

На правах рукописи

Эрнандэс Моралес Марио

РАЗРАБОТКА МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ  
КАПЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ  
АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Самара – 2023

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:

Мингазов Биалал Галавтдинович, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ», профессор кафедры реактивных двигателей и энергетических установок;

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 «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

Защита диссертации состоится 21 декабря 2023 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10, созданного 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/files/resources/dis\\_protection/Hernandez\\_Morales\\_M\\_Razrabotka\\_metoda\\_modelirovaniya.pdf](https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Hernandez_Morales_M_Razrabotka_metoda_modelirovaniya.pdf).

Автореферат разослан 20 октября 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 24.2.379.10

Виноградов А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Камера сгорания (КС) авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) является важнейшим узлом, определяющим его экологические характеристики и в значительной степени влияющим на показатели эффективности, экономичности и надёжности двигателя. Рабочий процесс в КС ГТД характеризуется крайне сложными физическими явлениями, такими как турбулентные течения, распыл жидкого топлива с последующим дроблением на капли, нагрев и испарение многокомпонентных капель, смешение испаренного топлива с воздухом, горение полученной топливовоздушной смеси (ТВС) в широком диапазоне изменения давления и температуры. Процессы распыла, нагрева и испарения капель определяют распределение топлива в объёме зоны горения и, следовательно, влияют на характеристики КС и всего двигателя в целом. Для проектирования КС, работающих на топливе сложного химического состава (керосин различных марок), актуальной является задача разработки моделей процессов распыла топлива форсуночными устройствами, образования капель, нагрева и испарения многокомпонентных капель. Учитывая тот факт, что точный состав керосина зависит от сырья и производителя, в проектировочных расчётах используют модельные топлива (или суррогаты), которые состоят из ограниченного количества химических компонентов. Формирование суррогатов керосина со свойствами, имеющими близкие характеристики к реальному топливу, также является важной задачей исследований.

Для КС ГТД гражданского назначения, работающих на бедных предварительно перемешанных смесях (технология LPP – Lean, Premixed, Prevaporized), важным параметром является качество подготовки ТВС, которое определяется временем испарения капель топлива. Для перспективных двигателей с высокими параметрами цикла, применяющих технологию прямого распыливания в бедной смеси (LDI - Lean Direct Injection), расположение фронта пламени и характеристики процесса горения также будут определяться скоростью испарения капель топлива. Для высокофорсированных двигателей со стехиометрическими камерами сгорания, а также для форсажных камер сгорания, габариты всего узла будут определяться временем испарения капли. Таким образом, развитие авиационных ГТД различного назначения тесно связано с процессами формирования, нагрева и испарения капель керосина, а технологии моделирования и управления этими процессами становятся критическими. В настоящее время при проектировании и доводке КС ГТД широко применяются коммерческие программные комплексы вычислительной газовой динамики (CFD), однако используемые в них подходы к моделированию нагрева и испарения основаны на упрощённых моделях отдельных процессов и не учитывают ряд важных факторов, среди которых можно выделить: 1) состав отдельных фракций в топливе и процесс их испарения; 2) неравномерность распределения параметров внутри капли (температура и доли химических компонентов); 3) диффузию компонентов в газовую фазу при наличии соседних капель. Развитие инженерного программного обеспечения зависит от понимания физических процессов, наличия апробированных подходов и моделей, а также от математического аппарата, способного решать подобные задачи. Повышение достоверности методов расчета рабочего процесса при проектировании и доводке КС ГТД за счёт использования моделей нагрева и испарения капель, учитывающих многокомпонентность топлива, диффузию компонентов внутри капли и насыщенность пара вокруг капли определяет *актуальность* настоящей диссертационной работы.

**Степень разработанности темы.** Изучением рабочего процесса в КС авиационных ГТД занимались как иностранные учёные (А.Лефевр, Т.Пуансо, Н.Рок), так и российские учёные (Ш.Пиралишвили, Б.Мингазов, А.Талантов, В.Митрофанов). Однако влияние размеров капель и их испарение на рабочий процесс КС исследовали лишь некоторые. В работах А.Лефевра, Н.Экааба, Дж.Грохманна, С.Сома, Ч.Кауфмана, И.Захматкеша и Р.Мишра показано, что уровень эмиссии вредных веществ (таких как CO, NOx, несгоревшие углеводороды и сажа) в КС зависит от размера образовавшихся капель и от времени их

испарения. Также, Н.Рок, С.Вон и А.Ланский в своих работах экспериментально доказали, что процесс распыла и испарения капель топлива существенно влияет на границу бедного срыва и неравномерность поля температуры на выходе из КС. В свою очередь, на процесс нагрева и испарения капли влияет ряд факторов, среди которых можно перечислить следующие: температура и давление окружающего газа (Дж.Чин, А.Лефевр), состав капли (Л.Поултон, А.Пинейро, М.Клингспорн, В.Ренц, В.Депредюран), теплообмен излучением (Ц.Хакенберг, Л.Домбровский). Как правило, в классических математических моделях нагрева и испарения этими параметрами пренебрегают. Исходя из этого, необходимы достоверные математические модели процессов нагрева и испарения капель при моделировании рабочего процесса в КС ГТД, учитывающие такие факторы, как многокомпонентность капли, скорость капли, насыщенность пара вокруг капли и внутреннюю диффузию компонентов. На практике при моделировании горения жидкого топлива в коммерческих программах вычислительной газовой динамики (ANSYS Fluent и других) используются упрощенные модели (диффузионные и конвективно-диффузионные), которые относятся к классическим моделям нагрева и испарения. В разработку новых математических моделей процессов нагрева и испарения капель многокомпонентных жидких топлив существенный вклад внесли такие исследователи как: С.Сажин, Г.Кастанет, Г.Коссали, А.Снегирёв, В.Третьяков. В работах С.Сажина и А.Снегирёва были разработаны модели нагрева и испарения капель, которые учитывают неравномерность распределения температуры внутри капли, диффузию компонентов внутри капли и эффект рециркуляции за счёт относительной скорости движения капли. Однако эти модели применимы к изолированным каплям, что не соответствует условиям в камерах сгорания ГТД. В работах Г.Кастанета и Г.Коссали доказано, что испарение одной капли влияет на испарение соседних капель за счёт диффузии компонентов в газовую фазу, но в настоящий момент попыток совместить эту модель с моделями С.Сажина и А.Снегирёва не было. Исходя из вышесказанного, важной задачей является совершенствование метода расчёта процессов нагрева и испарения капель жидкого топлива, включающее в себя новые математические модели нагрева и испарения для учёта таких параметров, как многокомпонентность капли, скорость движения капли, диффузию компонентов внутри капли и насыщенность пара вокруг неё.

