

30.04.2025 № 0804/1645

Кому: Учёному секретарю диссертационного совета
24.2.379.10 при федеральном государственном
автономном образовательном учреждении высшего
образования «Самарский национальный
исследовательский университет имени академика С.П.
Королева»
д.т.н., доценту Виноградову А.С.

Куда: 443086, Приволжский федеральный округ, Самарская
область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.



УТВЕРЖДАЮ

Ректор

доктор физико-математических наук, профессор

В. И. Кошкин

30 апреля 2025 года

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева на диссертационную работу Кутлумухамедова Артура Рамилевича по теме «Метод расчёта выбросов монооксида углерода с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление в камерах сгорания газотурбинных двигателей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Актуальность темы диссертации

Разработка перспективных авиационных и наземных ГТД требует непрерывного совершенствования конструкции камеры сгорания, а её рабочий процесс во многом определяет экономические и экологические характеристики двигателя в целом. Повышение эффективности сжигания топлива и снижение выбросов вредных веществ в ГТД приводит к необходимости учёта при проектировании камер сгорания множества факторов, определяющих протекание термогазодинамических процессов и химических реакций, что сопряжено с большими затратами вычислительных ресурсов и времени.

Одной из важных проблем при проектировании камер сгорания ГТД является обеспечение допустимых выбросов монооксида углерода, высокий уровень которых связан с низкой полнотой сгорания топлива и может указывать на неэффективную организацию процессов горения в камере сгорания.

Развитие методов расчета и прогнозирования эмиссии загрязняющих веществ в части улучшения точности расчетов и повышения вычислительной эффективности требует формирования научно-технического задела в области экспериментальных и расчетно-теоретических исследований процессов горения. В этой связи диссертация

Входящий № 216 - 3649
Дата 06 МАЙ 2025
Самарский университет

Кутлумухамедова А.Р. «Метод расчёта выбросов монооксида углерода с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление в камерах сгорания газотурбинных двигателей» является актуальной работой.

Общая характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертация характеризуется полнотой и завершенностью. Текст диссертации состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка публикаций по теме исследования. Материал изложен на 150 страницах, включает 61 рисунок, 16 таблиц, библиографию из 100 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, описана степень ее разработанности, поставлена цель исследований, заключающаяся в повышении эффективности проектирования камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих на природном газе, при оценке выбросов монооксида углерода за счёт формализованного выделения зон, лимитирующих его окисление. Сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, обоснована достоверность результатов; представлены сведения об апробации и публикациях по теме диссертационной работы.

В **первой главе** раскрывается актуальность проблемы снижения выбросов монооксида углерода (CO) из камер сгорания ГТД. Приведены сводные данные по допустимому уровню выбросов вредных веществ в отработавших газах авиационных и наземных ГТД, рассмотрены основные концепции создания малоэмиссионных камер сгорания и сопутствующие трудности снижения выбросов CO. Отдельно рассмотрены проблемы расчетной оценки выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД для следующих методов: расчет по полуэмпирическим зависимостям; CFD моделирование и реакторный метод. Установлена необходимость учета детальной химической кинетики при расчете выбросов CO, т.к. расчетное количество монооксида углерода может отличаться на порядок при сравнении глобальных и детальных механизмов.

Во **второй главе** приведены результаты расчета модельной малогабаритной камеры сгорания с использованием комбинации CFD моделирования и реакторного метода. Получены расчетные зависимости влияния отдельных факторов (температура на входе, давление, состав смеси) на уровень выбросов CO. Полученные результаты качественно соответствуют теории рабочих процессов камер сгорания ГТД и известным исследованиям. По результатам анализа отмечена целесообразность выбора комбинированного метода, объединяющего достоинства CFD моделирования и реакторного метода, в качестве приоритетного.

В **третьей главе** описан разработанный метод расчета выбросов монооксида углерода с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление в камерах сгорания ГТД. В разработанном методе неравномерно распределенные в рабочем объеме «бедные» зоны объединяются в «бедные» струйки и моделируются отдельными реакторами для учета неравномерности горючей смеси по составу и повышения точности расчета выбросов CO. Приведены способы построения реакторной модели камеры сгорания по результатам обработки трехмерного CFD моделирования. Проработаны вопросы моделирования отдельными реакторами: зоны смешения потоков горючей смеси; зоны пламени; зоны обратных токов; «бедных» и основных струек горючей смеси. Приведено теоретическое обоснование выбранных количественных критериев при моделировании реакторами «бедных» струек и зоны пламени.

В **четвертой главе** приведены результаты апробации разработанного метода на примере расчета «богато-бедной» камеры сгорания наземной энергетической установки ГТЭ-10/953 номинальной мощностью 8 МВт, работающей на природном газе. Расчеты реакторной модели выполнены в некоммерческом программном продукте CANTERA 2.4.0 с открытым исходным кодом. Получено хорошее соответствие расчетных выбросов CO экспериментальным данным. Также, по разработанному методу, выполнены расчеты исходной (до конвертирования) конструкции камеры сгорания при замене керосиновой форсунки на газовую (жаровая труба без измерений – соответствует серийной конструкции авиационного двигателя P-95Ш). Получен низкий уровень полноты сгорания после замены форсунок, что соответствует экспериментальным данным.

Научная новизна обозначена следующими пунктами.

