

УДК 621.45.022.5
Код ГРНТИ 55.42.42

doi: 10.54708/19926502_2026_30311335

Разработка реакторной модели камеры сгорания ГТД с формализованным выделением зон, лимитирующих окисление монооксида углерода

А.Р. Кутлумухамедов^{1*}, Д.В. Скиба^{2,3}, Ф.Г. Бакиров³

¹ПАО «ОДК-УМПО» ОКБ «Мотор», г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

²ООО «НПФ «Теплофизика», г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

³ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация. Описана последовательность построения, по результатам трехмерного моделирования, реакторной модели камеры сгорания газотурбинного двигателя (ГТД) с формализованным выделением зон, лимитирующих окисление монооксида углерода. Приведены реакторная модель и результаты расчета камеры сгорания наземной энергоустановки ГТЭ-10/953 в компоновках до и после доводки по конвертированию с авиационного керосина на природный газ. Различие между расчетными и экспериментальными значениями выбросов монооксида углерода (CO) составило в среднем 13%.

Ключевые слова: камера сгорания, вредные выбросы, монооксид углерода, трехмерное моделирование, формализованная реакторная модель, критерий моделирования, низкотемпературная зона, зона пламени.

*kutlumuhamedovar@umpo.ru

Введение

Актуальна задача развития методов расчетной оценки эмиссионных характеристик камер сгорания ГТД. Как к авиационным двигателям, так и к ГТД наземного назначения предъявляются все более жесткие требования по допустимым выбросам вредных веществ (оксидов азота NO_x, монооксида углерода CO и др.).

Определенный успех приобрели комбинированные методы расчетной оценки, в которых реакторная модель камеры сгорания строится по результатам трехмерного моделирования [1–5]. Такой подход позволяет проводить быстрые вычисления с применением детальной химической кинетики и наиболее точной оценкой скоростей химических реакций (ввиду того, что математические модели реакторов относительно просты). Однако процесс построения реакторных моделей требует постоянного развития формализованных методов обработки результатов трехмерного моделирования, направленных на снижение временных затрат и повышение точности расчетов.

В настоящей работе описаны критерии и последовательность формализованного построения реакторной модели камеры сгорания ГТД по результатам трехмерного моделирования. Реакторная модель предназначена для расчета выбросов монооксида углерода (CO) при сжигании природного газа.

В работе приведены результаты расчета камеры сгорания наземной энергоустановки ГТЭ-10/953, разработанной в ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» и конвертированной из авиационного двигателя типа Р-95Ш. Представлены реакторные модели до и после доводки камеры сгорания для работы на природном газе.

Детальные и глобальные механизмы химической кинетики

При расчете выбросов вредных веществ из камер сгорания ГТД необходимо использовать детальные (многокомпонентные) механизмы химической кинетики, наиболее точно оценивающие скорость реакций. Применение же глобальной (упрощенной) химической кинетики может привести к существенным неточностям.

Так, на примере расчета выбросов CO из реактора идеального смешения, получено, что выбросы монооксида могут отличаться на порядок при сравнении детального и глобального механизмов химической кинетики (Рис. 1). Сравнивались детальный механизм GRI-Mech 3.0 (53 компонента, 325 реакций) [6] и глобальный механизм BFER (6 компонентов, 2 реакции) [7] окисления метана.