**Цель работы:** Повышение 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.

**Задачи работы:**

1. Разработка метода моделирования процессов нагрева и испарения капель в трёхмерной постановке, учитывающего многокомпонентный состав капли, концентрацию компонентов внутри капли, насыщенность пара вокруг капли и относительную скорость капли.
2. Формирование суррогатов многокомпонентных жидких топлив, отличающихся от существующих учётом таких свойств, как теплоёмкость, теплопроводность и давление насыщенных паров, влияющих на процессы нагрева и испарения, а также с учётом кривой дистилляции.
3. Экспериментальное исследование характеристик испарения капель многокомпонентных жидких топлив (керосина и его суррогатов). Валидация разработанного метода расчёта процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного состава.
4. Определение характеристик камеры сгорания авиационного ГТД с использованием разработанного метода моделирования процессов нагрева и испарения многокомпонентных капель.

**Объект и предмет исследования.** Объект исследования – фронтальные устройства камер сгорания авиационных ГТД. Предмет исследования – метод моделирования нагрева и испарения капель многокомпонентного топлива.

### **Научная новизна.**

1. Метод моделирования процессов нагрева и испарения капель жидкого топлива в трёхмерной постановке, отличающийся комплексным учётом многокомпонентности капель, распределения концентрации компонентов внутри капли, насыщенности пара вокруг капли и относительной скорости движения капли.
2. Новая методика формирования суррогатов углеводородных топлив, отличающаяся от существующих учётом свойств, таких как теплоёмкость, теплопроводность и давление насыщенных паров, влияющих на процессы нагрева и испарения, а также учётом кривой дистилляции.
3. 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.
4. Новые экспериментальные зависимости характеристик испарения многокомпонентных жидких топлив (керосина и его суррогатов), показывающие изменение диаметра и температуры в приповерхностном слое капли от времени.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы заключается в обобщении расчётно-экспериментальных данных о времени испарения и температуре на поверхности капель керосина и его суррогатов при температурах внешней среды, характерных для рабочего процесса КС ГТД, а также в разработке метода моделирования процессов нагрева и испарения многокомпонентных капель жидкого топлива в трёхмерной постановке.

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. Практическая значимость подтверждается актом об использовании результатов диссертационной работы на ПАО «ОДК-Кузнецов».

Результаты диссертации использовались в рамках решения задач гранта Российского научного фонда № 21–19–00876 «Разработка моделей нагрева и испарения капель суррогатов керосина», в учебном процессе путём использования разработанного методического пособия «Расчёт свойств смесевых углеводородных топлив при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей» для студентов и аспирантов института двигателей и энергетических установок Самарского университета им. Королева. Результаты диссертации нашли практическое применение при выполнении научно-исследовательской работы под названием «Разработка эскизной документации форсуночных устройств для генерации гетерогенных капель с оценкой влияния впрыска воды с топливом в камеру сгорания газотурбинного двигателя» совместно с Томским политехническим университетом.

### **Методы исследования:**

1. Методы экспериментального определения времени испарения и распределения температуры внутри многокомпонентных жидких капель с помощью индуцированной лазерной флуоресценции.
2. Методы экспериментального определения физико-химических свойств жидких топлив.
3. Методы объектно-ориентированного программирования.
4. Методы расчёта процессов нагрева и испарения капель многокомпонентных жидких топлив, основанные на аналитическом решении уравнений теплопереноса и диффузии компонентов внутри капли.
5. Методы трёхмерного моделирования двухфазных потоков, основанные на подходе Лагранжа.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика формирования суррогатов углеводородных топлив, учитывающая следующие свойства: теплоёмкость, теплопроводность и давление насыщенных паров, влияющие на процессы нагрева и испарения капель, а также кривую дистилляции.
2. Компонентный состав суррогата авиационного керосина, позволяющий имитировать характеристики испарения авиационного керосина с заданной точностью.
3. Результаты экспериментальных исследований характеристикам испарения капель керосина и его суррогатов, показывающие изменение диаметра капли от времени, а также изменение температуры в приповерхностном слое капли от времени.
4. Метод моделирования процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного жидкого топлива в трёхмерной постановке, позволяющий уточнять время испарения капель, а также насыщенность пара вокруг них при численном моделировании рабочего процесса КС с помощью программ вычислительной газовой динамики.

### **Достоверность полученных результатов подтверждается:**

- применением сертифицированного коммерческого программного комплекса ANSYS Fluent, верифицированного и валидированного на задачах расчета газодинамических реагирующих течений по результатам сравнения с экспериментальными данными, полученными в научно-образовательном центре газодинамических исследований Самарского университета им. Королева;
- использованием в экспериментальном исследовании аттестованного оборудования и поверенных средств измерения;
- высоким уровнем согласования результатов численного моделирования с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований нагрева и испарения отдельных капель, а также характеристик камеры сгорания малоразмерного ГТД.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты работы докладывались 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.).

**Публикации.** 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.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 234 наименований. Объем диссертации составляет 173 страниц, в том числе 53 иллюстрации и 26 таблиц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**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.

**Первая глава** посвящена анализу влияния распыла, нагрева и испарения капель жидкого топлива на процессы смесеобразования в КС авиационных ГТД, а также анализу моделей расчета характеристик испарения капель жидкого топлива. Представлен обзор классических и современных моделей нагрева и испарения капель. Кроме того, в данной

главе рассмотрены подходы и методики по формированию модельного состава многокомпонентных жидких топлив типа авиационного керосина (или суррогатов керосина).

