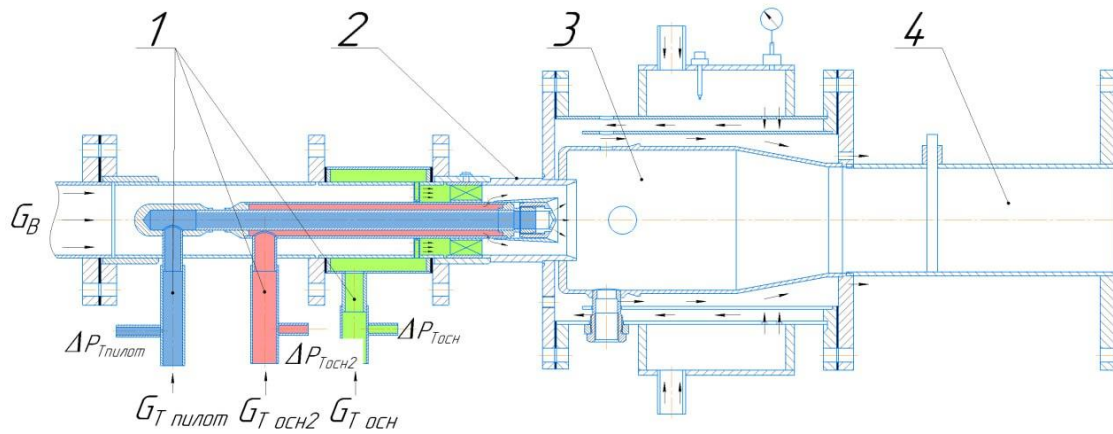


Рисунок 1 – Схема модельной камеры сгорания

В рамках выполнения работы спроектирована и изготовлена установка для исследования границ проскока пламени в вихревой горелке с предварительной подготовкой ТВС. Горелочное устройство состоит из осевого завихрителя и центрального насадка, выполненного по форме усеченного конуса, расположенных в цилиндрическом корпусе. Осевого завихрителя имеет угол установки лопаток  $55^\circ$ , который обеспечивает необходимую степень закрутки потока для стабилизации пламени. По оси сопла установлен конический насадок с возможностью осевого перемещения для изменения геометрических параметров выходного участка горелочного устройства (рисунок 2).

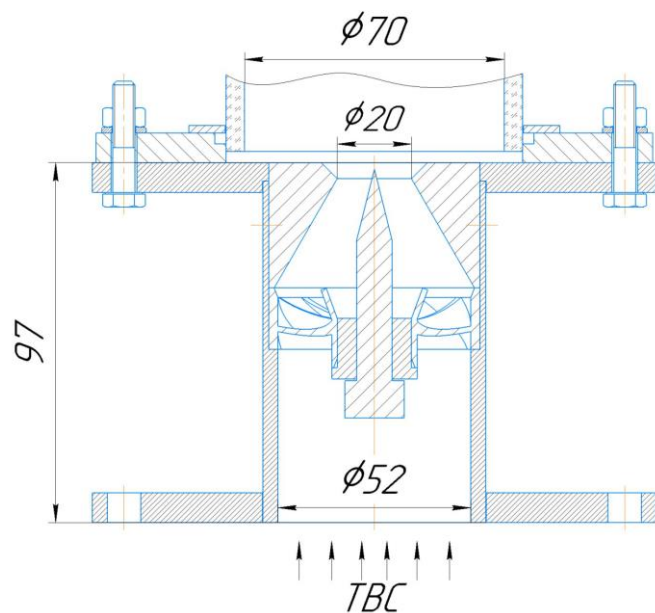


Рисунок 2 – Схема горелочного устройства

Таким образом, сформирована необходимая экспериментальная база, призванная обеспечить возможность проведения экспериментальных исследований процессов горения метано-водородных топлив в горелочных устройствах и модельных КС авиационных ГТД и энергетических установок. Стендовые системы обеспечивали измерение расходов воздуха и топлива с погрешностью, не превышающей  $0,7\%$ .

**Третья глава** посвящена разработке и валидации математической модели нормальной скорости распространения метано-водородного пламени в зависимости от давления, температуры и состава топливовоздушной смеси для различного объемного содержания водорода в топливе.