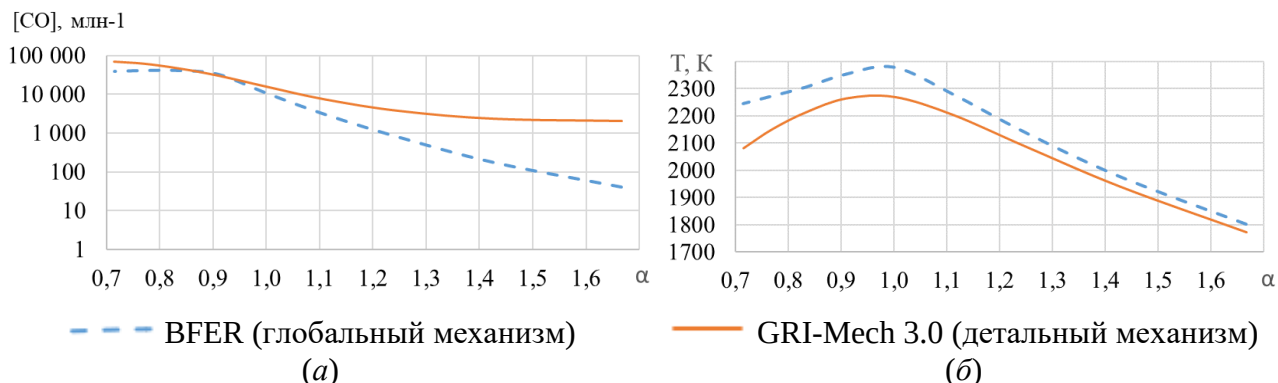


Рисунок 1. Расчетная зависимость параметров реактора идеального смешения от состава горючей смеси и механизма химической кинетики (объем реактора $V = 4500 \text{ см}^3$, температура исходной смеси $T_{исх} = 470 \text{ К}$, давление в реакторе $p = 0,4 \text{ МПа}$): (а) выбросы монооксида углерода CO; (б) температура на выходе из реактора.

В вычислительной газовой динамике (CFD – Computational Fluid Dynamics) прямое применение детальных механизмов химической кинетики требует чрезмерных вычислительных затрат, а математические модели с глобальной кинетикой или с «разделением химии и газовой динамики» неточно оценивают соответственно скорости химических реакций и процессы образования и выгорания монооксида углерода в объеме постпламенной зоны.

В связи с этим развитие получили комбинированные методы расчета выбросов вредных веществ из камер сгорания ГТД, в которых реакторная модель камеры сгорания строится по результатам трехмерного CFD моделирования и учитывает основные особенности течения рабочего тела. Математические модели реакторов относительно просты и позволяют проводить быстрые вычисления с применением детальной химической кинетики.

Критерии формирования реакторной модели камеры сгорания для оценки выбросов монооксида углерода

Процесс построения реакторных моделей камер сгорания ГТД для оценки вредных выбросов требует постоянного развития формализованных методов обработки результатов трехмерного моделирования, направленных на снижение временных затрат и повышение точности расчетов.

Условно можно выделить два направления построения реакторных моделей камер сгорания по результатам трехмерного моделирования: построение по структуре течения («ручной способ») и автоматическое построение с объединением объемов соседних расчетных ячеек в реакторы по заданным критериям селекции.

При построении по структуре течения в реакторной модели камеры сгорания, как правило, выделяют зону пламени, основной поток, зону обратных токов, низкотемпературную пристеночную зону и постпламенную зону. Такие реакторные модели относительно просты и состоят из небольшого количества элементов (примерно до 30 реакторов [3]). К основному недостатку такого построения реакторной модели, применительно к задаче оценки выбросов CO, можно отнести отсутствие учета локальных низкотемпературных «бедных» зон, неравномерно распределенных в рабочем объеме жаровой трубы камеры сгорания (например, в «ядре» потока в следе за струями подвода основного воздуха). В обзоре [3] отмечается, что для исключения этого недостатка рядом авторов выполнена дополнительная детализация модели с радиальным и окружным разделением потоков для учета неравномерности по составу и температуре смеси. Однако это мероприятие не в полной мере позволяет повысить

точность расчетов, и различие с экспериментом составляет порядка 40–100% применительно к моделям «реальных» камер сгорания ГТД со сложной конструкцией.