При использовании жидких топлив среди всех процессов, протекающих в КС, особое внимание уделяется распыливанию топлива, образованию капель, их нагреву и испарению. Именно эти процессы оказывают значительное влияние на распределение топлива в зоне горения, определяют локальные параметры потока и во многом характеристики КС. В литературе представлено большое количество численных и экспериментальных исследований влияния размера капель топлива и времени жизни капли на различные характеристики горения, в том числе: выбросы загрязняющих веществ ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , несгоревшие углеводороды, сажа), неравномерность поля температуры, диапазон устойчивости пламени, температуру стенок КС и полноту сгорания. 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, что показано в ряде экспериментальных и численных исследований. Как правило, такими факторами пренебрегают при численном моделировании рабочего процесса в КС авиационных ГТД.

Классические модели нагрева и испарения капель представляют собой модели, основанные на полуэмпирических зависимостях. Так, например, закон Срезневского – предполагает, что величина поверхности испаряющейся капли уменьшается со временем линейно. Для низких скоростей испарения используется диффузионная модель испарения, которая предполагает, что скорость испарения меняется за счёт диффузии пара между поверхностью капли и окружающим газом. Для высоких скоростей испарения разработана конвективно-диффузионная модель испарения, которая также учитывает влияние конвективного потока (поток Стефана). Модель односкоростного термолита определяет скорость испарения капли через выражение Аррениуса. Последние три модели реализованы в программах вычислительной газовой динамики (ANSYS Fluent и других). К недостаткам данных моделей можно отнести то, что они разработаны для однокомпонентных капель, не учитывают процессы внутри капли и относительную скорость движения капли.

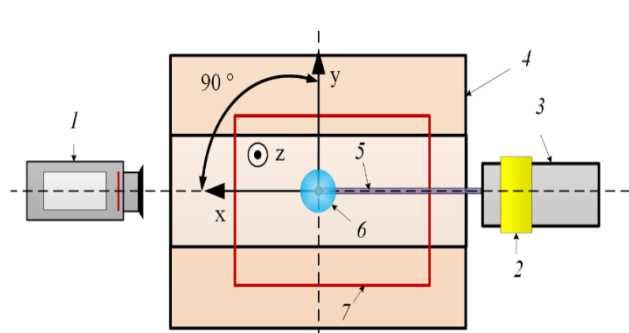
К современным моделям нагрева и испарения капель относятся модели, описанные в работах С.Сажина, Г.Кастанета, В.Сириньяно, С.Тонини, А.Снегирева. Среди этих моделей, можно выделить три основных типа: модель дискретных компонентов, модель квазидискретных компонентов и многомерную модель квазидискретных компонентов. Модель дискретных компонентов (DCM), разработанная С.Сажиним и Г.Кастанетом, позволяет учитывать скорость испарения каждого компонента. Данная модель была использована при решении инженерных задач в пакетах CFD для жидких топлив с небольшим количеством компонентов. В.Сириньяно для топлив широкого фракционного состава разработал модель квазидискретных компонентов, в которой используются квазикомпоненты с дробным количеством молекул углерода и водорода. Основным недостатком данной модели является то, что капля состоит только из алканов, что не соответствует реальному составу авиационного керосина. Для устранения данной проблемы С.Сажиним и С.Тонини была разработана многомерная модель квазидискретных компонентов, в которой учитываются компоненты из разных химических групп. Применение моделей с квазидискретными компонентами для решения задач с горением ограничено сложностью их реализации в программах CFD.

Компонентный состав авиационного керосина очень сложен и зависит от марки, сырья и производителя. По этой причине в вычислениях используют модельные топлива – суррогаты, состоящие из нескольких хорошо изученных веществ. Модельные топлива и методики их создания были исследованы в работах Р.Линдштедта, С.Дули, Д.Кима, А.Старика, С.Матвеева, И.Зубрилина, Н.Славинской, С.Вона и других. В данных работах можно найти однокомпонентные суррогаты керосина, двухкомпонентные, трехкомпонентные и суррогаты, включающие в себя до девяти компонентов. В настоящий момент работы по созданию суррогатов авиационного керосина ведутся в двух

направлениях: создание химического суррогата и создание физического суррогата. В основном исследуются химические суррогаты, где уделяют внимание так называемым целевым характеристикам горения (Combustion properties target, CPT). При этом валидация суррогата осуществляется только по этим характеристикам и не учитываются процессы распыла, нагрева и испарения капель.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным установкам и системам измерения. Экспериментальная часть работы реализована на стендах научно-образовательного центра газодинамических исследований (НОЦ ГДИ) и Инжинирингового центра (ИЦ) Самарского университета им. Королева, а также в лаборатории тепломассопереноса Томского Политехнического Университета.

В главе описан стенд для нагрева капель в муфельной печи (рисунок 1) с целью определения времени испарения капель, а также температуры в центре и на поверхности капель. Диапазон изменений температуры в печи составляет от 30 °С до 3000 °С. Погрешность определения температуры в центре и на поверхности капли не превышает  $\pm 10$  К, а погрешность определения диаметра капли  $\pm 2,5\%$ . Полученные значения служат для валидации разработанного метода расчета процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного состава.



1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – осветительный прожектор; 3 – моторизированное координатное устройство (МКУ); 4 – трубчатая муфельная печь; 5 – держатель (малоинерционная термопара); 6 – капля; 7 – регистрационная область  
Рисунок 1 - Схема экспериментального стенда для исследования нагрева капель в трубчатой муфельной печи

В главе описано экспериментальное оборудование для определения свойств многокомпонентных жидких топлив. Автоматический аппарат АРН-ЛАБ-11 предназначен для определения фракционного состава светлых и тёмных нефтепродуктов при атмосферном давлении в диапазоне температур до 450°С. Погрешность аппарата составляет  $\pm 0,1$  мл. Прибор ТЕМПОС предназначен для измерений теплопроводности и теплоёмкости строительных, теплоизоляционных и прочих материалов. Погрешность измерения данного прибора не превышает  $\pm 0,01$  Вт/(м·К). Лабораторный комплект 2М7 позволяет определить основные показатели качества нефтепродуктов с точностью до  $\pm 0,5$  по октановому числу.

**Третья глава** посвящена совершенствованию метода моделирования нагрева и испарения капель жидкого топлива. Данный метод состоит из двух этапов. 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. В третьей главе рассмотрена разработка и валидация новой методики формирования суррогатов жидкого топлива многокомпонентного состава, а также разработка суррогата авиационного керосина ТС-1.

