

01.12.2023 № 01/3638

Кому: Учёному секретарю диссертационного совета Д 24.2.379.10
созданного на базе федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего
образования «Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»
доктору технических наук, доценту, Виноградову
Александрю Сергеевичу

Куда: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

УТВЕРЖДАЮ

Ректор
доктор физико-математических наук, профессор

В.И. Кошкин

01 декабря 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» на диссертационную работу Эрнандэс Моралес Марио «Разработка метода моделирования процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного жидкого топлива в камерах сгорания авиационных газотурбинных двигателей», представленную на соискание

учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Диссертационная работа изложена на 173 листах основного машинописного текста, содержит 53 рисунка, 26 таблиц и список использованных опубликованных работ из 234 наименований. Материалы диссертации изложены в 14 печатных работах, в том числе 1 статья в издании, рекомендуемом ВАК и 6 статьях в рецензируемых периодических изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus. Основные результаты исследований доложены на 5 научных конференциях и форумах.

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Актуальность темы диссертации

Процессы горения топлив составляют основу организации рабочего процесса камер сгорания авиационных двигателей. Проблема их изучения и интенсификации является одной из важных приоритетных направлений развития науки и техники. Ужесточение требований по ограничению выбросов загрязняющих веществ при сжигании углеводородных топлив привели

Входящий № 206-9317
Дата 01 ДЕК 2023
Самарский университет

к необходимости использования новых малоэмиссионных технологий сжигания (МТС) топлив в камерах сгорания.

Переход на МТС топлив позволил снизить, по сравнению с диффузионной технологией, уровни выбросов оксидов азота в новых типах камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) почти на порядок. Исследования ведущих университетов и компаний показали, что переход на новую малоэмиссионную технологию сжигания топлива потребовал пересмотра почти всех основных составляющих элементов рабочего процесса: схемы смешения топлива с воздухом, системы регулирования режимов работы камеры и ГТД в целом, системы охлаждения стенок жаровой трубы и др. При этом в малоэмиссионных камерах сгорания (МЭКС) с горением заранее перемешанной бедной топливовоздушной смеси часто возникают режимы виброгорения, разрушающие элементы камер сгорания, а также возможны проскоки пламени в смесители горелок, приводящие к перегреву и выгоранию их корпусных элементов.

В МЭКС ГТД гражданского назначения, работающих на бедных предварительно перемешанных смесях, важным параметром является качество предварительной подготовки топливовоздушной смеси, которое во многом определяется временем испарения капель топлива. Время испарения нелинейно возрастает с увеличением диаметра капель и оказывает существенное влияние на полноту сгорания топлива в камере сгорания, выбросы монооксида углерода и несгоревших углеводородов.

Общими особенностями различных марок авиационного керосина является сложный многокомпонентный состав, включающий большое количество углеводородных соединений. В инженерных расчетах применяются различные топливные суррогаты, состоящие из ограниченного количества химических компонентов. Формирование суррогатов керосина со свойствами, близкими к реальному топливу, является важной задачей исследований.

Таким образом, диссертационная работа Эрнандэс Моралес Марио, посвященная разработке метода моделирования процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного жидкого топлива в камерах сгорания авиационных газотурбинных двигателей, выполнена, безусловно, на актуальную тему.

Научная новизна и новые результаты

В диссертационной работе автором предложена новая методика формирования суррогатов углеводородных топлив, отличающаяся от существующих, учётом теплофизических свойств, влияющих на процессы нагрева и испарения, а также учётом кривой дистилляции. Обоснован и предложен новый суррогат керосина, характеристики испарения которого соответствуют характеристикам испарения авиационного керосина с заданной точностью. Разработанный суррогат используется для моделирования рабочего процесса в КС авиационного ГТД. Получены новые экспериментальные зависимости характеристик испарения многокомпонентных жидких топлив (керосина и его суррогатов), показывающие изменение диаметра и температуры в приповерхностном слое капли от времени.

