

КУТЛУМУХАМЕДОВ АРТУР РАМИЛЕВИЧ

**МЕТОД РАСЧЁТА ВЫБРОСОВ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА
С ФОРМАЛИЗОВАННЫМ ВЫДЕЛЕНИЕМ ЗОН,
ЛИМИТИРУЮЩИХ ЕГО ОКИСЛЕНИЕ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Уфа - 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» на кафедре авиационной теплотехники и теплоэнергетики.

Научный руководитель: Бакиров Фёдор Гайфуллович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Официальные оппоненты:

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

Грасько Тарас Васильевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», заместитель начальника факультета - начальника учебной части 7 факультета летательных аппаратов.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск.

Защита диссертации состоится 23 мая 2025 г. в 10:00 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/resources/dis_protection/kutlumuhamedov.

Автореферат разослан «__» _____ 202_ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.10

Виноградов А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. К авиационным газотурбинным двигателям (ГТД) гражданского назначения и наземным газотурбинным установкам (ГТУ) предъявляются требования по допустимым концентрациям вредных веществ в продуктах сгорания. Эти требования последовательно ужесточаются.

К вредным веществам относят – оксиды азота NO_x , монооксид углерода CO (систематическое наименование – оксид углерода (II)), несгоревшие углеводороды uCH , частицы сажи и др. Количество вредных веществ в продуктах выхлопа, главным образом, определяется рабочим процессом в камере сгорания. Известно, что механизмы образования вредных веществ отличны между собой. Соответственно различаются мероприятия направленные на устранение тех или иных вредных веществ, а также методы оценки их количества в продуктах сгорания.

В настоящей работе разработан метод расчёта выбросов CO из камер сгорания ГТД в рамках развития концепции «комбинированных методов» расчёта вредных выбросов. Комбинируются вычислительная газовая динамика (Computational Fluid Dynamics - CFD) и реакторный метод. При таком подходе реакторная модель камеры сгорания строится на базе результатов трёхмерного моделирования. Это позволяет проводить расчёты с детальной химической кинетикой и более точной оценкой структуры течения (математические модели реакторов относительно просты и позволяют проводить быстрые вычисления с применением детальных «тяжелых» механизмов химической кинетики).

Развитию комбинированных методов и их базовых положений посвящено значительное количество отечественных и зарубежных исследований, приведённых в работах Захарова В.М., Лебедева А.Б., Секундова А.Н., Старика А.М., Кашапова Р.С., Максимова Д.А., Скибы Д.В., Бакирова Ф.Г., Лукачёва С.В., Диденко А.А., Зубрилина И.А., Матвеева С.С., Чечета И.В., Семенихина А.С., Мингазова Б.Г., Цатиашвили В.В., а также Turns S.R., Marchand M.D., Novosselov I.V., Rutar T., Malte P.C., Nicol D.G., Fichet V. и др.

По результатам обзора соответствующей литературы, применительно к задаче оценки уровня выбросов CO , отмечено следующее:

- большинство работ посвящено расчёту выбросов оксидов азота (NO_x);
- необходимо повышение точности расчётов выбросов CO по комбинированному методу;
- существенное влияние на точность оценки выбросов CO оказывает учёт неоднородности состава смеси (неравномерности распределения коэффициента избытка воздуха α);
- требуется формализация процесса построения реакторной модели камеры сгорания по структуре течения, полученной из CFD моделирования.

Работа посвящена оценке выбросов CO из камер сгорания ГТД, работающих на природном газе (метане). Это топливо широко используется в наземных ГТУ, в том числе конвертированных из авиационных двигателей. В качестве авиационного топлива сжиженный природный газ (СПГ) обладает рядом преимуществ, т.к. позволяет снизить количество CO_2 в продуктах сгорания (ввиду меньшего отношения C/H) и обладает большим хладоресурсом (температура ожидения порядка 112 К). Возможность практической реализации применения СПГ в авиации впервые подтверждена лётными испытаниями самолёта Ту-156 с двигателями НК-89.

Таким образом, тема работы актуальна ввиду постоянного ужесточения требований по вредным выбросам и необходимости совершенствования существующих методов расчёта количества монооксида углерода в продуктах сгорания ГТД.

Цель работы: повышение эффективности проектирования камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих на природном газе, при оценке выбросов монооксида углерода за счёт формализованного выделения зон, лимитирующих его окисление.

Задачи работы:

- 1 Исследовать влияние физико-химических факторов на процессы образования и выгорания монооксида углерода.

2 Разработать метод расчёта выбросов СО из камер сгорания ГТД по формализованной реакторной модели с детальной химической кинетикой и схематичным описанием структуры течения, распределения воздуха и неравномерности по коэффициенту избытка воздуха.

3 Разработать критерии формирования реакторной модели камеры сгорания по результатам обработки трёхмерного CFD моделирования.

4 Выполнить апробацию разработанного метода на исходной и конвертированной малоэмиссионной конструкции камеры сгорания с сопоставлением расчётных выбросов СО с результатами лабораторных и натуральных измерений при работе на природном газе.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – процессы образования и выгорания монооксида углерода в камерах сгорания ГТД. Предмет исследования – методы расчёта концентраций монооксида углерода на выходе из камер сгорания ГТД.

Научная новизна

1 Разработан новый метод расчёта выбросов монооксида углерода (СО) из камер 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.

2 Разработан 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.

3 Разработан новый критерий моделирования реакторами зоны пламени, отличающийся выделением высокотемпературной зоны с существенным сдвигом равновесия в сторону монооксида углерода.

4 Представлены новые расчётные зависимости влияния на выбросы СО распределения коэффициента избытка воздуха по длине жаровой трубы конвертированной «богато-бедной» малоэмиссионной камеры сгорания, отличающиеся законом подвода воздуха и режимными параметрами, совместно с данными сравнительного анализа результатов расчётов с экспериментом.

Теоретическая значимость работы. Разработанный метод расчёта позволяет исследовать влияние закона распределения воздуха по жаровой трубе, неоднородности состава горючей смеси, характеристик зон камеры сгорания (зона пламени, смешения, зона обратных токов) на процессы образования вредных веществ, в частности СО, в камерах сгорания ГТД.

Практическая значимость работы заключается в разработанном расчётном методе, позволяющим прогнозировать выбросы СО из камер сгорания ГТД на этапе оптимизации распределения воздуха по длине, что снижает материальные и временные затраты по доводке камеры сгорания.

Результаты исследования нашли практическое применение:

- в ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» в рамках расчётов камеры сгорания наземной энергетической установки ГТЭ-10/953, разработки технического предложения по газотурбинной энергетической установке ГТУ-2У мощностью 2,5 МВт, оценке вредных выбросов при стендовых испытаниях авиационных двигателей, что подтверждается актом внедрения от 08.10.2024;

- в учебном процессе УУНиТ в рамках преподавания дисциплины «Современные проблемы проектирования авиационных двигателей и энергоустановок» специальности 25.05.02 «Проектирование авиационных двигателей» и «Моделирование процессов горения в камерах сгорания ГТД» для направления магистратуры 24.04.05 «Двигатели летательных аппаратов», что подтверждается актом внедрения от 08.10.2024;

- в ООО «НПФ «Теплофизика» в рамках исследования рабочих процессов малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных газоперекачивающих агрегатов ГТК-10ИР, ГТК-25ИР, ДГ-90, что подтверждается актом внедрения от 08.10.2024.