На первом этапе разработки модели нормальной скорости распространения пламени ( $S_L$ ) 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 по времени задержки воспламенения, нормальной скорости пламени и концентрациям  $\text{NO}_x$  над горелкой. За базовый кинетический механизм

окисления метано-водородного топлива была принята модель Wang2018, как наиболее соответствующая результатам экспериментов по совокупности ключевых характеристик процесса горения. Затем на основе анализа чувствительности были определены элементарные реакции наиболее сильно влияющие на нормальную скорость распространения пламени. Далее проведен более детальный анализ и совершенствование базового кинетического механизма с использованием достигнутых к настоящему времени результатов по уточнению констант элементарных химических реакций, входящих в кинетические схемы окисления метано-водородных топлив. В таблице 1 представлены 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 1 – Новые реакции и обновленные константы скорости в базовом кинетическом механизме Wang2018

№	Реакция	A	B	$E_a$ (ккал/моль)	Источник данных
1	$H_2+OH=H+H_2O$	8,03E+07	1,642	3,2793	Yang 2021
2	$O_2+H=O+OH$	1,10E+15	-0,286	1,60E+01	Yang 2021
3	$H+HO_2=2OH$	1,36E+13	0,212	-9,20E-03	Yang 2021
4	$O+H_2=OH+H$	5,08E+04	2,67	6,292	Sutherland 2005
5	$OH+HO_2=O_2+H_2O$	7,00E+12	0,0	-1,09296	Hong 2013
		4,50E+14	0,0	10,9296	Hong 2013
6	$H_2+O_2=H+HO_2$	7,40E+05	2,43	53,5	Michael 2000
7	$O+HO_2=O_2+OH$	4,51E+11	0,659	-0,4619	Yang 2021
8	$H+O_2+H=H_2+O_2$	8,80E+22	-1,835	0,8	Konnov 2019
9	$H+O_2+H=OH+OH$	4,00E+22	-1,835	0,8	Konnov 2019
10	$H+O_2+O=OH+O_2$	7,35E+22	-1,835	0,8	Konnov 2019
11	$H+O_2+OH=H_2O+O_2$	2,56E+22	-1,835	0,8	Konnov 2019

Сформированный в результате проведенной модернизации новый кинетический механизм окисления метано-водородных топлив обозначен как WangUPD и отличается от базового механизма Wang2018 дополнительным включением четырех элементарных реакций (№ 8-10, таблица 1) и уточнением констант скоростей, наиболее влияющих на нормальную скорость распространения пламени (№ 1-7, таблица 1).

Валидация сформированного кинетического механизма произведена на основе опытных данных по нормальной скорости распространения пламени ( $S_L$ ) в зависимости от коэффициента избытка топлива ( $\phi$ ) для метано-водородных топлив с различной долей водорода  $R_H = 100 \cdot X_{H_2} / (X_{H_2} + X_{CH_4})$ , где  $X_{H_2}$ ,  $X_{CH_4}$  – объемная концентрация  $H_2$  и  $CH_4$ . Представленные на рисунке 3 результаты показывают на хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных (погрешность не превышает 5%), полученных как в настоящей работе, так и в работах других авторов, для различных значений температуры ( $T_k$ ) и давления ( $P_k$ ) на входе в горелочное устройство. Поэтому, для дальнейших расчетных исследований применялся новый разработанный кинетический механизм окисления метано-водородных топлив WangUPD.