При автоматическом построении реакторных моделей объемы соседних расчетных ячеек CFD результата объединяются в реакторы в зависимости от заданных интервалов параметров, как правило температуры и состава смеси (ячейки с параметрами газа в заданном интервале объединяются в один реактор). Выбор параметра и значений интервалов селекции расчетных ячеек во многом определяет точность реакторной модели и требует обоснования на базе исследований процессов образования и выгорания вредных веществ. При этом простое уменьшение интервалов и соответствующая детализация реакторной модели с увеличением количества элементов и усложнением их взаимосвязей не обязательно приводят к повышению точности расчетов [3, 8]. Применительно к оценке выбросов СО можно предположить, что увеличение количества реакторов непосредственно на границе «бедного» срыва пламени уменьшает точность расчетов ввиду некорректной оценки розжига/нерозжига смеси в этих реакторах.

Для повышения точности разработан метод расчета выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД с критериями формализованного построения реакторной модели по результатам трехмерного CFD моделирования [9]. Сформированы два критерия моделирования реакторами зон с высоким содержанием СО: критерий моделирования неравномерно распределенных низкотемпературных зон и критерий моделирования зоны пламени. Эти зоны лимитируют окисление монооксида углерода.

Для формирования критерия моделирования реакторами низкотемпературных «бедных» зон необходимо определить граничное значение температуры, которой соответствует высокое содержание СО в продуктах сгорания ввиду относительно низких температур и недостаточной скорости окисления.

В работе [10] А. Лефевр отмечает, что «бедный» предел распространения метановоздушного пламени соответствует минимальной температуре, равной примерно 1400 К. Известно, что границе «бедного» срыва пламени соответствует высокое содержание продуктов неполного сгорания топлива, в том числе монооксида углерода СО [1, 11].

Также, в работе [10] отмечено, что дефлаграционное горение требует менее 1 мс для завершения на 80%. Соответственно, если время задержки воспламенения τ превышает 1 мс, то локальное время пребывания горючей смеси может оказаться недостаточным для завершения процессов горения. По результатам расчета воспламенения метановоздушной смеси с применением детальной химической кинетики видно, что этому условию соответствует температура $T < 1400$ К (Рис. 2).

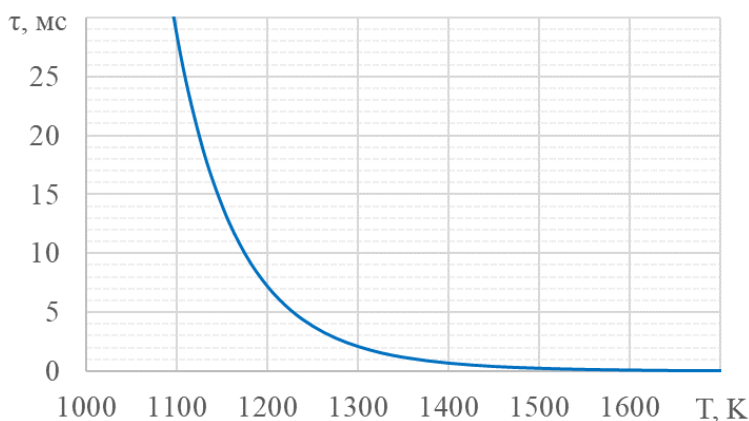


Рисунок 2. Зависимость времени воспламенения метановоздушной смеси от исходной температуры (давление $p = 0,5$ МПа, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,0$, механизм химической кинетики GRI-Mech 3.0).

На основании вышеизложенного, для учета неравномерности по коэффициенту избытка воздуха и повышения точности расчетов разработан критерий, согласно которому

неравномерно распределенные в рабочем объеме «бедные» зоны объединяются в «бедные» струйки с составом смеси, соответствующим адиабатической температуре продуктов сгорания $T_{adia} = 1450 \pm 50$ К. «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 $T_{adia} > 1900$ К. По результатам анализа характеристик пламен, приведенных в работе [12], 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. В работах [13, 14] также отмечается существенное влияние термической диссоциации в основных камерах сгорания при $T^*_r \geq 1900$ К (снижение температуры достигает 20–50 К).

