

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной и
инновационной деятельности
ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский
технический университет имени
А.Н. Туполева - КАИ»

Бабушкин Виталий Михайлович

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Идрисова Дмитрия Владимировича на тему
«Разработка метода определения границ проскока пламени при использовании
метано-водородного топлива в камерах сгорания газотурбинных двигателей
и энергетических установок»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

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 (CO₂) 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 CO₂, которые сейчас составляют в среднем 500 г CO₂ на 1 кВт*час. В обозримом будущем планируется снизить эмиссию CO₂ 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 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 **актуальной** задачей.

Оценка структуры и содержания работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 222 наименований. Основной текст 185 страниц, 89 иллюстраций и 17 таблиц.

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, а также пути их достижения. Отмечена научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов выполненной работы, приведены результаты, выносимые на защиту автором. Представлена информация по апробации и публикации результатов.

В первой главе автор рассмотрел 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. Показал, что существует ряд проблем, связанных с высоким содержанием водорода в топливе, которые необходимо учитывать при проектировании, наиболее значимой из них является риск проскока пламени внутрь горелочного устройства. Основными факторами, влияющими на проскок пламени являются химическая кинетика, физико-химические свойства, а также газодинамические свойства, проходящие в реальных устройствах.

Для моделирования процессов окисления метано-водородных топлив автор провел обзор современных кинетических механизмов и выбрал наиболее перспективные из них.

Было рассмотрено множество фундаментальных исследований нормальной скорости распространения пламени. Тем не менее основные опубликованные данные не в полной мере охватывают параметры рабочего процесса в КС авиационных ГТД и ГТУ.

Рассмотрены работы по численному моделированию проскока пламени в горелочных устройствах камер сгорания, работающих на метано-водородном топливе. Установлено, что использование доступных подходов к моделированию проскока пламени при горении метано-водородного топлива в

реальных камерах сгорания и их элементах сосредоточено на использовании подхода RANS, поскольку подход LES требует существенных вычислительных мощностей

Ключевой мыслью первой главы является то, 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.

Во второй главе описаны экспериментальные установки и системы 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.

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 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. В рамках выполнения работы спроектирована и изготовлена установка для исследования границ проскока пламени в вихревой горелке с предварительной подготовкой ТВС.

Показано, что 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%.

В третьей главе представлена разработка и валидация математической модели нормальной скорости распространения метано-водородного пламени в зависимости от давления, температуры и состава топливовоздушной смеси для различного объемного содержания водорода в топливе. 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. Так же приведена валидация сформированного кинетического механизма на основе опытных данных по нормальной скорости распространения пламени в зависимости от коэффициента избытка топлива для метано-водородных топлив с различной долей водорода.

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. Данный метод подразумевает использование уточнённой химической кинетикой окисления метано-водородного топлива, а также новыми зависимостями для нормальной скорости распространения пламени, зависящими от температуры, давления и состава смеси, во всём диапазоне добавок водорода в топливо.

В результате проведенного исследования показано, что при проведении расчетов в RANS постановке с использованием базовых алгоритмов, заложенных в стандартных коммерческих программных продуктах полученные значения границы проскока пламени, отличаются от экспериментальных данных на 40% во всем диапазоне добавок водорода. Модернизация математической модели с учетом использования разработанных зависимостей для скорости пламени позволяет в два раза сократить отклонение от эксперимента (до 20%).

Использование метода моделирования крупных вихрей при использовании нового кинетического механизма WangUPD и разработанных 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 $K_{\text{запаса}}=1,25$, который обеспечивает область стабильной работы.

Предложенный метод может быть применен 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.

В пятой главе представлена апробация предложенного 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. 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 60% включительно.

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.

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

В заключении работы перечислены новые научные результаты исследования, а также определена перспектива дальнейшего развития темы исследования.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и включает все основные идеи, положения и выводы, приведенные в основном тексте.

Научная новизна полученных результатов.

Автором работы сформирован новый метод определения границ проскока пламени в камерах сгорания ГТД и ГТУ с использованием метано-водородного топлива, отличающийся использованием уточнённой химической кинетикой окисления метано-водородного топлива, а также новыми зависимостями для нормальной скорости распространения пламени, зависящими от температуры, давления и состава смеси, во всём диапазоне добавок водорода в топливо.

Лично автором получены новые экспериментальные данные по границам проскока пламени при сжигании предварительно подготовленных метано-водородо-воздушных смесей в горелочных устройствах с закруткой потока.

Лично автором впервые предложен 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.

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.