Достоверность полученных результатов

Достоверность основных положений и результатов работы обусловлена корректным использованием законов химической кинетики, газодинамики и теплообмена, применением для проведения экспериментальных исследований поверенного измерительного оборудования и согласованием результатов с данными других авторов, опубликованными в литературе.

Практическая ценность работы

Практическая значимость работы заключается в совершенствовании алгоритма численного моделирования рабочего процесса КС ГТД за счёт использования в качестве модели керосина разработанного суррогата керосина, уточнения времени испарения

многокомпонентных капель и насыщенности пара вокруг них, что позволяет повысить точность определения эмиссионных и эксплуатационных характеристик КС на этапе проектирования и доводки авиационных ГТД.

Апробация работы и публикации

Материалы диссертации были представлены на российских и международных научных конференциях в том числе на Всероссийской научно-технической конференции (НКТ) «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» (Самара, 2019 г.); Международной НТК «International Conference on Aviation Motors» (ICAM 2020) (Москва, 2021 г.); Международной НТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2021 г.), Международном форуме двигателестроения (МФД-2022) (Москва, 2022 г.), Международной научно-практической конференции имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2023 г.).

По теме диссертации опубликованы 14 работ, в том числе 1 статья в издании, индексируемом в ВАК; 6 статей в рецензируемых периодических изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus; 6 публикаций в материалах конференций и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Содержание работы. Соответствие автореферата диссертационной работе.

Автореферат и опубликованные статьи в полной мере отражают содержание диссертации.

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. Представлена информация по апробации и публикации результатов.

В первой главе выполнен анализ влияния распыла, нагрева и испарения капель жидкого топлива на процессы смесеобразования в КС авиационных ГТД. Приведен анализ моделей расчета характеристик испарения капель жидкого топлива. Представлен обзор классических и современных моделей нагрева и испарения капель жидкого топлива.

Выполненный автором анализ литературы показал, что на процессы нагрева и испарения капель существенное влияние оказывают такие факторы, как температура и давление окружающего газа, относительная скорость капли, состав капли, насыщенность пара вокруг капли, теплообмен излучением. Отмечено, что часто такими факторами пренебрегают при численном моделировании рабочего процесса в КС авиационных ГТД.

Приведен анализ современных моделей нагрева и испарения капель таких как модель дискретных компонентов, модель квази-дискретных компонентов и многомерная модель квази-дискретных компонентов. Показано, что компонентный состав авиационного керосина сложен и зависит от марки, сырья и производителя. По этой причине в вычислениях используют модельные топлива – суррогаты, состоящие из нескольких хорошо изученных веществ. При этом при валидации суррогата не учитываются процессы распыла, нагрева и испарения капель.

Во второй главе показаны экспериментальные установки и применяемые системы измерения. Приведено описание стенда для нагрева капель в муфельной печи с целью определения времени испарения капель, а также температуры в центре и на поверхности капель. Представлены диапазоны и погрешности измерений. Полученные данные использованы автором для валидации разработанного метода расчета процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного состава.

Третья глава посвящена совершенствованию метода моделирования нагрева и испарения капель жидкого топлива. Предложено реализовать его в два этапа. Первый этап заключается в формировании многокомпонентного суррогата керосина, свойства которого

соответствуют следующим свойствам керосина: теплоёмкости, теплопроводности и давлению насыщенных паров, а также кривой дистилляции. Второй этап заключается в определении характеристик испарения с помощью модели нагрева и испарения, которая учитывает многокомпонентный состав капли, распределение температуры и концентрации компонентов внутри капли, насыщенность пара вокруг капли и относительную скорость капли. Автором разработана новая методика формирования суррогатов жидкого топлива многокомпонентного состава, а также предложен суррогат авиационного керосина ТС-1. Разработанная методика формирования многокомпонентных суррогатов углеводородных топлив отличается от существующих учётом свойств, влияющих на характеристики распыла, нагрева и испарения, таких как плотность, вязкость, поверхностное натяжение, теплоёмкость, теплопроводность, давление насыщенных паров, а также учётом кривой дистилляции. Автором с использованием разработанной методики сформировано три варианта суррогатов авиационного керосина марки ТС-1 (SU4, SU10 и SU11). В результате расчётно-экспериментального исследования показано, что четырёхкомпонентный суррогат SU4 по своим физико-химическим свойствам наиболее хорошо согласуется со свойствами керосина ТС-1. Таким образом, SU4 был выбран для дальнейшего исследования характеристик нагрева и испарения капель, а также рабочего процесса КС ГТД.