Ход построения реакторной модели камеры сгорания по разработанному методу

Ниже приведена блок-схема разработанного метода (Рис. 3) и краткое его описание в виде последовательности действий.

1. Трехмерное CFD моделирование. Выполняется трехмерное CFD моделирование камеры сгорания на исследуемом режиме. Применимы стационарные RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) модели турбулентности (Shear Stress Transport (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 расчетных ячеек и шагов по времени).

2. «Разбивка» жаровой трубы на расчетные сечения. Жаровая труба «разбивается» на расчетные сечения исходя из ее конструктивных особенностей и расчетной трехмерной структуры течения. На базе выбранных расчетных сечений в дальнейшем строится реакторная модель камеры сгорания.

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

4. Выбор детального механизма химической кинетики. Для расчета 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. Расчет равновесного состояния продуктов сгорания. На исследуемом режиме, при заданном давлении и температуре на входе в камеру сгорания, выполняется расчет равновесного состояния продуктов сгорания для широкого диапазона по коэффициенту избытка воздуха ($\alpha \approx 0,5–3,0$).

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

7. Моделирование течения за фронтовым устройством. Фронтовое устройство моделируется первым расчетным сечением реакторной схемы камеры сгорания (Рис. 4). Первое сечение выбирается таким образом, что пересекает зону обратных токов (ЗОТ). В постпроцессоре CFD программы в этом сечении строятся две непересекающиеся поверхности. Первая поверхность – кольцевая над ЗОТ. Здесь проходят основная, «бедная» струйки и остатки «чистого» воздуха. Вторая поверхность непосредственно пересекает ЗОТ. Ее границы несколько превышают границы ЗОТ так, чтобы среднемассовый расход газа был направлен в сторону выхода камеры сгорания. Такой подход позволяет существенно упростить

моделирование ЗОТ – она моделируется одним реактором идеального смешения с потоком малого расхода (без организации рециркуляции между реакторами).