Обоснованность и достоверность основных положений и выводов работы подтверждается: применением сертифицированного коммерческого программного комплекса ANSYS Chemkin; применением сертифицированного коммерческого программного комплекса ANSYS Fluent, верифицированного на задачах расчёта газодинамических реагирующих течений по результатам сравнения с экспериментальными данными, полученными в научно-образовательном центре газодинамических исследований Самарского университета; использованием в экспериментальном исследовании поверенных средств измерения и аттестованного измерительного оборудования; высоким уровнем согласования результатов численного моделирования с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований горелочных устройств, модельных камер сгорания и натурного авиационного ГТД. При написании диссертации соискатель дал все необходимые ссылки на авторов и источники литературы, откуда он заимствовал материалы или отдельные результаты.

Теоретическая значимость 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 работы заключается 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).

Апробация работы и публикации.

Результаты работы поэтапно были апробированы на 8 научно-технических конференциях всероссийского и международного уровней и известны научной общественности.

По результатам работы опубликованы 10 работ, в том числе 3 статьи в периодическом издании, включённом в список ВАК, 2 статьи в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 5 публикаций в материалах конференций.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Разработанный автором метод определения границ проскока пламени при использовании метано-водородного топлива позволяет улучшить прогностическую способность при моделировании процессов горения в камерах сгорания авиационных двигателей и энергетических установок, что существенно повышает эффективность проектирования или доводки камер сгорания газотурбинных двигателей и энергетических установок.

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в АО «Силовые машины», ПАО «Кузнецов», АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «ОДК-Сатурн», АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» и других организациях, занимающихся проектированием и доводкой камер сгорания ГТД и энергетических установок с использованием водорода и метано-водородного топлива.

Созданный при проведении исследований экспериментальный стенд рекомендуются к использованию для исследований камер сгорания других конструктивных схем, а также в учебном процессе авиационных технических ВУЗов.

К достоинству диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Для решения научной задачи, поставленной в диссертации, автор провел значительный объем численных и экспериментальных исследований на высоком квалификационном уровне.

2. Диссертация имеет внутреннее единство, написана технически грамотным языком с правильным употреблением понятийного аппарата в данной предметной области.

3. Достаточно глубоко проведен анализ степени разработанности темы исследования, о чем свидетельствует список используемой литературы, в котором содержится 222 источников из них более 150 зарубежных авторов.

Наряду с перечисленными выше достоинствами работа не лишена **недостатков**. В частности

1 Не показано как учитывалась доля водорода в расчетах нормальной скорости горения

2. Не показано влияние конструктивных параметров завихрителя, в частности угла крутки на проскок пламени, т.к. от него зависит размер и величина обратных токов.

3. Непонятно как учитывалась влияние температуры самовоспламенения для различных составов смеси на проскок пламени.

4. В работе не приведена полная валидация разработанного кинетического механизма.

Заключение по диссертации.

Указанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы. Диссертация Идрисова Д.В. на соискание ученой степени кандидата технических наук представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная для двигателестроения научная задача по разработке метода, позволяющего определять границы проскока пламени при использовании метано-водородного топлива на этапе предварительного проектирования камер сгорания авиационных двигателей и энергетических установок, имеющей существенное значение для авиадвигательной и газотранспортной отраслей. Полученные теоретические и практические результаты достоверны и достаточны для обоснования сделанных выводов. Название и содержание работы соответствуют специальности

2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» и отвечает формуле специальности в областях науки «об энергетических основах, схемах, параметрах, рабочем процессе двигателей и энергетических установок летательных аппаратов различного назначения, методах их расчета и проектирования». В области исследований по паспорту специальности диссертация Идрисова Д.В. отвечает требованиям п.1,18.

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично в процессе научной деятельности. Рассматриваемая диссертация выполнена на высоком уровне, носит законченный характер и соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Идрисов Дмитрий

Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Отзыв ведущей организации обсужден на заседании кафедры реактивных двигателей и энергетических установок ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» г. Казань (протокол № 4 от 09.11.2023 г.) и представлен на 12 (двенадцати) страницах печатного текста.

Отзыв составили:

профессор кафедры реактивных двигателей
и энергетических установок

Казанского национального

исследовательского технического университет

им. А.Н. Туполева–КАИ, доктор технических наук,

Профессор



Мингазов Б.Г.

Отзыв составили:

профессор кафедры реактивных двигателей
и энергетических установок

Казанского национального

исследовательского технического университет

им. А.Н. Туполева–КАИ, доктор технических наук,

доцент



Варсегов В.И.

Отзыв составили:

зав. кафедрой

реактивных двигателей

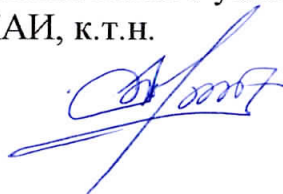
и энергетических установок

Казанского национального

исследовательского технического университет

им. А.Н. Туполева–КАИ, к.т.н.


доцент



Лопатин А.А.

420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ»

Рабочий телефон: +7 (843) 231-97-34, e-mail: kai@kai.ru

Подпись 
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля

12

16.11.2023