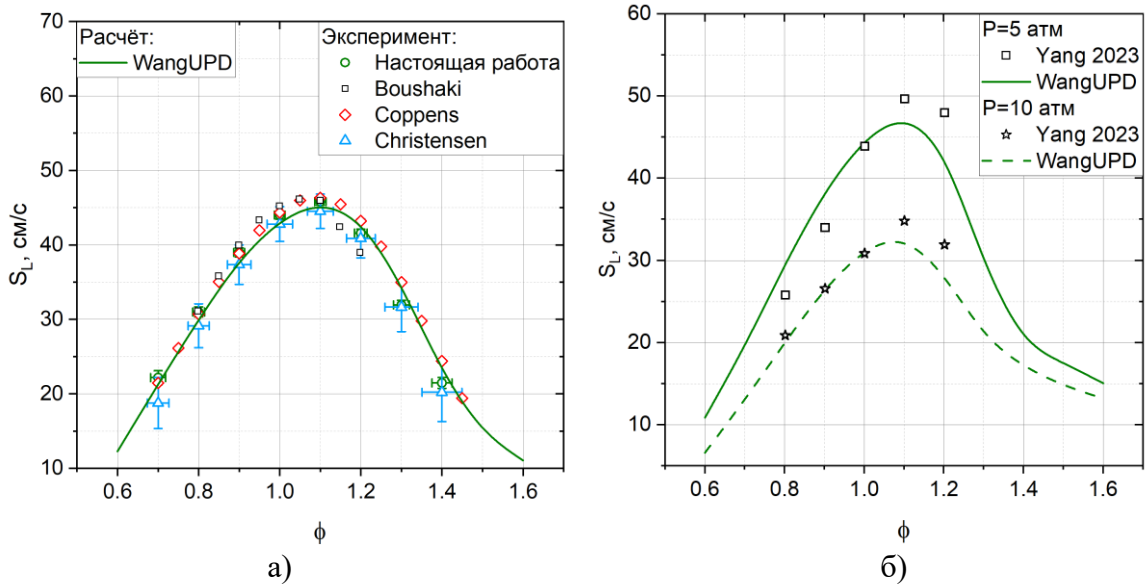


Рисунок 3 – Валидация разработанного кинетического механизма по нормальной скорости распространения пламени:

а)  $R_H = 25\%$   $T_k = 300$  К,  $P_k = 1$  атм; б)  $R_H = 50\%$   $T_k = 360$  К,  $P_k = 5, 10$  атм

При численном моделировании рабочего процесса КС авиационных ГТД и энергетических установок в большинстве программных продуктов (ANSYS Fluent, ANSYS CFX и других) нормальная скорость пламени задается константой для всего диапазона давления и температуры. Поэтому для достоверного моделирования нестационарных явлений рабочего процесса камер сгорания, таких как проскок пламени, необходимо разработать уточненные зависимости, описывающие изменение нормальной скорости распространения пламени от давления, температуры, состава смеси и вида используемого топлива. Их можно представить для каждого топлива в виде:

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

где  $S_{L_0}$ ,  $T_0$ ,  $P_0$  – скорость пламени, температура и давление при нормальных условиях;  $\alpha$ ,  $\beta$  – степенные коэффициенты.

Для формирования этих зависимостей в диапазоне параметров рабочего процесса КС авиационных ГТД и энергетических установок расчеты проводились в программном комплексе ANSYS Chemkin с использованием разработанного нового кинетического механизма WangUPD. Обработка полученных расчетных данных была представлена в виде:  $S_{L_0} = f(\phi)$ ,  $\alpha = f(\phi)$ ,  $\beta = f(\phi)$ . Пример новых зависимостей представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Функции для  $S_{L_0}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  при  $R_H=30\%$ ,  $80\%$

$R_H=30\%$	$R_H=80\%$
$S_{L_0} = 66,44\phi^3 - 289,1\phi^2 + 373\phi - 115,4$	$S_{L_0} = 70,69\phi^3 - 379,3\phi^2 + 580,9\phi - 175,6$
$\alpha = -0,9016\phi + 0,6209\phi^2 + 2,398$	$\alpha = -0,5987\phi + 0,3147\phi^2 + 2,395$
$\beta = 2,357\phi - 1,109\phi^2 - 1,86$	$\beta = 2,028\phi - 0,8329\phi^2 - 1,496$

Для других значений  $R_H$  в диапазоне от 0 до  $100\%$  также получены новые зависимости, позволяющие моделировать нормальную скорость распространения метано-водородного пламени, применительно к параметрам рабочего процесса камер сгорания авиационных ГТД и энергетических установок, отличающиеся учетом более широкого диапазона температуры, давления, состава смеси и вида используемого топлива.

Проведенная валидация показывает (рисунок 4), что полученные зависимости  $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$  хорошо согласуются с результатами расчета по модели WangUPD, а также экспериментальными данными из работ различных авторов (расхождение менее 5%).

Проведенные исследования позволили сформировать рекомендации по формированию математической модели для расчета процессов горения метано-водородных топлив, в рамках которых распространение фронта пламени определяется по разработанным новым зависимостям  $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$ , что позволит более точно определить такие нестационарные процессы, как проскок пламени в горелочном устройстве КС.

**Четвертая глава** посвящена разработке и валидации метода определения границ проскока пламени в горелочном устройстве камер сгорания, работающих на метано-водородных топливах. Граница проскока пламени ( $\alpha_{\text{проскока}}$ ) характеризуется величиной коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ), при которой фиксируется проскок пламени в горелочном устройстве при заданных параметрах рабочего процесса КС.