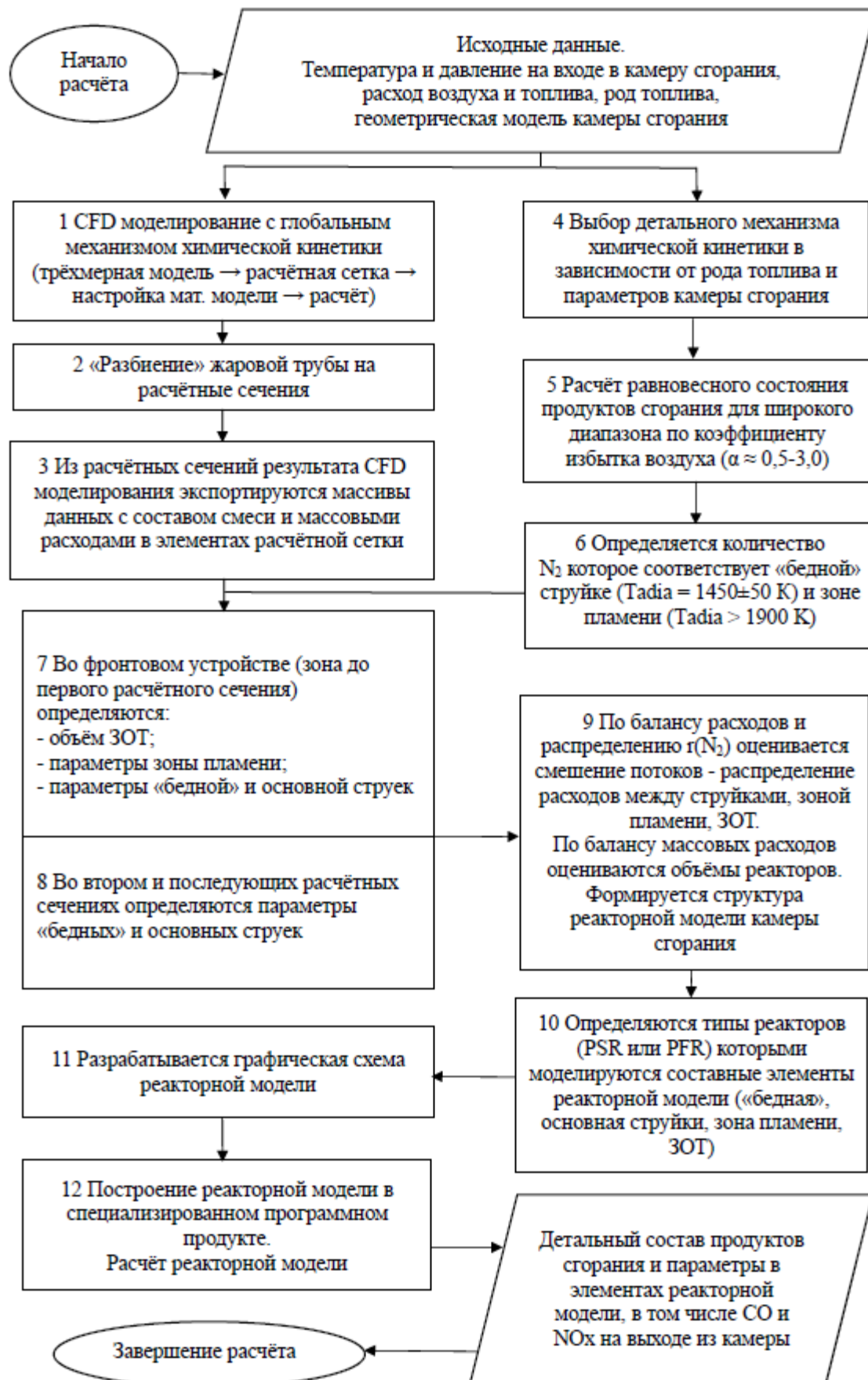


Рисунок 3. Блок-схема метода расчета выбросов СО из камер сгорания ГТД.

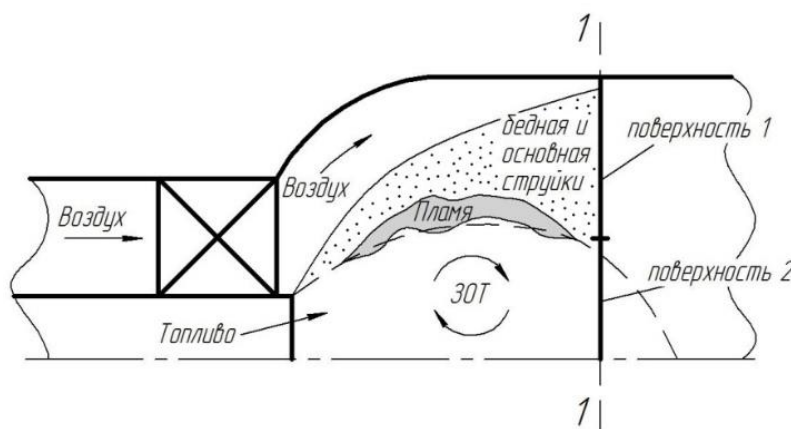


Рисунок 4. Структура течения фронтального устройства.

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

7.1. Оценка объема ЗОТ. По результатам CFD моделирования оценивается объем ЗОТ от начала фронтального устройства до первого расчетного сечения (например, по распределению осевой составляющей скорости).

7.2. Оценка объема и расхода газа в зоне пламени. По результатам CFD моделирования оценивается расположение зоны пламени, ее объем и расход газа. Для этого в постпроцессоре CFD программы строится изообъем, в каждой точке которого содержание азота соответствует ранее рассчитанному диапазону объемной доли азота $r(N_2)$ при $T_{adia} \geq 1900$ К.