Новая 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. Для определения вышеперечисленных свойств как отдельных компонентов, так и суррогата в целом, на основе проведённого обзора, были выбраны методики для расчёта каждого физико-химического свойства. Валидация этих методик была проведена по опытным данным, полученным в рамках данной работы, а также взятым из работ других авторов. На рисунке 2 представлены зависимости плотности суррогата S1 (5,8%-додекан, 34,2%-изоцетан, 1,9%-2-метилгептан, 16,3%-о-ксилол, 41,8%-декагидронафталин), предложенного для авиационного керосина RP-3 А. Ли (2020 г.) от температуры, которые получены расчётными (1 – Л.Йоса; 2 – Х.Перри; 3 – А.Нессери) и экспериментальными методами. Наименьшая погрешность относительно опытных данных получена для метода Л.Йоса (1%), который и был выбран для расчёта плотности. На рисунке 3 представлена валидация метода расчёта теплоёмкости, предложенного Л.Йосом, для суррогатов первого поколения (42,7%-декан, 24,3%-толуол, 33%-изооктан) и второго поколения (50,9%-додекан, 27,2%-толуол, 21,9%-2,5-деметилгексан), предложенного Р. Джо (2010 г.). Среднее расхождение метода не превышает 5% для обоих суррогатов, поэтому данный метод будет использоваться далее в расчётах. Аналогичная валидация расчётных методик проведена по всему спектру свойств углеводородных компонентов, используемых для формирования суррогатов керосина.

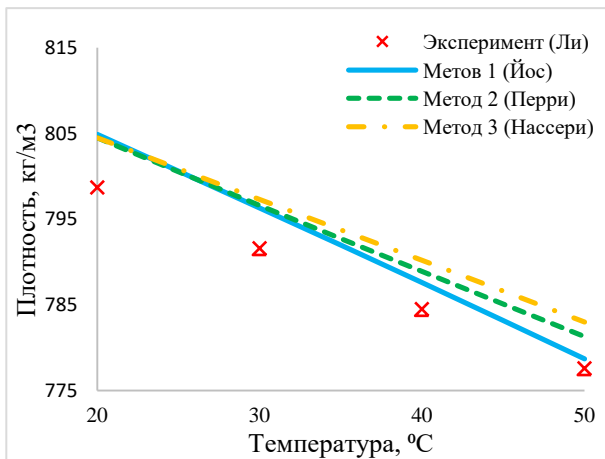


Рисунок 2 – Сравнение теоретических методов определения плотности с экспериментальными данными для суррогата S1 (Ли, 2020г.)

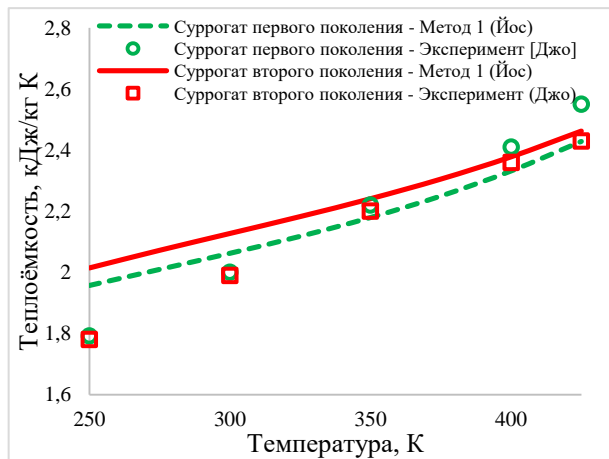


Рисунок 3 – Валидация метода расчёта теплоёмкость суррогатов первого и второго поколения (Джо, 2010г.)

Разработанный алгоритм расчёта компонентного состава суррогатов с заданными свойствами (рисунок 4) представляет собой итерационный процесс. Сначала подбирается компонентный состав суррогата путём сопоставления свойств смеси (молекулярный вес, отношение количества атомов водорода к количеству атомов углерода Н/С, цетановое число, индекс сажеобразования, теплота сгорания, плотность, вязкость, поверхностное натяжение, кривая дистилляции, теплоёмкость, теплопроводность), рассчитанных по верифицированным ранее методикам и свойствам целевого топлива. Ограничения на компоненты накладываются в зависимости от их наличия в существующих детальных кинетических механизмах, а также от их доступности для проведения экспериментальных исследований. Далее рассчитываются расхождения между свойствами исходного топлива (заданных, например, для керосина ТС-1) и свойствами суррогата до и после изменения концентрации компонентов до тех пор, пока не будут достигнуты заданные отклонения. Разработанная методика формирования суррогата авиационных топлив реализована в виде зарегистрированной авторской программы для ЭВМ («FM Configurator V1»).