Методы исследования

1 Методы трёхмерного моделирования процессов турбулентного горения в камерах сгорания ГТД средствами вычислительной газовой динамики (CFD) с применением коммерческого программного комплекса ANSYS CFX v.16.1.

2 Кинетическое моделирование камеры сгорания сетью взаимосвязанных реакторов в программном пакете CANTERA 2.4.0.

3 Применение детального механизма химической кинетики окисления метана GRI-Mech 3.0 (53 компонента, 325 реакций) при расчёте реакторных моделей камеры сгорания.

4 Экспериментальное определение выбросов монооксида углерода от камер сгорания ГТД с применением аттестованного оборудования.

Положения, вносимые на защиту

1 Метод расчёта выбросов монооксида углерода (CO) из камер 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.

2 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.

3 Критерий моделирования реакторами зоны пламени, отличающийся выделением высокотемпературной зоны с существенным сдвигом равновесия в сторону монооксида углерода.

4 Расчётные зависимости влияния на выбросы CO распределения коэффициента избытка воздуха по длине жаровой трубы конвертированной «богато-бедной» малоэмиссионной камеры сгорания, отличающиеся законом подвода воздуха и режимными параметрами, совместно с данными сравнительного анализа результатов расчётов с экспериментом.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- применением сертифицированного коммерческого программного продукта ANSYS CFX v.16.1 (вычислительная газовая динамика) и программного пакета CANTERA 2.4.0 (термохимия), верифицированных разработчиками и апробированными исследователями на типовых задачах, характерных для камер сгорания ГТД;

- применением отработанного и широко себя зарекомендовавшего механизма химической кинетики GRI-Mech 3.0, разработанного и оптимизированного для расчётов окисления метана (природного газа);

- применением метрологически аттестованного и поверенного измерительного оборудования;

- высоким уровнем соответствия расчётной и экспериментальной зависимостей выбросов монооксида углерода от режима работы камеры сгорания ($[CO] = f(\alpha)$).

Апробация результатов исследования. Основные результаты работ прорабатывались на конференциях: всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века» (Москва, ЦИАМ, 2015); всероссийской научно-технической конференции «Научно-технические проблемы современного двигателестроения» (Уфа, УГАТУ, 2016 г.); 10-ой, 12-ой, 13-ой всероссийской зимней школе-семинаре аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, УГАТУ, 2017-2020 гг.); международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, Самарский университет, 2018 г.); IX всероссийской научно-технической конференции молодых специалистов (Уфа, ПАО «ОДК-УМПО», 2018 г.); международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, Самарский университет, 2021 г.).

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов по пунктам: п. 4 - Рабочие процессы в электроракетных двигателях,

энергетических установках для преобразования энергии и направленного сброса энергии и их подсистемах, а также в сходных по рабочему процессу устройствах: в генераторах и ускорителях плазмы заряженных частиц, макрочастиц; в энергоизлучающих установках; п. 6 - Методы конструирования тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, их узлов и систем, включая методы автоматизированного проектирования двигателей с помощью ЭВМ; п. 13 - Математическое моделирование рабочих процессов, характеристик, динамических процессов, рабочих состояний двигателей и энергетических установок, стадий и этапов их жизненного цикла (создания, производства, эксплуатации и утилизации); п. 16 - Методы расчётов воздействия тепловых и электроракетных двигателей на окружающую среду и анализ путей его уменьшения; п. 18 - Процессы создания и доводки двигателей летательных аппаратов. Способы улучшения характеристик и основных данных двигателей, находящихся в серийном производстве и эксплуатации; п. 23 - Разработка методов расчёта термогазодинамических и теплофизических процессов в двигателях и энергосиловых установках летательных аппаратов, их элементах.

Публикации. По теме исследований опубликовано 11 статей, в том числе три статьи опубликованы в изданиях, включенных в список ВАК России, и одна статья опубликована в издании, индексируемом в базе данных SCOPUS.

Структура и объём работ. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы на 100 наименований. Текст содержит 150 страниц, 61 иллюстрацию и 16 таблиц.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Бакирову Ф.Г. и к.т.н. Скибе Д.В. за квалифицированные научные консультации и помощь в работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность темы исследования, кратко описана степень её разработанности, отмечены цель и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе раскрывается актуальность проблемы снижения выбросов монооксида углерода (СО) из камер сгорания ГТД.

Обобщены требования отечественных ГОСТов к авиационным и наземным ГТД в части допустимого содержания NOx и СО в продуктах сгорания. Приведены данные по зарубежным экологическим требованиям. Оценено влияние концентрации вредных веществ в продуктах сгорания ГТД на их годовые выбросы в эксплуатации.

Приведены расчёты равновесного содержания СО в продуктах сгорания природного газа (метана) и керосина (для моделирования керосина использован н-декан NC₁₀H₂₂) для нормальных условий и условий, характерных для камер сгорания ГТД. Получено, что при коэффициенте избытка воздуха $\alpha > 2,0$ равновесные значения СО не превышают 100 млн⁻¹, в том числе и при высоком давлении и температуре исходной смеси (5,0 МПа, 1060 К). Отмечено, что на выходе из камер сгорания ГТД количество монооксида углерода всегда превышает равновесные значения из-за неполноты сгорания топлива.

Приведены экспериментальные зависимости влияния различных факторов на образование и выгорание монооксида углерода (состав горючей смеси, температура, давление, время пребывания, теплоотвод). Представлены сведения по кинетике окисления СО.

По результатам расчётов с применением детальной химической кинетики получено, что при температуре исходной метановоздушной смеси $T \leq 1400$ К время задержки воспламенения превышает 1 мс. Соответственно, локальное время пребывания горючей смеси может оказаться недостаточным для завершения процессов горения. Также, по результатам обзора литературы, отмечено, что температуре $T \approx 1400$ К соответствует «бедный» предел распространения пламени.

Отмечено, что при оценке выбросов монооксида углерода необходимо учитывать эффекты термической диссоциации CO₂ в СО в зонах с температурой более 1900 К.

Рассмотрены основные концепции создания малоэмиссионных камер сгорания, описаны сопутствующие трудности в части обеспечения допустимого уровня CO. Отмечено основное противоречие: низкая температура в зоне горения снижает выбросы оксидов азота, но увеличивает выбросы продуктов неполного сгорания и наоборот – высокая температура в зоне горения повышает уровень NOx, но снижает CO и uHC.

Рассмотрены проблемы методов расчёта выбросов вредных веществ из камер сгорания ГТД применительно к задаче оценки уровня выбросов CO.

Метод расчёта по полуэмпирическим зависимостям «завязан» с конструктивными и режимными параметрами камер сгорания, на базе экспериментов которых построены соответствующие зависимости. Выполняются относительно быстрые вычисления без применения сложных программных продуктов. Однако конструктивное разнообразие камер сгорания ограничивает применение полуэмпирических зависимостей.