В главе описаны экспериментальные исследования по определению проскока пламени в горелочном устройстве с предварительной подготовкой ТВС и закруткой потока (рисунок 2) при атмосферном давлении и температуре смеси на входе в горелку  $T_k = 373$  К. Получены новые опытные данные по границам проскока пламени во всем диапазоне  $R_H = 0 - 100\%$  и скоростей потока на выходе из горелочного устройства, характерных для КС авиационных ГТД и энергетических установок. В результате проведенного анализа можно заключить, что для типовых горелочных устройств КС с предварительной подготовкой ТВС и закруткой потока при использовании метано-водородных топлив, границы проскока пламени в значительной степени определяются долей водорода в топливе, а также режимными параметрами, такими как: среднерасходная скорость на срезе сопла горелки и характеристиками закрученного потока на выходе из горелки.

В главе описана доработанная математическая модель расчета процессов горения метано-водородных топлив в трехмерной постановке с использованием программного продукта ANSYS Fluent. Данная модель включает в себя новый кинетический механизм окисления метано-водородного топлива WangUPD и новые зависимости нормальной скорости пламени от состава смеси, начальных значений температуры и давления для различного содержания водорода в топливе.

В главе также приведены результаты расчетно-экспериментального исследования по определению границ проскока пламени в горелочном устройстве КС (рисунок 5). Показано, что при проведении расчетов в RANS постановке с использованием базовых алгоритмов, заложенных в стандартных коммерческих программных продуктах (Ansys Fluent и др.), полученные значения  $\alpha_{\text{проскока}}$  отличаются от экспериментальных данных на 40% во всем диапазоне добавок водорода. Эти результаты не могут являться приемлемыми даже для предварительных инженерных расчетов. Модернизация

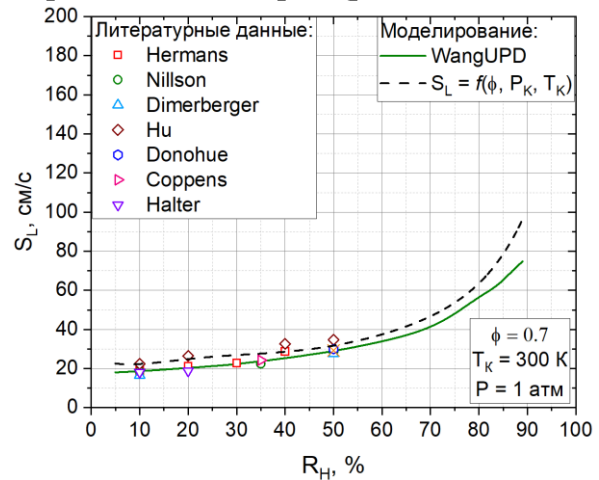


Рисунок 4 – Зависимость нормальной скорости распространения пламени от объемной доли водорода

математической модели с учетом использования разработанных зависимостей для скорости пламени  $S_L = f(\phi, P_k, T_k)$  позволяет в два раза сократить отклонение от эксперимента (до 20%).

Проскок пламени является нестационарным явлением и чувствителен к крупномасштабным пульсациям турбулентного потока, которые не описываются в стационарных подходах (RANS). Поэтому, для адекватного описания нестационарных явлений должен использоваться метод моделирования крупных вихрей (LES), что и подтверждено результатами на рисунке 5. Погрешность данного метода при использовании нового кинетического механизма WangUPD и разработанных

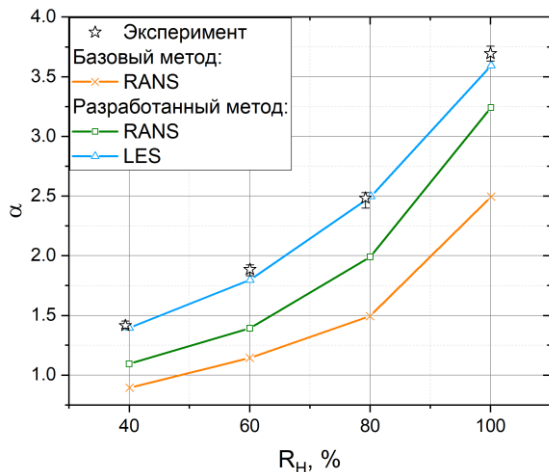


Рисунок 5 – Границы проскока пламени в зависимости от величины добавки водорода в метано-водородное топливо при  $T_k=373\text{K}$  и атмосферном давлении

зависимостей для скорости пламени дает отклонение не более 5%.