Среди наиболее значимых новых научных положений необходимо отметить разработку нового метода расчёта выбросов монооксида углерода (CO) в камерах сгорания ГТД с применением детальной химической кинетики, отличающийся формализованным

построением реакторной модели камеры сгорания по результатам трёхмерного CFD моделирования со схематичным описанием структуры течения, распределения воздуха и неравномерности коэффициента избытка воздуха. Предложен новый критерий формирования реакторной модели камеры сгорания, отличающийся обобщением «бедных» зон, неравномерно распределённых в рабочем объёме, в низкотемпературные «бедные» струйки с низкой скоростью окисления монооксида углерода, а также критерий моделирования реакторами зоны пламени, отличающийся выделением высокотемпературной зоны с существенным сдвигом равновесия в сторону монооксида углерода.

Получены новые расчётные зависимости влияния на выбросы CO распределения коэффициента избытка воздуха по длине жаровой трубы конвертированной «богато-бедной» малоэмиссионной камеры сгорания.

Разработанные автором подходы к построению реакторной модели камеры сгорания безусловно обладают научной новизной, позволяют повысить точность учета неравномерности смеси по составу и получить реакторную модель камеры сгорания, являющуюся перспективной с точки зрения прогнозирования выбросов монооксида углерода.

Достоверность основных положений и результатов работы определяется как корректным применением фундаментальных законов и уравнений теплофизики, так и использованием верифицированных методов вычислительной газовой динамики и моделирования химической кинетики, реализованных в программных продуктах ANSYS CFX и CANTERA. Автором получен высокий уровень соответствия расчетных данных экспериментам, проведенным в ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» и АО «Авиадвигатель».

Разработанный автором метод предполагает применение детальных механизмов химической кинетики совместно с CFD моделированием позволяет учитывать распределение воздуха по жаровой трубе, неоднородность состава топливовоздушной смеси при оценке образования монооксида углерода, что представляет **теоретическую значимость работы**. Предложенный автором метод может быть использован для оценки влияния механизма химической кинетики на уровень выбросов CO при расчете по реакторной модели камеры сгорания.

С позиции **практической значимости**, в работе показана возможность применения разработанного метода при оптимизации распределения воздуха в жаровой трубе в рамках уменьшения выбросов монооксида углерода при конвертировании камеры сгорания авиационного двигателя Р-95Ш с керосина на природный газ.

Содержание автореферата диссертации соответствует работе и отражает ее основные результаты.

К работе имеются следующие **замечания и пожелания**.

1 Отсутствует оценка степени влияния теплообмена на выбросы CO при расчете реакторной модели камеры сгорания газотурбинной энергетической установки ГТЭ-10/953. Известно, что неадиабатность зоны горения приводит к росту концентрации продуктов неполного сгорания.

2 В работе, к сожалению, отсутствуют сравнительные расчеты по разработанной автором реакторной модели камеры сгорания и с применением других современных детальных механизмов химической кинетики, реализуемых в рамках CFD моделирования.

3 Не представлено описание постановки CFD моделирования камеры сгорания ГТЭ-10/953 с обоснованием выбора модели турбулентности, характеристик расчётной сетки и исследования сеточной сходимости.

4 Разработанный метод предназначен исключительно для оценки выбросов монооксида углерода и не позволяет прогнозировать выбросы оксидов азота. В то же время известно, что разработка и доводка малоэмиссионных камер сгорания требует учёта взаимного влияния мероприятий по снижению выбросов CO и NO_x друг на друга.

5. Автором не рассмотрена возможность применения разработанной методики расчета выбросов монооксида углерода для современных камер сгорания, например, TAPS или с предварительным смешением компонентов.

6. Не ясно, возможно ли применять разработанную автором методику для других видов топлива?

Указанные замечания не снижают ценность диссертационной работы и не влияют на основные научные и практические результаты.

В целом, диссертационная работа Кутлумухамедова А. Р. «Метод расчёта выбросов монооксида углерода с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление

в камерах сгорания газотурбинных двигателей» является законченной научно-квалификационной исследовательской работой, выполненной на актуальную тему на достаточно высоком научно-техническом уровне и соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ, а ее автор Кутлумухамедов Артур Рамилевич заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Отзыв обсуждён на заседании кафедры «Общая и техническая физика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» 25.04.2025 (протокол №10). На заседании присутствовало 10 человек. Результаты голосования: за – 10 против – 0, воздержались – 0.

Кандидат технических наук (05.04.12 - Турбомашины и комбинированные турбоустановки), доцент,
заведующий кафедрой общей и технической физики
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева»,
телефон: +7-920-102-18-58
e-mail: serveret@yandex.ru



30.04.2025

Сергей Владимирович Веретенников

Доктор технических наук (01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника),
профессор кафедры общей и технической физики
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева»,
телефон: +7-951-282-55-73
e-mail: yevdokimov_oleg@mail.ru
специальность: 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника



30.04.2025

Олег Анатольевич Евдокимов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», 152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53 (ФГБОУ ВО РГТУ имени П.А. Соловьева), тел. +7 4855 23 97 22, факс: +7 4855 21 39 64, rector@rsatu.ru

Мы, Веретенников Сергей Владимирович и Евдокимов Олег Анатольевич, даём согласие на обработку наших персональных данных и их использование в документах, связанных с защитой диссертационной работы Кутлумухамедова Артура Рамилевича.