В CFD прямое применение детальных (многокомпонентных) механизмов химической кинетики требует чрезмерных вычислительных затрат, а математические модели с глобальной (упрощенной) кинетикой или с «разделением химии от газовой динамики» неточно оценивают, соответственно, скорости химических реакций и процессы образования и выгорания монооксида углерода в объеме постпламенной зоны. Отмечается также сложность моделирования турбулентности в камерах сгорания ГТД. Допущение популярных RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) моделей турбулентности типа k-ε, SST (Shear Stress Transport) и др. об изотропной турбулентности несправедливо для моделирования зоны обратных токов (ЗОТ), т.к. границы ЗОТ характерны низкие скорости и высокая вязкость газа (вследствие высокой температуры газа).

В реакторном методе камера сгорания моделируется цепью (сетью) реакторов. Наибольшее распространение получили модели реакторов идеального смешения (PSR – Perfectly Stirred Reactor) и идеального вытеснения (PFR – Plug Flow Reactor). Математические модели реакторов относительно просты и позволяют проводить быстрые вычисления с применением детальных механизмов химической кинетики (с точным расчётом скоростей реакций). Однако структура течения в этих моделях чрезмерно упрощена. Это ограничивает эффективность применения простых реакторных моделей для количественной оценки вредных выбросов на выходе из камер сгорания. В особенности это актуально для CO. На выбросы монооксида углерода влияет неоднородность горючей смеси, а она определяется локальными условиями смешения газов.

Также, оценено влияние степени детализации механизма химической кинетики на количество CO в продуктах сгорания на примере расчёта реактора идеального смешения (рисунок 1).

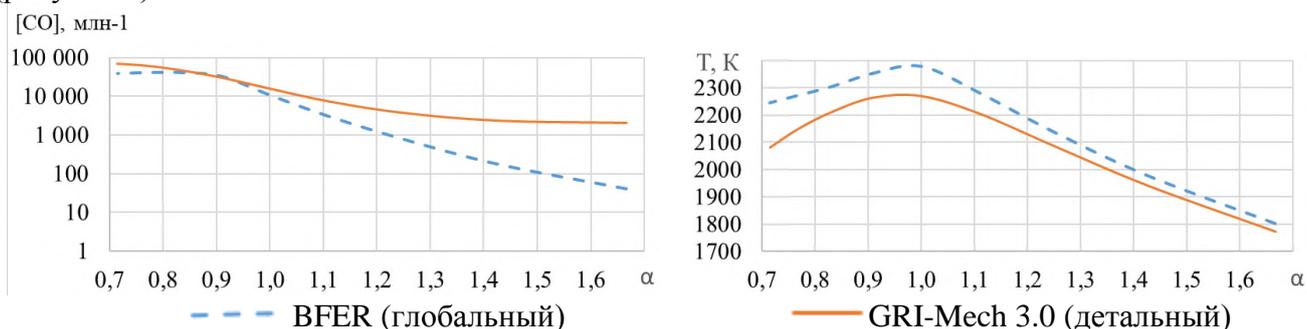


Рисунок 1 - Расчётная зависимость объемной доли CO и температуры на выходе из реактора идеального смешения от состава горючей смеси и механизма химической кинетики (объём реактора $V = 4500 \text{ см}^3$, температура исходной смеси $T_{исх} = 470 \text{ К}$, давление в реакторе $P = 0,4 \text{ МПа}$)

Сравнивался глобальный механизм окисления метана BFER (шесть компонентов, две реакции) и детальный механизм GRI-Mech 3.0 (53 компонента, 325 реакций). Отмечено

существенное влияние механизма на выбросы CO. Например, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 1,6$ расчётный уровень выбросов монооксида углерода отличается на порядок.

Во второй главе отмечено, что в качестве приоритетной выбрана концепция создания комбинированных методов расчёта выбросов вредных веществ из камер сгорания (комбинируются CFD и реакторный метод).

В комбинированных методах реакторная модель камеры сгорания строится на базе результатов трёхмерного CFD моделирования. Это позволяет проводить расчёты с детальной химической кинетикой и более точной оценкой структуры течения (объединение достоинств методов).

Выполнен обзор работ, посвящённых оценке выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД и ГТУ по комбинированному методу. По результатам обзора отмечены следующие основные особенности и недостатки существующих методов.

1 Хорошее согласование расчётных выбросов CO с экспериментом (расхождение менее 25 %) получено для камер сгорания с упрощённой конструкцией (без подвода вторичного воздуха в зону горения). Для экспериментальных моделей, близких по сложности конструкции к камерам сгорания ГТД, согласование расчёта с экспериментом неудовлетворительно, либо представлено сравнение лишь на одном режиме.

2 Рядом авторов отмечено, что для повышения точности расчётной оценки выбросов CO необходимо учитывать неоднородность горючей смеси по составу. Имеются работы, в которых течение на выходе из горелки разделяется на три потока для учёта радиальной неравномерности. Также, многие авторы отдельно моделируют «бедную» низкотемпературную пристеночную зону.

3 Коллектив авторов ЦИАМ выделяет две основные проблемы создания реакторных моделей диффузионных камер сгорания: моделирование зоны пламени и моделирование пристеночной области.

4 Требуется формализация процесса построения реакторной модели камеры сгорания по структуре течения полученной из трёхмерного CFD моделирования. Необходимо сформировать и систематизировать процедуры построения реакторной модели.

5 Количество реакторов варьируется от 4 до 31 при построении реакторной модели на базе структуры потока («вручную») и от нескольких сотен до нескольких тысяч при «автоматическом» построении. Однако увеличение количества реакторов необязательно приводит к повышению точности оценки выбросов CO.

Выполнено расчётное исследование влияния различных факторов на уровень выбросов CO из камер сгорания ГТД. Расчёты выполнены по реакторной модели

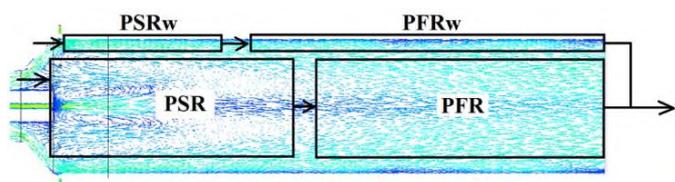


Рисунок 2 - Вектора скоростей и реакторная модель камеры сгорания

малогабаритной камеры сгорания диаметром 19,5 мм и длиной 80 мм, сформированной на базе результатов трёхмерного моделирования. Основной поток моделируется последовательно расположенными реакторами PSR и PFR, пристеночная область также

моделируется реакторами идеального смешения и вытеснения, обозначенными «PSRw» и «PFRw» соответственно (рисунок 2). Выполнено сравнение расчётного и измеренного количества CO на контрольном режиме – различие составило порядка 15 %. Работа выполнена на начальных этапах исследования – расчёты не содержат мероприятий по уточнению влияния неоднородности состава горючей смеси на выбросы CO.

По результатам расчётов построены зависимости влияния состава смеси, температуры воздуха на входе $T_{вх}$, температуры пристеночной области $T_{w.g}$, давления и теплоотвода на выбросы CO из камеры сгорания (рисунок 3).