Оценка выполняется для зоны от начала фронтального устройства до первого расчетного сечения.

7.3. Выявление «бедной» струйки топливовоздушной смеси (ТВС). В предлагаемом методе в расчетном 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 области или в следе за струями подвода основного воздуха, и повышает точность оценки выбросов СО.

Процедура выявления «бедной» струйки следующая. Из результата CFD моделирования из расчетных ячеек, пересекающих расчетное сечение, экспортируется массив объемных долей азота и массовых расходов. Далее этот массив сортируется по убыванию $r(N_2)$ – от «бедных» струек к более «богатым». Затем в отсортированном массиве «бедные» струйки объединяются в одну с составом, соответствующим $T_{adia} = 1450 \pm 50$ К. Осредненное значение $r(N_2)$, соответствующее этой температуре, заранее определено по результатам расчета 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 $r(N_2)$ в качестве параметра, определяющего состав смеси, сокращает объем и погрешность вычислений при обработке результата CFD моделирования.

8. Выявляются «бедные» струйки во втором и последующих расчетных сечениях. «Бедные» струйки во втором и последующих расчетных 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. Основной принцип – сохранение баланса расхода при оценке смешения и массообмена между реакторами.

Соотношение объемов реакторов определяется из соотношения их массовых расходов. При этом суммарный объем реакторной модели соответствует объему жаровой трубы.

Отметим, что после подвода определенного 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 Расчет реакторной модели. Построение и расчет реакторной модели выполняют в специализированных программных продуктах типа Chemkin-PRO, CANTERA, Kintech Chemical Workbench и др.

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

Реакторная модель камеры сгорания газотурбинной энергоустановки ГТЭ-10/953

По разработанному методу сформированы реакторные модели камеры сгорания газотурбинной энергетической установки ГТЭ-10/953 номинальной мощностью 8 МВт, созданной в ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» на базе высоконадежного авиационного двигателя типа Р-95Ш. Рассчитаны исходная компоновка камеры сгорания и компоновка по результатам доводки по конвертированию с авиационного керосина на природный газ.

Трехмерное CFD моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS CFX v.16.1 в ПАО «ОДК-УМПО». Модель турбулентности – SST (Shear Stress Transport). Модель лучистого теплообмена – Discrete Transfer, спектральная модель – Weighted Sum of Gray Gases. Горение моделировалось с помощью модели EDM (Eddy Dissipation Model) и глобального двухшагового механизма химической кинетики окисления метана [15]. Тетраэдрическая расчетная сетка построена в ANSYS Meshing и состоит из 13,5 млн элементов.

В исходной компоновке распределение воздуха по длине жаровой трубы соответствует серийной камере сгорания, керосиновая форсунка заменена на газовую. Расчетное распределение температуры приведено на Рис. 5, сформированная реакторная модель камеры сгорания приведена на Рис. 6. Расчеты выполнены на режиме $\alpha_{\text{КС}} = 3,9$.