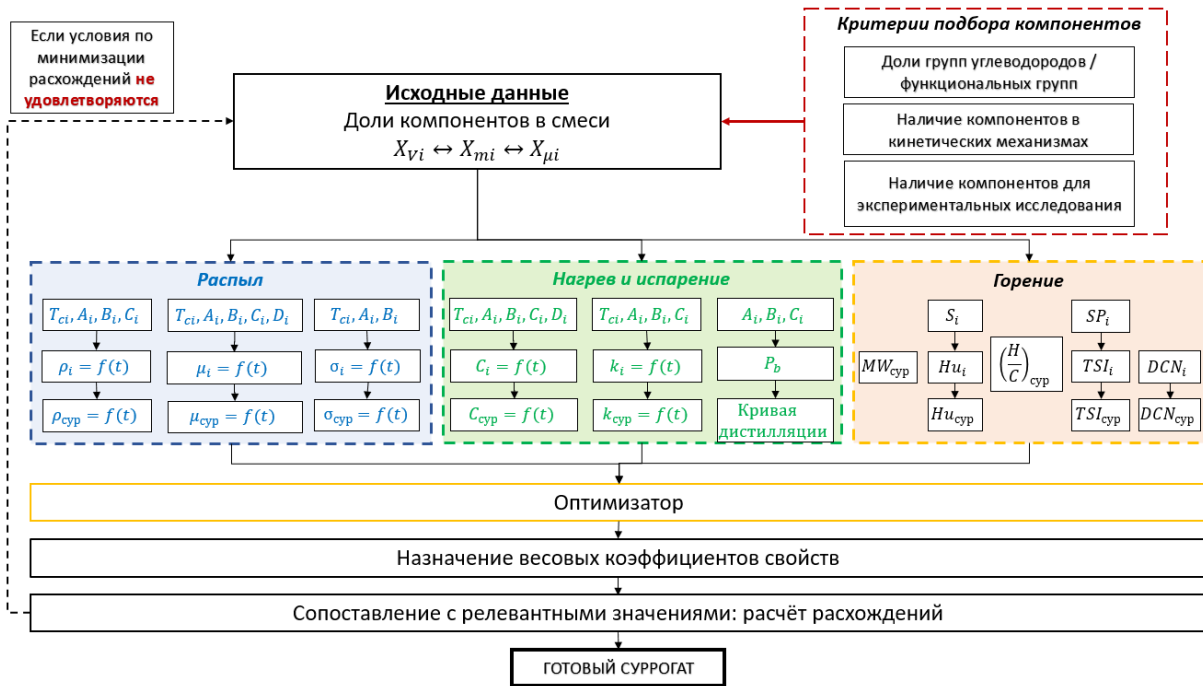


Рисунок 4 – Методика формирования суррогата углеводородного топлива

Для реализации задач исследования с использованием разработанной методики было сформировано три варианта суррогатов авиационного керосина марки ТС-1 (SU4, SU10 и SU11), представленных в таблице 1. В результате расчётно-экспериментального исследования показано, что четырёхкомпонентный суррогат SU4 по своим физико-химическим свойствам наиболее хорошо согласуется со свойствами керосина ТС-1 (по большинству основных свойств погрешность не превышает 5%). Таким образом, SU4 был выбран для дальнейшего исследования характеристик нагрева и испарения капель, а также рабочего процесса КС ГТД.

**Четвёртая глава** посвящена разработке и валидации новой модели нагрева и испарения капель многокомпонентного состава.

Модель нагрева и испарения капель, разработана в данном исследовании, основана на аналитическом решении уравнений теплопроводности и диффузии компонентов в одномерной постановке согласно работам С.Сажина, Г.Кастанета и А.Снегирева, с учётом следующих допущений: радиус капли принимается постоянным, что допустимо для маленьких временных шагов. Данная модель учитывает градиент температуры и концентрации компонентов внутри капли и применима для изолированных неподвижных капель. Далее она была доработана для учёта еще двух факторов: движение капли в пространстве и влияние насыщенности пара вокруг капли на процесс теплообмена. Относительное движение капель учитывается с помощью модели эффективной теплопроводности и модели эффективной диффузии. Насыщенность пара вокруг капли учитывается с помощью модели Стефана-Фукса. Для того, чтобы учитывать движение капель в модели Стефана-Фукса, применяют модель Абрамзона-Сириньяно для каждого химического компонента, в которой вводятся два условных слоя на поверхности капли, а испарение определяется интенсивностью конвективного теплообмена 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 рассчитывались зависимости диаметра капли и температуры на поверхности и в центре капли от времени, как показано на рисунках 5 и 6. Валидация разработанной модели

проводилась для керосина и суррогатов, представленных в таблице 1. Для этого были проведены эксперименты совместно с Томским политехническим университетом по определению температуры на поверхности капли и времени испарения капли. Средняя погрешность модели расчёта процессов нагрева и испарения не превышает 15%.

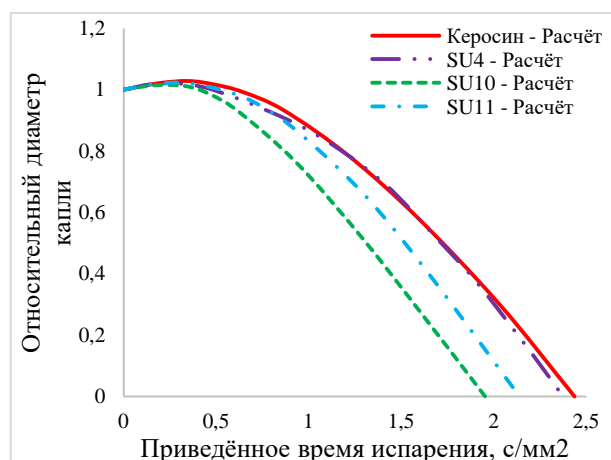


Рисунок 5 - Зависимость изменения относительного диаметра капли многокомпонентных суррогатов от времени

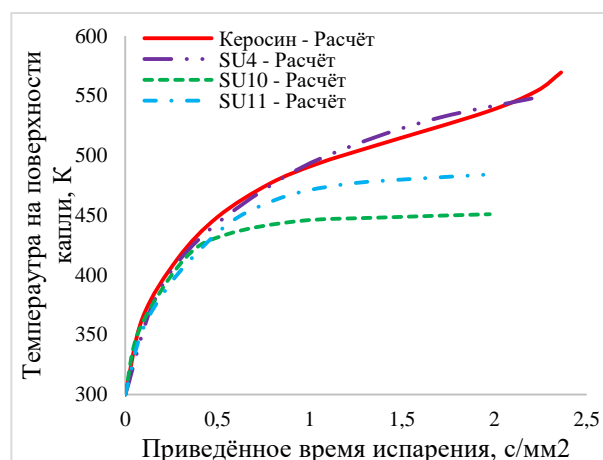


Рисунок 6 - Зависимость изменения температуры на поверхности капли многокомпонентных суррогатов от времени

Для выбора суррогата для моделирования рабочего процесса и исследования характеристик КС ГТД было проведено сравнение характеристик испарения суррогатов из таблицы 1 с суррогатами SU1 и SU2, разработанными ранее в Самарском университете им. Королева, которые учитывают лишь некоторые целевые характеристики горения. Были исследованы три параметра: изменение температуры на поверхности капли в зависимости от времени (рисунок 7), изменение диаметра капли в зависимости от времени (рисунок 8) и кривая дистилляции (рисунок 9). Видно, что суррогат SU4 хорошо сопоставляется с керосином: расхождение по температуре на поверхности капли минимальное и составляет 0,12%, а по времени испарения – 8,9%.