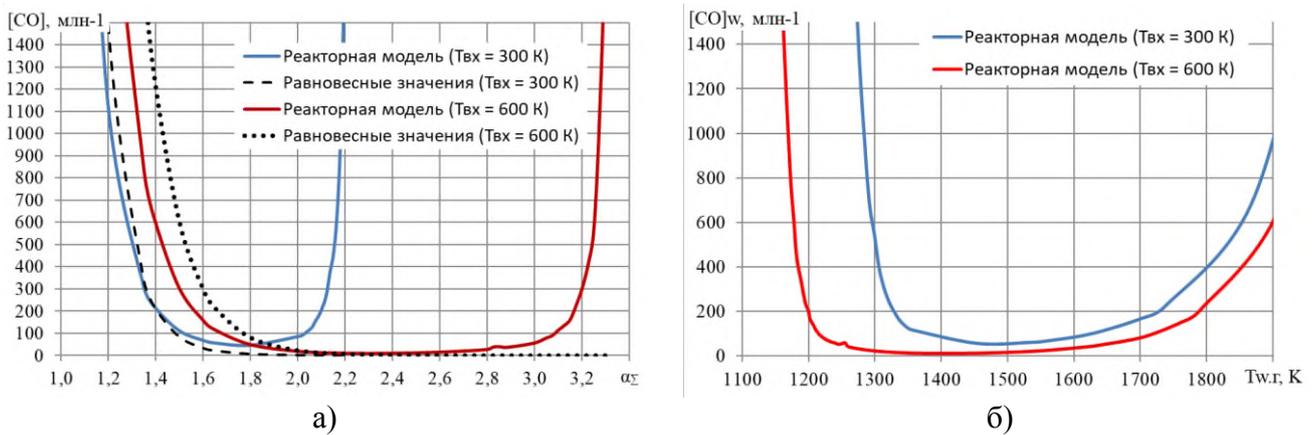


Рисунок 3 – Расчётная зависимость а) выбросов CO на выходе из камеры сгорания от суммарного коэффициента избытка воздуха и температуры воздуха на входе б) выбросов CO в пристеночной области $[CO]_w$ от температуры газа пристеночной области $T_{w.g}$ (давление в камере сгорания $P = 0,1$ МПа, пропан-воздух)

Из рисунка 3, в частности, видно, что при приближении к границе «бедного» срыва пламени резко повышается количество CO в продуктах сгорания. Также увеличение температуры исходной горючей смеси приводит к расширению границ по «бедному» срыву.

В третьей главе описан разработанный метод расчёта выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД с критериями формализованного построения реакторной модели по результатам CFD моделирования.

Сформировано два критерия моделирования реакторами зон с высоким содержанием CO: критерий моделирования неравномерно распределённых низкотемпературных зон и критерий моделирования зоны пламени. Эти зоны лимитируют окисление монооксида углерода.

Низкой температуре $T < 1400$ K соответствует высокое содержание CO в продуктах сгорания метановоздушных смесей ввиду уменьшения скоростей химических реакций и приближения к границе «бедного» срыва. На основании этого, для учёта неравномерности по коэффициенту избытка воздуха и повышения точности расчётов, разработан критерий, согласно которому неравномерно распределённые в рабочем объёме «бедные» зоны объединяются в «бедные» струйки с составом смеси, соответствующим адиабатической температуре продуктов сгорания $T_{adia} = 1450 \pm 50$ K. «Бедные» струйки моделируются отдельными реакторами, именно в них оценивается количество CO, не успевшее окислиться до CO₂. Диапазон по T_{adia} выбран с небольшим запасом для устойчивого розжига горючей смеси в реакторах «бедных» струек.

Для моделирования зоны пламени разработан критерий, согласно которому выделяется зона, в которой существенен сдвиг равновесия в сторону CO (существенна диссоциация продуктов сгорания), чему соответствует температура $T_{adia} > 1900$ K по результатам анализа характеристик пламен в исследованном диапазоне давления 0,5-10,0 МПа.

Ниже приведена блок-схема разработанного метода (рисунок 4) и краткое его описание в виде последовательности действий.

1 Трёхмерное CFD моделирование. Выполняется трёхмерное CFD моделирование камеры сгорания на исследуемом режиме. Применимы стационарные RANS модели турбулентности (SST, k-ε и др.) и экономичные модели горения (например, Eddy Dissipation Model (EDM) с глобальным механизмом химической кинетики, модели семейства Flamelet).

Вычислительные затраты стационарных RANS моделей турбулентности на порядок меньше нестационарных URANS (Unsteady RANS) моделей и в 100-1000 раз меньше по сравнению с LES (Large Eddy Simulation) моделями турбулентности т.к. LES подход требует более детальной дискретизации (меньшие размеры расчётных ячеек и шагов по времени).