В четвертой главе приведены результаты разработки и валидации новой модели нагрева и испарения капель многокомпонентного состава. Модель нагрева и испарения капель основана на аналитическом решении уравнений теплопроводности и диффузии компонентов в одномерной постановке с допущением, что радиус капли принимается постоянным. Модель учитывает градиент температуры и концентрации компонентов внутри капли и применима для изолированных неподвижных капель. Отмеченная модель доработана автором для учёта еще двух факторов: движение капли в пространстве и влияние насыщенности пара вокруг капли на процесс тепломассообмена. Относительное движение капель учитывается с помощью модели эффективной теплопроводности и модели эффективной диффузии. Насыщенность пара вокруг капли учитывается с помощью модели Стефана-Фукса. Для учета движения капель в модели Стефана-Фукса, автор использовал модель Абрамзона-Сириньяно для каждого химического компонента, в которой вводятся два условных слоя на поверхности капли, а испарение определяется интенсивностью конвективного тепломассообмена между поверхностью капли и внешним потоком. Эти условия учтены при определении числа Нуссельта и числа Шервуда.

С использованием разработанной модели расчёта процессов нагрева и испарения капель определялись зависимости диаметра капли, температуры на поверхности и в центре капли от времени. Анализ результатов по трём параметрам испарения позволил выбрать суррогат SU4 как наиболее приемлемый для численного моделирования рабочего процесса в КС авиационного малоразмерного ГТД.

В пятой главе приведены результаты моделирования основных характеристик КС авиационного малоразмерного ГТД с использованием усовершенствованного метода моделирования процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного состава. Моделирование рабочего процесса проводилось для кольцевой камеры сгорания с равномерно расположенными в фронтовой плите восемью вихревыми горелочными устройствами с центробежными форсунками. Автором представлены результаты моделирования горения для четырёх режимов работы КС при изменении коэффициента избытка воздуха α от 3,0 до 6,0. В расчётах использовалась «модель горения частично предварительно перемешанной смеси» вместе с моделью дисперсной фазы, которая отвечает за характеристики распыла, нагрева и испарения капель. В модель DPM автором добавлена новая разработанная модель нагрева и испарения капель в виде пользовательской функции. Применение разработанного метода расчёта процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного состава, а также сформированного для авиационного керосина марки ТС-1 суррогата SU4 позволило автору повысить точность определения эмиссионных характеристик ГТД. Расчётно-экспериментальное исследование по определению индекса эмиссии оксида

углерода камерой сгорания малоразмерного ГТД показало, что погрешность определения этого параметра снизилась с 30 – 80% до 20% во всем диапазоне режимов.

Вопросы и замечания к работе.