Таблица 1 – Состав суррогатов авиационного керосина (массовые доли, %)

CAS No.	124-18-5	4390-04-9	119-64-2	108-87-2	95-47-6	1678-93-9	71-43-2
Формула	$C_{10}H_{22}$	$C_{16}H_{34}$	$C_{10}H_{12}$	$C_7H_{14}$	$C_8H_{10}$	$C_{10}H_{20}$	$C_6H_6$
Название	декан	изоцетан	тетралин	метилциклогексан	о-ксилол	бутилциклогексан	бензол
SU4	52,7%	20,60%	16,20%	10,50%			
SU10	47,6%			36,6%	15,7%		
SU11	27,8%			36,1%		28,1%	8,0%

Достоверный расчёт кривой дистилляции необходим для определения скорости испарения отдельных компонентов и характеристик горения отдельных фракций. На рисунке 9 приведена расчётная кривая дистилляции суррогата керосина SU4 в сравнении с экспериментальными кривыми дистилляции по данному суррогату и керосину ТС-1.

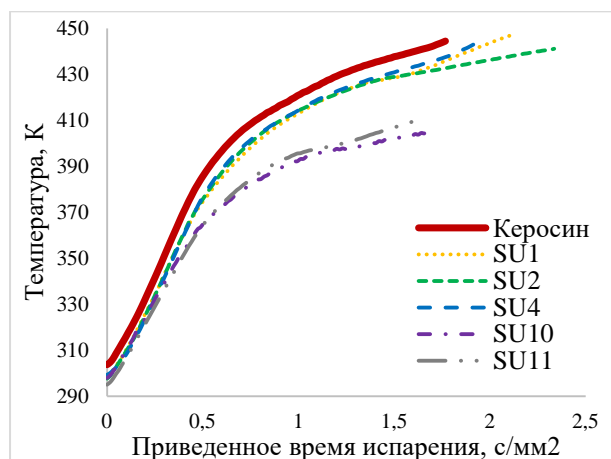


Рисунок 7 – Изменение температуры на поверхности капли по времени

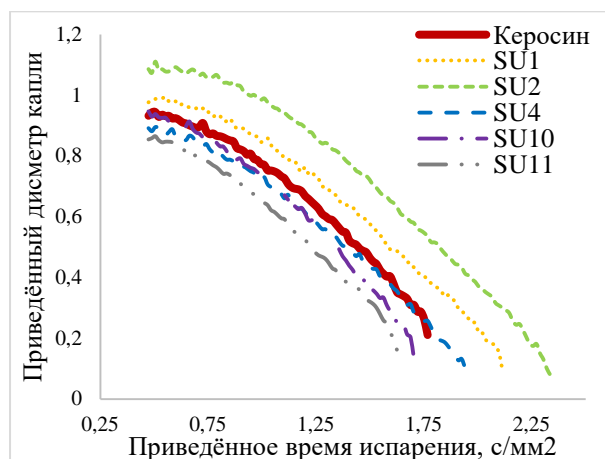


Рисунок 8 – Изменение относительно диаметра капли по времени

Среднее расхождение температуры испарения различных фракций между керосином и суррогатом SU4 составляет 3,98%, что получено из сравнения экспериментальных данных (Рисунок 9). Исходя из анализа по всем трём параметрам испарения, суррогат SU4 выбран для численного моделирования рабочего процесса в КС авиационного малоразмерного ГТД.

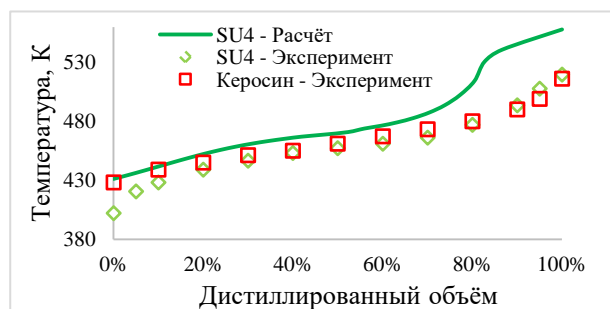


Рисунок 9 – Сравнение теоретической и экспериментальной кривых дистилляции многокомпонентного суррата SU4 с экспериментальной кривой дистилляции авиационного керосина марки ТС-1

**Пятая глава** посвящена определению 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 фронтальной плите восемью вихревыми горелочными устройствами с центробежными распылителями жидкого топлива, геометрическая и сеточная модель которой представлены на рисунках 10 и 11. Моделирование горения проводилось в программном комплексе вычислительной газовой динамики ANSYS Fluent для четырёх режимов работы КС при изменении коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  от 3 до 6. Другие параметры рабочего процесса выдерживались постоянными: температура воздуха на входе в КС -  $T_K = 423\text{K}$ ; приведенная скорость на входе -  $\lambda_K = 0,25$ ; атмосферное давление -  $p_n = 101325\text{Па}$ . В расчётах использовалась «модель горения частично предварительно перемешанной смеси» вместе с моделью дисперсной фазы (Disperse Phase Model - DPM), которая отвечает за характеристики распыла, нагрева и испарения капель. В модель DPM была добавлена новая разработанная модель нагрева и испарения капель в виде пользовательской функции (User-Defined Function - UDF), которая представляет собой подпрограмму, написанную на языке программирования C++. Данная пользовательская функция предварительно была протестирована для трёх случаев: для отдельной изолированной капли, для двух соседних капель и для кластера капель. Также в модель DPM задаётся состав и свойства используемого топлива. В данном случае был использован сформированный суррогат SU4, состав которого представлен в таблице 1.