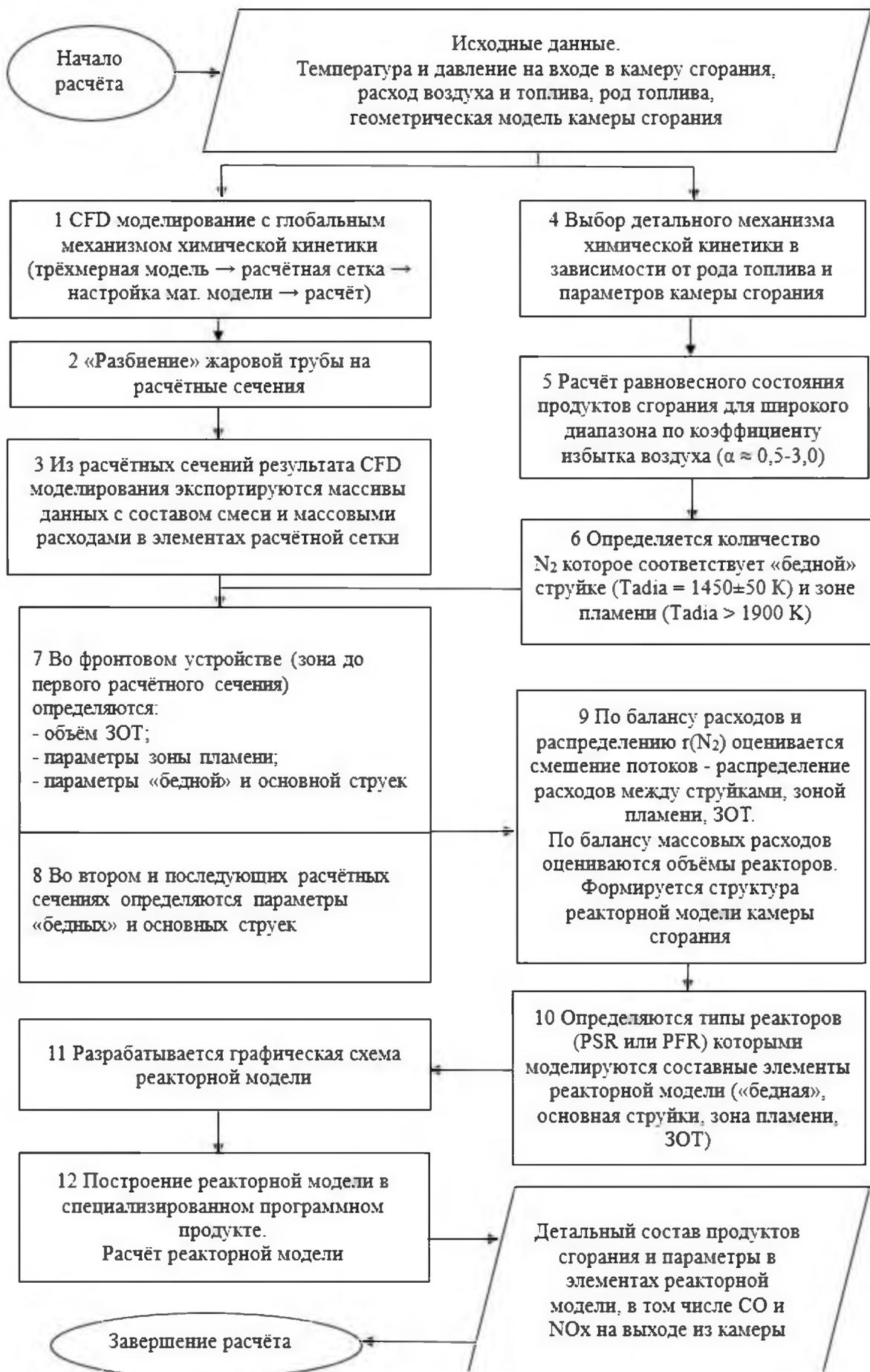


Рисунок 4 – Блок-схема метода расчёта выбросов CO из камер сгорания ГТД

2 «Разбивка» жаровой трубы на расчётные сечения. Жаровая труба «разбивается» на расчётные сечения, исходя из ее конструктивных особенностей и расчётной трёхмерной структуры течения. На базе выбранных расчётных сечений в дальнейшем строится реакторная модель камеры сгорания.

3 Экспорт данных из CFD моделирования. Из расчётных сечений результата CFD моделирования экспортируются массивы данных с составом смеси и массовыми расходами в элементах расчётной сетки.

4 Выбор детального механизма химической кинетики. Для расчёта реакторной модели камеры сгорания требуется детальный механизм химической кинетики окисления топлива. Механизм выбирается в зависимости от рода топлива и рабочего диапазона параметров (давление и температура воздуха на входе в камеру сгорания должны соответствовать этому диапазону).

5 Расчёт равновесного состояния продуктов сгорания. На исследуемом режиме, при заданном давлении и температуре на входе в камеру сгорания, выполняется расчёт равновесного состояния продуктов сгорания для широкого диапазона по коэффициенту избытка воздуха ($\alpha \approx 0,5-3,0$).

6 По результатам расчёта равновесного состояния определяется содержание азота, которое соответствует «бедной» струйке ($T_{adia} = 1450 \pm 50$ К) и зоне пламени ($T_{adia} \geq 1900$ К) согласно внедрённым новым критериям формирования реакторной модели камеры сгорания.

7 Моделирование течения за фронтным устройством. Фронтное устройство моделируется первым расчётным сечением реакторной схемы камеры сгорания (рисунок 5). Первое сечение выбирается таким образом, что пересекает ЗОТ. В постпроцессоре CFD программы в этом сечении строятся две непересекающиеся поверхности. Первая поверхность – кольцевая над ЗОТ. В ней протекают основная, «бедная» струйки и остатки «чистого» воздуха. Вторая поверхность непосредственно пересекает ЗОТ. Её границы несколько превышают границы ЗОТ так, чтобы среднемассовый расход газа был направлен в сторону выхода камеры сгорания. Такой подход позволяет существенно упростить моделирование ЗОТ – ЗОТ моделируется одним реактором идеального смешения с потоком малого расхода (без организации рециркуляции между реакторами).

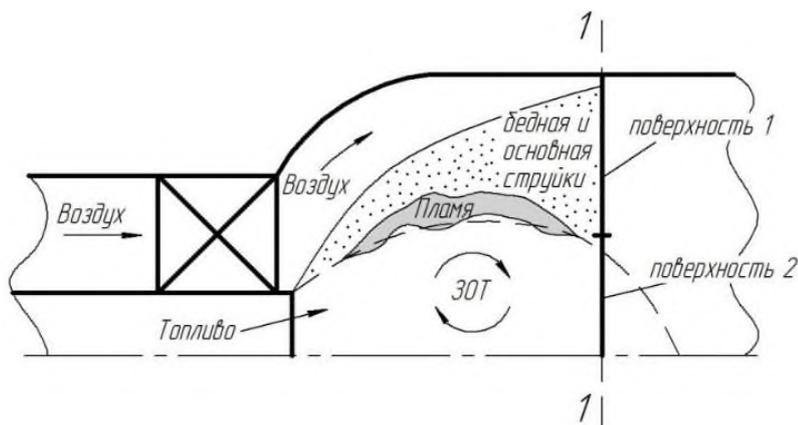


Рисунок 5 – Структура течения фронтного устройства

расположение зоны пламени, её объём и расход газа. Для этого в постпроцессоре CFD программы строится изообъём, в каждой точке которого содержание азота соответствует ранее рассчитанному диапазону объёмной доли азота $\gamma(N_2)$ при $T_{adia} \geq 1900$ К.

Оценка выполняется для зоны от начала фронтного устройства до первого расчётного сечения.

7.3 Выявление «бедной» струйки топливоздушную смеси (ТВС). В предлагаемом методе, в расчётном сечении, «бедные» зоны объединяются в одну «бедную» струйку с составом, соответствующим адиабатической температуре продуктов сгорания $T_{adia} = 1450 \pm 50$ К. Такой подход позволяет более детально учесть наличие «бедных» струек, будь то в пристеночной

Для построения реакторной схемы необходимо оценить объём ЗОТ, параметры «бедной» струйки и зоны пламени.

7.1 Оценка объёма ЗОТ. По результатам CFD моделирования оценивается объём ЗОТ от начала фронтного устройства до первого расчётного сечения (например, по распределению осевой составляющей скорости).

7.2 Оценка объёма и расхода газа в зоне пламени. По результатам CFD моделирования оценивается

области или в следе за струями подвода основного воздуха, и повышает точность оценки выбросов CO.

Процедура выявления «бедной» струйки следующая. Из результата CFD моделирования из расчётных ячеек, пересекающих расчётное сечение, экспортируется массив объёмных долей азота и массовых расходов. Далее этот массив сортируется по убыванию $\Gamma(N_2)$ – от «бедных» струек к более «богатым». Затем, в отсортированном массиве «бедные» струйки объединяются в одну с составом соответствующим $T_{adia} = 1450 \pm 50$ К (осреднённое значение $\Gamma(N_2)$, соответствующее этой температуре, заранее определено по результатам расчёта равновесного состояния продуктов сгорания).

В CFD моделировании с глобальным механизмом химической кинетики азот не участвует в горении и, поэтому, по его содержанию можно оценить состав горючей смеси. Выбор $\Gamma(N_2)$ в качестве параметра, определяющего состав смеси, сокращает объём и погрешность вычислений при обработке результата CFD моделирования.

8 Выявляются «бедные» струйки во втором и последующих расчётных сечениях. «Бедные» струйки во втором и последующих расчётных сечениях выявляются по ранее описанному принципу.

9 Формирование структуры реакторной модели камеры сгорания. На базе данных по распределению расходов воздуха по длине жаровой трубы, расходов в «бедных» струйках формируется структура реакторной модели камеры сгорания. Основным принцип – сохранение баланса расхода при оценке смешения и массообмена между реакторами.