1. В главе 5 отсутствует постановка задачи относительно моделирования газодинамики турбулентного течения в кольцевой камере сгорания, неясно, использовалось ли вихреразрешающее моделирование или реализован RANS подход на основе известных моделей турбулентности. Не указывается, проводилась ли валидация расчетного подхода. Это не позволяет в полной мере проанализировать сопоставительные расчетно-экспериментальные зависимости для эмиссионных характеристик, показанные на рис. 14 автореферата и 5.6 диссертации.
2. Использование для характеристики режима только интегральной величины коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 3,0$ и $\alpha = 6,0$) не позволяет судить об условиях горения в локальных зонах жаровой трубы камеры сгорания. Неясно, почему при меньшем значении коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 3,0$) в первичной зоне горения локальные значения температуры ниже, чем для режима $\alpha = 6,0$. По всей видимости, на режиме $\alpha = 3,0$ вблизи фронтального устройства реализуется богатое горение, что и является причиной высоких выбросов CO. Целесообразно представить распределение коэффициента избытка воздуха (либо расхода воздуха) по характерным зонам камеры сгорания.
3. Непонятно, каким образом был организован переход между режимами $\alpha = 3,0$ и $\alpha = 6,0$ – увеличением массового расхода воздуха или уменьшением расхода топлива. В первом случае это приводит к повышению перепада полного давления в камере сгорания и во фронтальном устройстве, в частности, что значительно меняет газодинамику течения и процессы распыла и испарения капель. Во втором случае происходит уменьшение перепада давления топлива на форсунке, что также сопровождается изменением характеристик распыла и смесеобразования. Кроме этого, уменьшается тепловая мощность камеры сгорания. Как в этом случае возможно проводить сравнение результатов моделирования?
4. В задачах диссертации указано, что «разрабатывается метод моделирования процессов нагрева и испарения капель». А в главе 3 сказано, что выполнено «совершенствование метода моделирования нагрева и испарения капель жидкого топлива». Непонятно, какое из утверждений является корректным.
5. Результаты исследований эмиссионных характеристик камеры сгорания получены в условиях атмосферного давления. Известно, что переход на форсированные режимы работы камеры сгорания в составе двигателя сопровождается изменением показателей выбросов загрязняющих веществ. В диссертации такой оценки не приводится.

Заключение

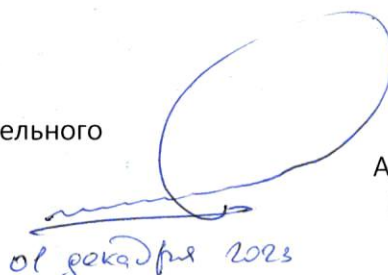
Диссертационная работа Эрнандэс Моралес Марио «Разработка метода моделирования процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного жидкого топлива в камерах сгорания авиационных газотурбинных двигателей» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи повышения точности определения эмиссионных и эксплуатационных характеристик КС на этапе проектирования и доводки авиационных ГТД на основе разработанного метода моделирования процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного жидкого топлива в трёхмерной постановке.

Работа выполнена на высоком научном и техническом уровне с использованием современных средств и методик, а основные выводы обоснованы и подтверждены результатами внедрения.

Диссертационная работа соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Эрнандэс Моралес Марио, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Отзыв обсуждён на научно-техническом семинаре кафедры «Общая и техническая физика» ФБГОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» 27.11.2023 (протокол №4). На заседании присутствовало 9 человек. Результаты голосования: за – 9, против – 0, воздержались – 0.

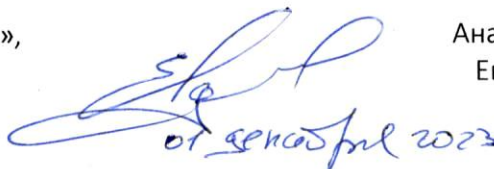
И.о. директора института
«Авиационные технологии и инженерная физика»,
профессор кафедры общей и технической физики
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П.А. Соловьева»,
доктор технических наук, доцент
Тел.: +7 (920) 100-84-26
e-mail: marialex2004@mail.ru
Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника



07 декабря 2023

Александр
Игоревич
Гурьянов

Профессор кафедры общей и технической физики
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П.А. Соловьева»,
доктор технических наук
Тел.: +7 (951) 282-55-73
e-mail: yevdokimov_oleg@mail.ru
Специальность 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника



07 декабря 2023

Олег
Анатольевич
Евдокимов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»,
152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53.

Мы, Гурьянов Александр Игоревич и Евдокимов Олег Анатольевич, даем согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Эрнандэс Моралес Марио, и их дальнейшую обработку.