Однако в инженерной практике подход LES применять нецелесообразно, так как при проектировании новых изделий необходимо выполнять множество расчетных исследований вариантов конструкций камер сгорания. Поэтому в данной работе предлагается использовать разработанную математическую модель в стационарной постановке на этапе предварительного проектирования с учетом коэффициента запаса  $K_{запаса}=1,25$ , который обеспечивает область стабильной работы.

В результате проведенной работы был сформирован метод определения границ проскока пламени при использовании метано-водородного топлива в КС ГТД и энергетических установок (рисунок 6).

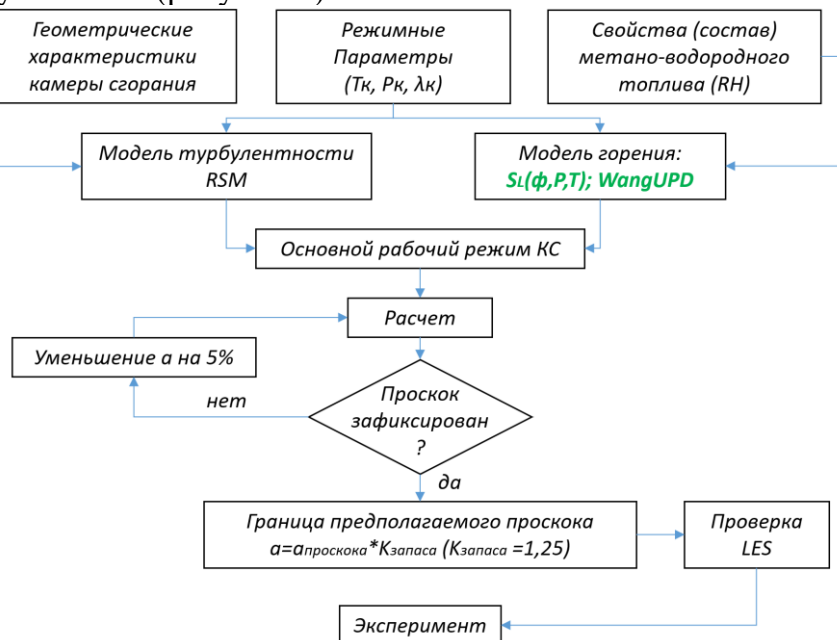


Рисунок 6 – Метод определения границ проскока пламени

Таким образом, предложенная математическая модель и метод расчета могут быть применены для прогнозирования явления проскока пламени при использовании



метано-водородных топлив в КС ГТД и ГТУ, во фронтальной плите которых установлены горелочные устройства с предварительной подготовкой ТВС.

**Пятая глава** посвящена апробации разработанного метода определения проскока пламени на модельной и полноразмерной камерах сгорания при использовании горелочного устройства с предварительной подготовкой ТВС и закруткой протока.

В главе были проведены расчетно-экспериментальные исследования по определению границ проскока пламени в модельной камере сгорания с металлической жаровой трубой, которая является прототипом используемых малоэмиссионных КС с предварительной подготовкой смеси в перспективных ГТД и ГТУ. Расчеты и эксперименты проводились при различных значениях  $R_H$ . По результатам RANS моделирования, была определена граница предварительного проскока пламени, а также граница предполагаемого проскока пламени с учетом коэффициента запаса (рисунок 7), согласно методу расчета проскока пламени, изложенному в четвертой главе (рисунок 6). Таким образом, 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 внутри горелочного устройства при добавках водорода до  $R_H = 60\%$  включительно. В целях безопасной эксплуатации установки модельная КС не вводилась в режим работы с проскоком пламени.

Применительно к полноразмерной КС 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 топливо более 70%, на рабочих режимах, вероятен проскок пламени через центральное горелочное устройство. Соответственно, граница устойчивой работы с учетом коэффициента запаса по  $R_H$  составляет от 0 до 50%, что соответствует снижению выбросов  $CO_2$  с 450 до 340 г/кВт\*час (рисунок 8).