Соотношение объёмов реакторов определяется из соотношения их массовых расходов. При этом суммарный объём реакторной модели соответствует объёму жаровой трубы.

Отметим, что после подвода определённого количества воздуха в жаровую трубу «бедная» струйка вырождается – весь поток становится «бедным».

10 Определение типа реакторов. Зоны с интенсивным смешением и большими градиентами скоростей моделируются реактором идеального смешения PSR – зона пламени, ЗОТ, зона подвода основного воздуха. Зоны с более равнонаправленным течением моделируются реактором идеального вытеснения PFR – газосборник камеры сгорания, секции без отверстий подвода основного воздуха.

11 Разрабатывается графическая схема реакторной модели камеры сгорания с выделением зоны пламени и «бедных» струек.

12 Расчёт реакторной модели. Построение и расчёт реакторной модели выполняют в специализированных программных продуктах типа Chemkin-PRO, CANTERA, Kintech Chemical Workbench и др.

По результатам расчёта реакторной модели определяется количество CO на выходе из исследуемой камеры сгорания.

Четвёртая глава посвящена апробации разработанного метода.

Апробация метода выполнена применительно к камере сгорания наземной газотурбинной энергетической установки ГТЭ-10/953, созданной на базе высоконадёжного авиационного двигателя типа Р-95Ш. Работы по конвертированию камеры сгорания с жидкого топлива на

природный газ выполнены в ОКБ «Мотор» в 2000-2001 гг. под руководством к.т.н. Гребенюка Г.П.

Доводка конвертированной камеры сгорания выполнена на одnogорелочном отсеке на стенде горячих продувок ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» с подтверждением экологических характеристик на стендовой базе АО «ОДК-Авиадвигатель» испытаниями



Рисунок 6 – Жаровая труба камеры сгорания ГТЭ-10/953 с термоиндикаторной краской после испытаний

с электроподогревом воздуха (рисунок 6). Измерение концентраций вредных веществ продуктов сгорания выполнялось с помощью газоанализаторов IMR 3010P и Testo 350.

Трёхмерное CFD моделирование однокорпусного отсека выполнено в программном комплексе ANSYS CFX v.16.1. Модель турбулентности – SST, модель горения – EDM с глобальным двухшаговым механизмом химической кинетики окисления метана.

Разработанная по предлагаемому методу реакторная модель камеры сгорания приведена на рисунке 7. На схеме реакторы идеального смешения PSR обозначены окружностями, реакторы идеального вытеснения PFR прямоугольниками. Маркировки В и Т соответствуют подводам воздуха и топлива, ПЛ – зона пламени (зона пламени условно разделена на три зоны), БД – «бедная» струйка, ОСН – основной поток, ЗОТ – зона обратных токов, ГС – газосборник. В маркировках реакторов после точки указывается порядковый номер по принадлежности к фронтальному устройству – римские цифры, либо по принадлежности к секциям жаровой трубы – арабские цифры.

Результаты расчёта реакторной модели на режиме $\alpha=5,5$ (параметры потока на входе в камеру сгорания: полная температура $T^*_{к}=453$ К, полное давление $P^*_{к}=0,375$ МПа, коэффициент приведенной скорости $\lambda_{к}=0,45$) представлены в таблице 1, при этом:

- время пребывания горючей смеси τ рассчитано по плотности горячих продуктов сгорания;
- для реакторов типа PFR параметры [CO], [NOx] и T указаны на выходе из реактора;
- $g(i)$ - массовая доля i -го реактора относительно расхода на выходе;
- представлены результаты для «влажных» продуктов сгорания без приведения количества CO и NOx к стандартным 15 % O₂.

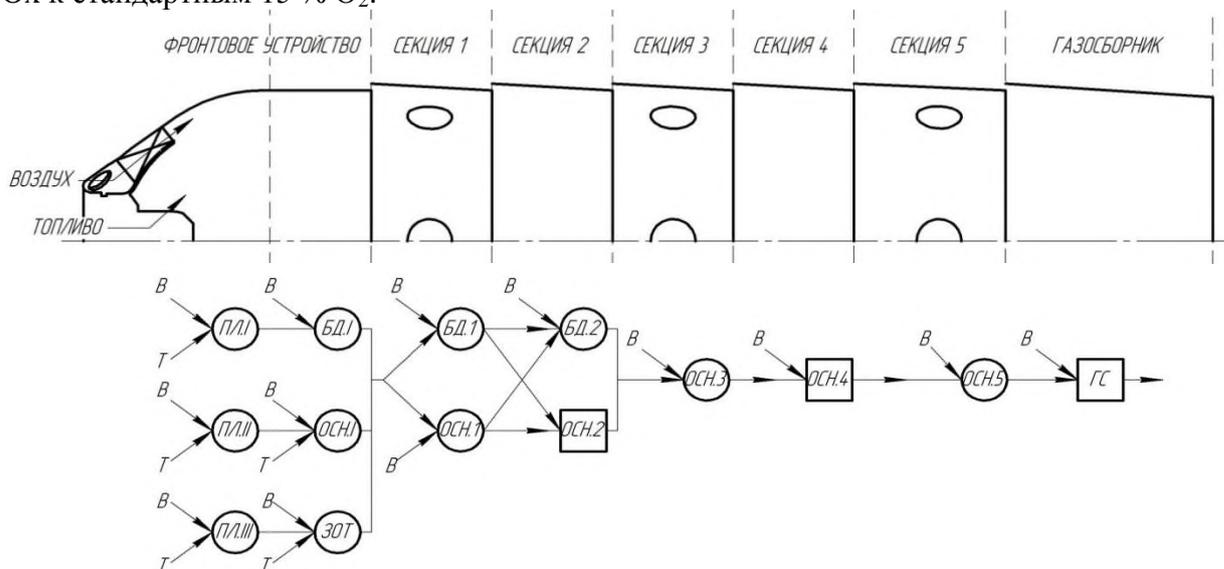


Рисунок 7 - Расчётные сечения и реакторная модель исследуемой камеры сгорания ($\alpha = 3,9-5,5$)

Таблица 1 - Результаты расчёта реакторной модели (режим $\alpha = 5,5$)

Зона	Реактор	[CO], млн ⁻¹	[NOx], млн ⁻¹	α	T, К	τ , мс	$g(i)$
фронтное устройство	ПЛ.1	42839	394	0,85	2191	1,1	0,008
	БД.1	2726	164	2,35	1425	1,36	0,022
	ПЛ.2	43218	393	0,85	2190	1,1	0,019
	ОСН.1	46637	381	0,83	2182	0,83	0,052
	ПЛ.3	43356	392	0,85	2189	1,1	0,006
	ЗОТ	12950	65	0,07	-	12,8	0,015
секция 1	БД.1	12583	67	2,13	1399	0,79	0,204
	ОСН.1	57147	80	0,55	1811	0,56	0,059
секция 2	БД.2	3593	65	2,27	1448	0,82	0,108
	ОСН.2	1539	151	1,17	2175	0,48	0,164
секция 3	ОСН.3	757	64	2,79	1306	0,45	0,513
секция 4	ОСН.4	552	61	2,89	1283	0,44	0,531
секция 5	ОСН.5	321	37	4,87	976	0,44	0,887
газосборник	ГС	279	33	5,50	921	1,02	1,000

Расчёты реакторных моделей выполнены в программном продукте CANTERA 2.4.0 с применением детального механизма химической кинетики окисления метана GRI-Mech 3.0 (53 компонента и 325 реакций).