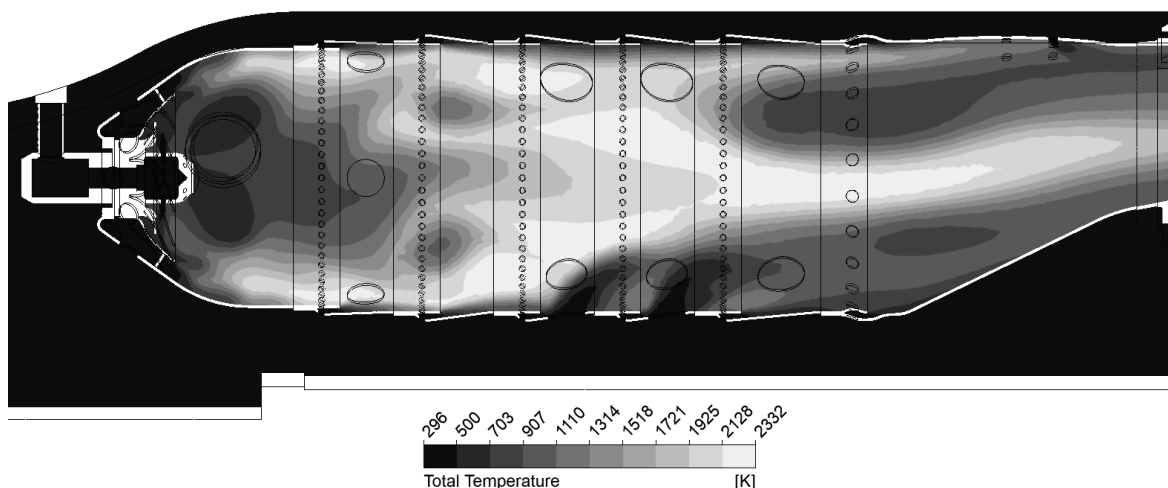


Рисунок 5. Распределение полной температуры (серийная компоновка, $\alpha_{\text{КС}} = 3,9$).

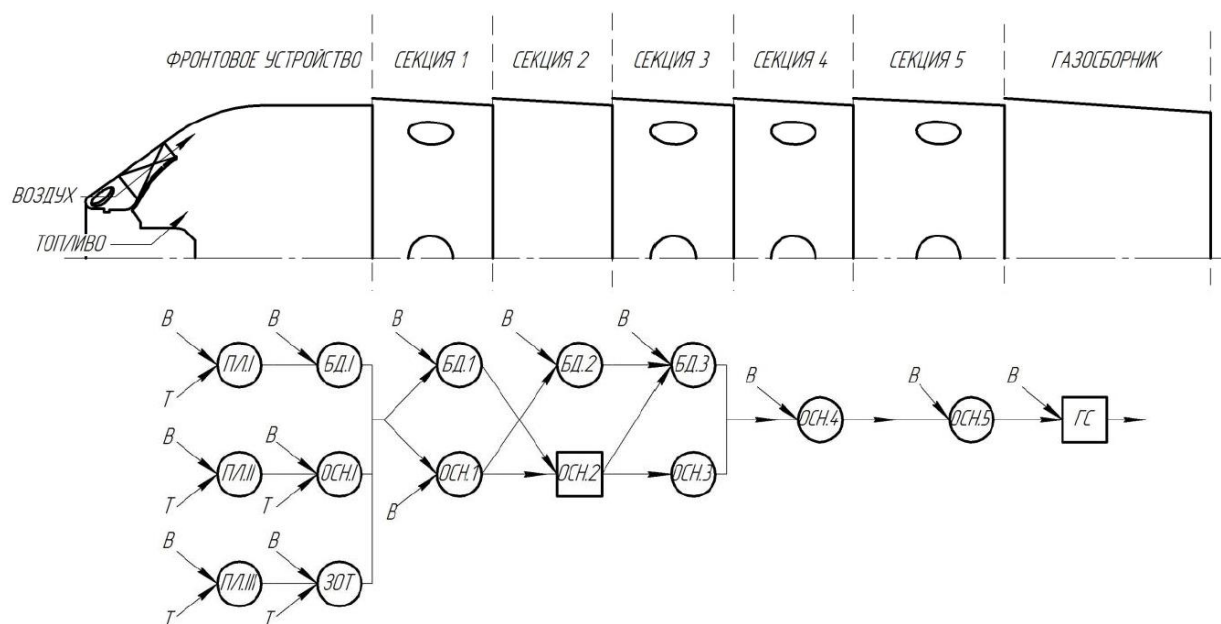


Рисунок 6. Реакторная модель камеры сгорания серийной компоновки ($\alpha_{\text{КС}} = 3,9$).