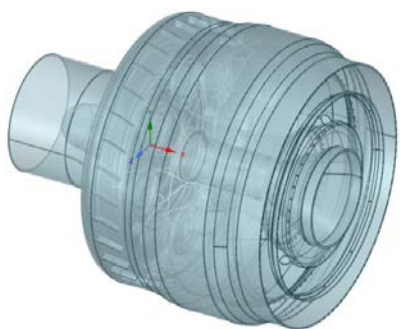


Рисунок 10 – Геометрическая модель КС

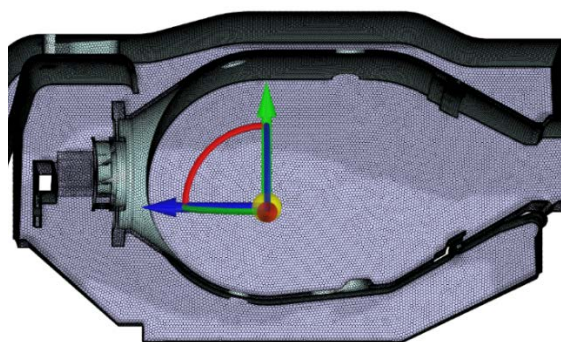


Рисунок 11 – Сеточная модель КС

Результаты расчёта по распределению температуры (рисунок 12) и концентрации оксида углерода (СО) (рисунок 13) представлены для режимов  $\alpha = 3$  и  $\alpha = 6$ .

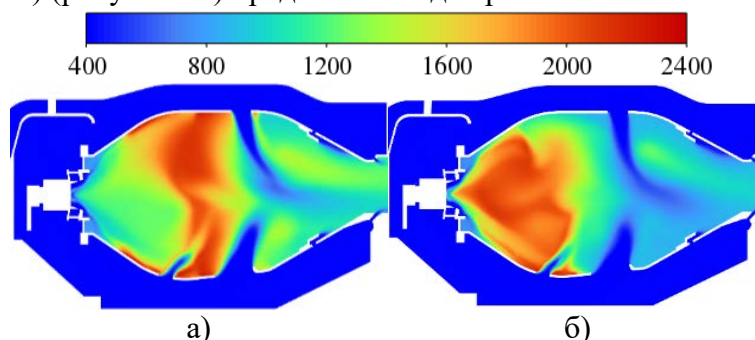


Рисунок 12 – Распределение температуры в продольном сечении КС:  
а)  $\alpha=3$ ; б)  $\alpha=6$

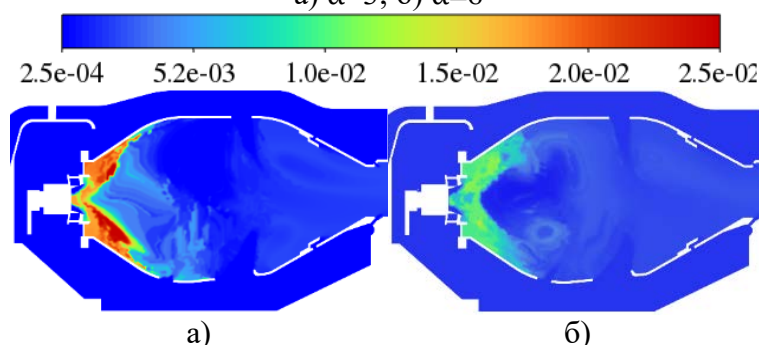


Рисунок 13 – Распределение массовых долей СО в продольном сечении КС:  
а)  $\alpha=3$ ; б)  $\alpha=6$

Из представленных данных видно, что для режима  $\alpha = 3$  в следе за горелочным устройством наблюдается пониженный температурный режим (1100 – 1500К), а основное горение происходит за первым рядом струй воздуха, что и предопределяет повышенные концентрации СО (до 2,5%) в этой зоне. Для режима  $\alpha = 6$  основной высокотемпературный процесс горения (1700 – 2000К) наблюдается в следе за горелкой до первого ряда струй воздуха, что обеспечивает эффективное выгорание СО (концентрация менее 1%) в этой зоне. Различные уровни СО в первичной зоне КС малоразмерного ГТД определяют и выходные характеристики по этому параметру.

Результаты определения индексов эмиссии оксида углерода ( $EI_{CO}$ ) для исследуемой КС ГТД с использованием усовершенствованного метода моделирования процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного состава представлены на рисунке 14. Здесь же отражены результаты расчёта по стандартным методикам, используемым в коммерческих программных пакетах, а также экспериментальные данные, полученные в научно-образовательном центре газодинамических исследований Самарского университета им. Королева. Анализ расчётно-экспериментального исследования показывает, что погрешность

численного определения индексов эмиссии оксида углерода с использованием разработанного метода снизилась с 30 – 80% до 20% во всём диапазоне режимов.

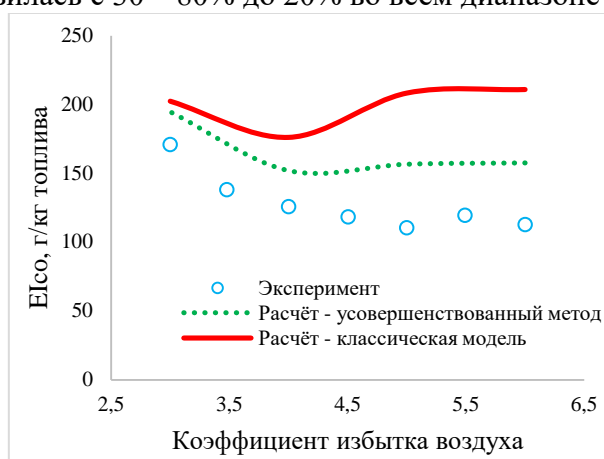


Рисунок 14 – Индексы эмиссии оксида углерода (EI<sub>CO</sub>) КС ГТД

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования решена важная научная задача, направленная на повышение точности определения эмиссионных и эксплуатационных характеристики КС на этапе её проектирования и доводки, что обеспечит повышение эффективности проектирования камер сгорания авиационных ГТД. Получены и сформулированы следующие основные результаты:

1. Разработана методика формирования суррогатов авиационных топлив в виде зарегистрированной авторской программы для ЭВМ («FM Configurator V1»), отличающаяся от существующих учётом таких свойств, как теплоёмкость, теплопроводность и давление насыщенных паров, а также кривой дистилляции, позволяющая сформировать суррогаты для моделирования процессов нагрева и испарения капель.

2. Сформирован оригинальный четырёхкомпонентный состав суррогата авиационного керосина ТС-1, характеристики испарения которого соответствуют характеристикам испарения авиационного керосина: точность по времени испарения составляет 91%, по температуре на поверхности капли составляет 99%, а по кривой дистилляции – 96%.