По результатам расчётов видно, что основным источником CO, в зонах близких к завершению горения, являются «бедные» струйки ТВС.

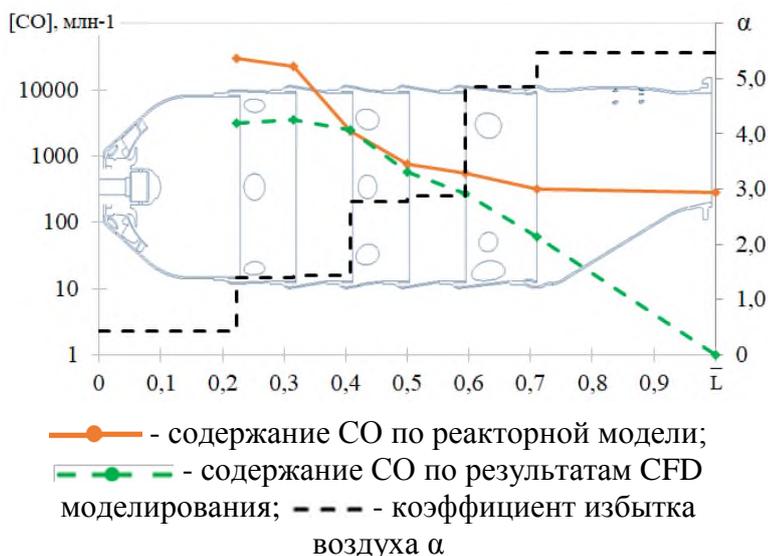


Рисунок 8 – Содержание CO в продуктах сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха по длине жаровой трубы (режим $\alpha = 5,5$)

Расчётная зависимость выбросов CO от коэффициента избытка воздуха по длине жаровой трубы, полученная по реакторной модели с детальной химической кинетикой и CFD моделированию с глобальной кинетикой, для режима $\alpha = 5,5$ приведена на рисунке 8. Отмечено, что CFD моделирование спрогнозировало заниженный уровень монооксида углерода.

Расчётная зависимость выбросов CO от α , полученная по разработанному методу, согласуется с экспериментальной (рисунок 9). Например, по результатам измерений и расчётов получено, что выбросы CO из исследуемой камеры сгорания превышают 300 мг/м^3 (ограничение по ГОСТ 28775) на режимах при

$\alpha \approx 4,4$ и более. При сопоставлении расчётов с экспериментом непосредственно в точках измерений различие составило в среднем 13,1 % в диапазоне по составу смеси $\alpha=2,7-5,5$ (экспериментальная точка на режиме $\alpha \approx 4,8$ принята выпавшей). Таким образом, получено хорошее соответствие расчётных и экспериментальных выбросов CO.

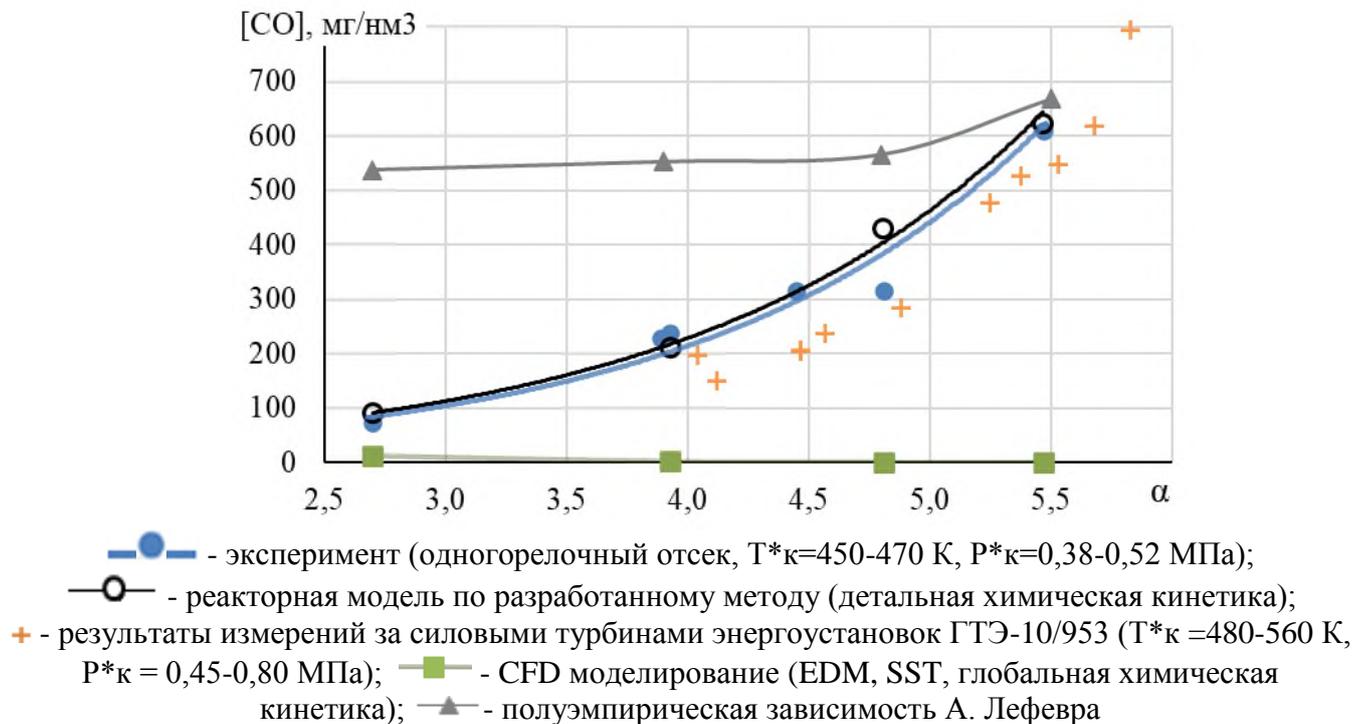


Рисунок 9 - Экспериментальная и расчётная зависимости выбросов CO от суммарного коэффициента избытка воздуха камеры сгорания (при 15 % O_2 в «сухих» продуктах сгорания)

Из рисунка 9 также видно, что расчётные выбросы CO полученные по CFD с моделью горения EDM не согласуются с экспериментом, что объясняется применением упрощенного глобального механизма химической кинетики. Полуэмпирическая модель А. Лефевра позволила корректно оценить максимальный уровень выбросов CO на режиме $\alpha \approx 5,5$, однако при $\alpha < 5,0$ расчётные выбросы CO существенно расходятся с экспериментом.

Дополнительно, на рисунке 9, приведены результаты измерений выбросов CO за силовыми турбинами энергетических установок ГТЭ-10/953 при эксплуатации. Количество CO отличается от измеренных на одnogорелочном отсеке, что вызвано ограничением по максимальной температуре подогрева воздуха на стенде испытаний камер сгорания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решена актуальная научная задача по повышению эффективности проектирования камер сгорания ГТД, работающих на природном газе, за счёт улучшения точности расчёта выбросов монооксида углерода (CO) по реакторной модели камеры сгорания, построенной на базе результатов трёхмерного моделирования с применением экономичных, с позиции вычислительных затрат, моделей горения и турбулентности.