Таким образом, разработанный метод определения границ проскока пламени апробирован на модельной камере сгорания авиационного двигателя и камере сгорания ГТЭ-65. Результаты, полученные с использованием разработанной расчетной модели, соответствуют результатам экспериментальных исследований. Данный метод может

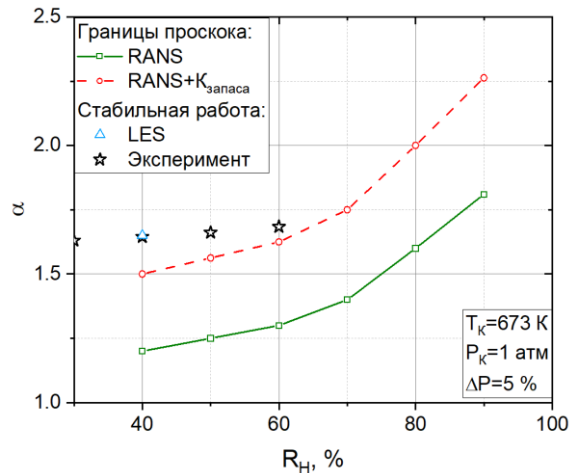


Рисунок 7 – Границы проскока пламени в модельной камере сгорания

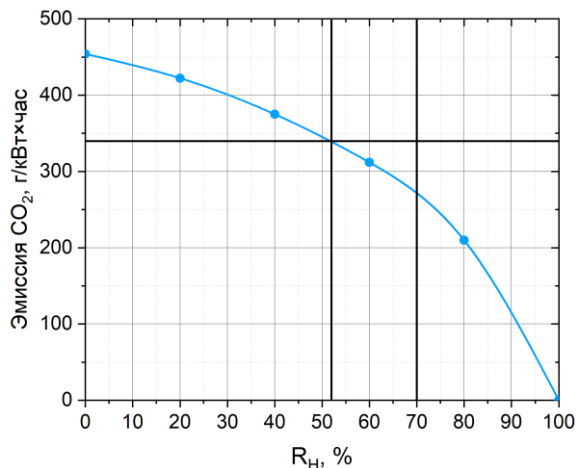


Рисунок 8 – Эмиссия  $CO_2$  на 1 кВт\*ч от доли водорода

быть использован для определения проскока пламени на этапе предварительного проектирования камер сгорания ГТД и ГТУ.

### 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 четырёх 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 фронтных 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»).

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

#### Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Гураков Н.И. Расчетно-экспериментальное исследование горения метановодородных смесей в модельной камере сгорания газотурбинной установки / Н.И. Гураков, О.В. Коломзаров, **Д.В. Идрисов**, и др. // Физика горения и взрыва — 2023. — №2. — С. 16-23.
2. **Идрисов Д.В.** Границы устойчивости пламени метан-водородных смесей / **Д.В. Идрисов**, Н.И. Гураков, О.В. Коломзаров, и др. // Краткие сообщения по физике – 2023. — №4. — С. 44-54.
3. Семенихин А.С. Кинетические модели горения метановодородных смесей: краткий обзор и их валидация / А.С. Семенихин, С.С. Матвеев, **Д.В. Идрисов**, и др. // Теплоэнергетика. — 2022. — № 10. — С. 79-89.

#### Статьи в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science

4. Zubrilin I.A. Measurements and experimental database review for laminar flame speed premixed CH<sub>4</sub>/air flames / I.A. Zubrilin, S.S. Matveev, S.G. Matveev, **D.V. Idrisov** // IOP Conference series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V.302. - №.1. – P. 1-7.
5. Matveev S.S. Simulation of CO and CO<sub>2</sub> emissions in model combustion chamber based on the combination LES and Reactor Network Model / S.S. Matveev, N.I. Gurakov, **D.V. Idrisov**, et al. // E3S Web of Conferences. – 2019. – V.80. - №.1. – P. 1-5.

#### Прочие публикации

6. **Idrisov D.V.** Experimental and numerical study of lean flame blow-out during methane-hydrogen mixture combustion with a different hydrogen addition / **D.V. Idrisov**, N.I. Gurakov, S.G. Matveev, et al. // Proceeding of the International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments. – Samara, 2022. – P.75.
7. Kolomzarov O.V. Experience in carrying out experimental studies for a dual-circuit burner using methane-hydrogen mixtures / O.V. Kolomzarov, V.Yu. Abrashkin, **D.V. Idrisov**, et al. // Proceeding of the International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments. – Samara, 2022. – P.81.
8. 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**, et al. // Proceeding of the International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments. – Samara, 2022. – P.89.
9. 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, и др. // Неравновесные процессы: плазма, горение, атмосфера. – Москва, 2022. – С.79-81.
10. **Идрисов Д.В.** Расчетно-экспериментальное исследование границы устойчивой работы при горении метановодородной смеси / **Д.В. Идрисов**, С.С. Матвеев, А.А. Литарова, и др. // Неравновесные процессы: плазма, горение, атмосфера. – Москва, 2022. – С.82-84.