3. Впервые получены экспериментальные данные о времени испарения и температуре на поверхности капель многокомпонентных жидких топлив (керосина и его суррогатов). Эти данные были использованы и могут быть использованы для валидации новых моделей нагрева и испарения капель многокомпонентного состава.

4. Разработан метод моделирования процессов нагрева и испарения капель жидкого топлива в трёхмерной постановке, отличающийся комплексным учётом многокомпонентности капель, концентраций компонентов внутри капли, насыщенности пара вокруг капли и относительной скорости движения капли, позволяющий уточнять время испарения капель, а также насыщенности пара вокруг них при численном моделировании рабочего процесса КС с помощью программ вычислительной газовой динамики.

5. Применение разработанного метода расчёта процессов нагрева и испарения капель многокомпонентного состава, а также сформированного для авиационного керосина марки ТС-1 суррогата SU4 позволило 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.

Данная работа была выполнена в рамках гранта РНФ «Разработка моделей нагрева и испарения капель суррогатов керосина» №21-19-00876, а ее результаты использованы для выполнения ряда хозяйственных и госбюджетных НИР. Имеется акт использования результатов диссертационной работы на ПАО «ОДК-Кузнецов».

Перспектива дальнейшего развития темы состоит в совершенствовании модели нагрева и испарения капель для прогнозирования характеристик испарения в более широком диапазоне давлений и диаметров капель, что актуально для современных КС ГТД, а также оптимизации метода для более быстрых и точных вычислений.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### Статьи в изданиях, индексируемых в ВАК

1. Расчёт характеристик течения жидкого топлива при его подаче через центробежные форсунки малоразмерных газотурбинных двигателей, Гураков Н.И., Зубрилин И.А., Эрнандэс Моралес М., Якушкин Д.В., Диденко А.А., Матвеев С.Г., Комисар Ю.В., 2021, Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.

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

2. Experimental study of the combustion of surrogates of aviation kerosene TS-1, Matveev S.S., Idrisov D.V., Matveev S.G., Gurakov N.I., Anisimov M.Y., Savchenkova A.S., Zubrilin I.A., Morales M.H., 2020, AIP Conference Proceedings.

3. Validation of the VOF method for liquid spray process simulation from a pressure-swirl atomizer, Gurakov N.I., Zubrilin I.A., Abrashkin V.Y., Morales M.H., Yakushkin D.V., Yastrebov V.V., Kolomzarov O.V., Idrisov D.V., 2020, AIP Conference Proceedings.

4. A study on the geometric characteristic influence on the liquid fuel flow in a three-way pressure-swirl atomizer, Gurakov N.I., Morales M.H., Zubrilin I.A., Bolychev S.A., Didenko A.A., Matveev S.G., 2021, Journal of Physics: Conference Series.

5. A methodology for calculating the properties of aircraft kerosene surrogates that affect the atomization and evaporation characteristics, M. Hernandez Morales, Zubrilin I.A., Matveev S.G., Didenko A.A., Anisimov V.M., Tsapenkov K.D., 2021 International Scientific and Technical Engine Conference (EC), Samara, Russian Federation, 2023, pp. 1-5.

6. A hybrid method for prediction the sauter mean diameter (D32) of kerosene sprays of pressure-swirl atomizers of small size gas turbine engines, Gurakov N.I., Matveev S.G., Zubrilin I.A., Didenko A.A., M. Hernandez Morales, Yastrebov V.V., Yakushkin D.V., 2021 International Scientific and Technical Engine Conference (EC), Samara, Russian Federation, 2023, pp. 1-4.

7. Mario H. Morales, Konstantin D. Tsapenkov, Ivan A. Zubrilin, Denis V. Yakushkin, Alexander S. Semenikhin, Sergei S. Sazhin & Sergei G. Matveev (2023) Formulation of Surrogates of Hydrocarbon Fuels Using Selected Physico-Chemical Properties Related to Atomization, Heating, Evaporation and Combustion Behaviours, Combustion Science and Technology, DOI: 10.1080/00102202.2023.2211224

### Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «FM Configurator V1» // Зубрилин И.А., Останюк Я.А., Цапенков К.Д., Эрнандэс Моралес М., Кузнецов А.Ю., Якушкин Д.В., Ястребов В.В. № 2023614390 от 01.03.2023.

### Публикации автора в иных изданиях

9. Применение суррогатов керосина для моделирования процессов горения, Зубрилин И.А., Матвеев С.С., Идрисов Д.В., Эрнандэс Моралес М., Матвеев С.Г., 2019, Сборник

тезисов XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей».

10. Гибридная методика определения среднего диаметра капель (D32) керосина в области течения за центробежной форсункой, Гураков Н.И., Матвеев С.Г., Зубрилин И.А., Диденко А.А., **Эрнандэс Моралес М.**, Ястребов В.В., 2021, Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции.

11. Методика расчета свойств суррогата авиационного керосина, влияющих на характеристики распыла и испарения, **Эрнандэс Моралес М.**, Зубрилин И.А., Матвеев С.Г., Гураков Н.И., Диденко А.А., 2021, Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции.

12. Исследование свойств фракций суррогатов авиационного керосина, **Эрнандэс Моралес М.**, Цапенков К.Д., Зубрилин И.А., Ястребов В.В., Якушкин Д.В., Кузнецов А.Ю., 2022, Сборник тезисов научно-технического конгресса по двигателестроению (НТКД-2022) (Москва, 2022).

13. Методика расчета тепломассообмена углеводородных топлив с учетом их многокомпонентности, внутренней диффузии и насыщенности окружающего газа, **Эрнандэс Моралес М.**, Зубрилин И.А., Матвеев С.Г., Стрижак П.А., Антонов Д.В., 2022, Сборник тезисов научно-технического конгресса по двигателестроению (НТКД-2022) (Москва, 2022).

14. Choice of a kerosene surrogate for prediction of the emission of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons, Semenikhin A.S., Tsapenkov K.D., Novichkova S.S., Popov A.D., **Hernandez M.M.**, Idrisov D.V., Zubrilin I.A., Matveev S.S., Chechet I.V., Matveev S.G., Proceedings of the conference “International conference on physics and chemistry of combustion and processes in extreme environments”, Samara, 2022, p. 99.