В процессе работы получены следующие результаты:

1 Разработан новый метод расчёта выбросов монооксида углерода (CO) с формализованным выделением зон, лимитирующих его окисление в камерах сгорания ГТД, применение которого в среднем уменьшает погрешность прогнозирования зависимости выбросов CO от коэффициента избытка воздуха с 40-100 % до 13 % при применении RANS моделей турбулентности, которые на порядок экономичнее нестационарных URANS (Unsteady RANS) моделей и в 100-1000 раз экономичнее LES (Large Eddy Simulation) моделей турбулентности.

2 Разработан критерий формирования реакторной модели камеры сгорания, отличающийся обобщением «бедных» зон, неравномерно распределённых в рабочем объёме, в «бедные» струйки с составом смеси с адиабатической температурой $T_{adia} = 1450 \pm 50$ К. Критерий разработан на основании расчётов характеристик пламён с детальной химической кинетикой и данных из литературы, согласно которым высокое содержание CO в продуктах сгорания метано-воздушных смесей соответствует температуре менее 1400 К.

3 Разработан критерий моделирования реакторами зоны пламени, отличающийся выделением зоны с температурой $T_{adia} > 1900$ К. По результатам анализа характеристик пламён получено, что при достижении температуры 1900 К и более существенен сдвиг равновесия в сторону CO (существенна диссоциация CO₂ в CO) в исследованном диапазоне давления 0,5-10,0 МПа.

4 Выполнена апробация разработанного метода на примере расчёта выбросов CO из одnogорелочного отсека «богато-бедной» малоэмиссионной камеры сгорания наземной газотурбинной энергоустановки ГТЭ-10/953, конвертированной из авиационного двигателя типа P-95III. Расчётная зависимость выбросов CO от коэффициента избытка воздуха согласуется с экспериментальной и позволяет определить режим, на котором выбросы CO начинают превышать заданные ограничения. При сопоставлении расчётов с экспериментом непосредственно в точках измерений различие составило в среднем 13,1 %.

Расчёты реакторных моделей камеры сгорания выполнены с применением детального механизма химической кинетики окисления природного газа GRI-Mech 3.0 (53 компонента и 325 реакций) в некоммерческом программном продукте CANTERA с открытым исходным кодом (независимый от импорта программный продукт) для чего был разработан специальный программный код и отработана соответствующая вычислительная технология.

Материалы исследования применялись в ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» при расчётных исследованиях камеры сгорания ГТЭ-10/953 и разработке технического предложения для газотурбинной энергетической установки ГТУ-2У, а также в ООО «НПФ «Теплофизика» при

исследовании рабочих процессов малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных газоперекачивающих агрегатов ГТК-10ИР, ГТК-25ИР и ДГ-90.

Перспектива дальнейшего развития работы состоит в апробации и адаптации метода для расчёта камер сгорания авиационных и наземных ГТД при работе на различного рода топливах (синтез-газ, дизельное топливо и др.).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Кутлумухамедов, А. Р. Расчетное исследование влияния отдельных факторов на уровень выбросов монооксида углерода с помощью реакторной модели малоэмиссионной камеры сгорания / А. Р. Кутлумухамедов, Д. В. Скиба, Ф. Г. Бакиров // Вестник УГАТУ. – 2019. – Т. 23, № 4 (86). – С. 84-92.

2. Кутлумухамедов, А. Р. Обзор работ, посвященных оценке выбросов монооксида углерода из камер сгорания газотурбинных двигателей по реакторной модели, разработанной на базе результатов трехмерного моделирования / А. Р. Кутлумухамедов, Д. В. Скиба, Ф. Г. Бакиров // Вестник УГАТУ. – 2022. – Т.26, № 1 (95). – С. 69-80.

3. Апробация методики расчета выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД по реакторной модели с отслеживанием «бедных» струек топливоздушной смеси / А.Р. Кутлумухамедов, Д.В. Скиба, Г.П. Гребенюк, Ф.Г. Бакиров // Вестник УГАТУ. – 2022. – Т. 26, № 2 (96). – С. 82-92.

Статья, опубликованная в издании, индексируемом в базе SCOPUS

4. Kutlumukhamedov, A. R. Combined Method for Prediction of Carbon Monoxide Emission from Gas Turbine Combustion Chambers / A. R. Kutlumukhamedov, D. V. Skiba, F. G. Bakirov. – DOI 10.1109/EC52789.2021.10016861 // 2021 International Scientific and Technical Engineering Conference (EC). – IEEE, 2023. – P.1-4.

Статьи в сборниках научных трудов, материалов конференций

5. Кутлумухамедов, А.Р. Опыт эволюционной доводки авиационной камеры сгорания, предназначенной для работы в составе наземной энергетической установки / А.Р. Кутлумухамедов, Д.В. Морозов, Н.И. Фокин // Авиадвигатели XXI века: материалы всероссийской науч.-техн. конф. – Москва: ЦИАМ, 2015. – С. 450-452.

6. Кутлумухамедов, А.Р. Некоторые проблемы снижения выбросов монооксида углерода в малоэмиссионных камерах сгорания с предварительным смешением топлива / А. Р. Кутлумухамедов, Д. В. Скиба, Ф. Г. Бакиров // Науч.-техн. проблемы современного двигателестроения: материалы Всероссийской науч.-техн. конф. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2016 – С. 243-246.

7. Кутлумухамедов, А.Р. Трудности численного моделирования процессов горения в пристеночной области камер сгорания / А. Р. Кутлумухамедов, Д. В. Скиба, Ф. Г. Бакиров // Актуальные проблемы науки и техники: материалы X Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых: том 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2017 – С. 123-126.

8. Кутлумухамедов, А.Р. Расчетная оценка концентраций монооксида углерода на выходе из малоэмиссионной камеры сгорания с помощью комбинированного метода / А. Р. Кутлумухамедов, Д. В. Скиба, Ф. Г. Бакиров // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. – Самара: Самарский университет, 2018 – С. 87-88.

9. Кутлумухамедов, А.Р. Апробация комбинированного метода расчета концентраций монооксида углерода на выходе из камер сгорания ГТД / А. Р. Кутлумухамедов, Д. В. Скиба, Ф. Г. Бакиров // Молодежный Вестник УГАТУ. – 2019. – № 2 (21). – С. 72-75.

10. Кутлумухамедов, А.Р. Разработка реакторной модели камеры сгорания с отслеживанием «бедной» струйки топливоздушной смеси для расчета выбросов монооксида углерода / А. Р. Кутлумухамедов, Д. В. Скиба, Ф. Г. Бакиров // Молодежный Вестник УГАТУ. – 2020. – № 2 (23). – С. 72-75.

11. Кутлумухамедов, А.Р. Комбинированный метод расчета выбросов монооксида углерода из камер сгорания газотурбинных двигателей / А. Р. Кутлумухамедов, Д. В. Скиба, Ф. Г. Бакиров // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. Т.2. - Самара: Самарский университет, 2021 – С. 132-133.