На схеме реакторы идеального смешения (PSR – Perfectly Stirred Reactor) обозначены окружностями, реакторы идеального вытеснения (PFR – Plug Flow Reactor) 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.

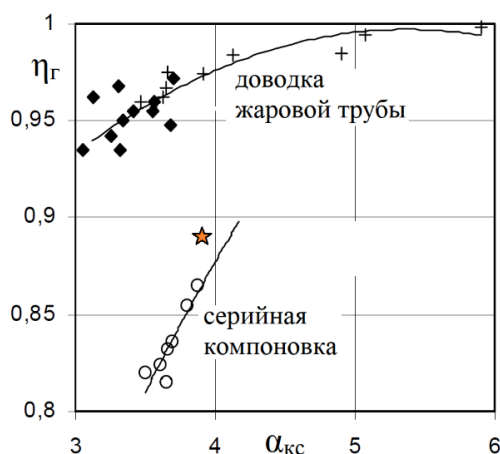
Результаты расчетов реакторной модели приведены в Табл. 1. Расчеты выполнены с применением детального механизма окисления метана GRI-Mech 3.0.

Таблица 1. Результаты расчета реакторной модели (серийная компоновка, режим $\alpha_{\text{КС}} = 3,9$, $T_{\text{К}}^* = 460 \text{ K}$, $p_{\text{К}} = 0,36 \text{ МПа}$, $\lambda_{\text{К}} = 0,41$).

Зона	Реактор	Тип реактора	[CO], млн ⁻¹	[NO _x], млн ⁻¹	α	T, K	τ , мс	g(i)
фронтальное устройство	ПЛ.I	PSR	$5,23 \cdot 10^4$	340	0,81	2172	1,56	0,0004
	БД.I		2363	147	2,30	1452	1,79	0,001
	ПЛ.II		$5,19 \cdot 10^4$	343	0,81	2173	1,56	0,0229
	ОСН.I		$1,55 \cdot 10^4$	101	0,28	–	2,48	0,074
	ПЛ.III		$5,16 \cdot 10^4$	345	0,81	2174	1,56	0,0007
	ЗОТ		$1,11 \cdot 10^4$	67	0,02	–	83,9	0,002
секция 1	БД.1	PSR	7871	17	2,06	1488	1,0	0,09
	ОСН.1		8287	55	0,55	–	1,9	0,13
секция 2	БД.2	PSR	$1,26 \cdot 10^4$	18	2,03	1447	0,87	0,03
	ОСН.2	PFR	7705	38	0,88	1023	1,27	0,22
секция 3	БД.3	PSR	$1,04 \cdot 10^4$	18	1,97	1499	0,47	0,38
	ОСН.3	PSR	$3,77 \cdot 10^4$	340	0,88	2202	0,47	0,06
секция 4	ОСН.4	PSR	6023	44	2,59	1323	0,38	0,66
секция 5	ОСН.5	PSR	4238	32	3,56	1119	0,42	0,90
газосборник	ГС	PFR	3778	30	3,94	1062	0,98	1,00

Примечание: g(i) – массовая доля рабочего тела i-го реактора.

По результатам расчетов получен высокий уровень выбросов СО на выходе из камеры сгорания, соответствующий полноте сгорания топлива $\eta_r = 0,89$. Это согласуется с экспериментом (Рис. 7 [16]), где полнота сгорания составила порядка $\eta_r \approx 0,87$ (отметим, что расчеты выполнены с условием подвода «чистого» воздуха в камеру сгорания, в экспериментах осуществлялся подогрев воздуха с помощью газового подогревателя).



★ – реакторная модель камеры сгорания.

Рисунок 7. Экспериментальная (одногорелочный отсек) и расчетная полнота сгорания.

Проанализировав реакторную модель камеры сгорания исходной компоновки, можно выявить следующие возможные причины низкой полноты сгорания топлива:

- во фронтальном устройстве и в секции 1 имеются зоны с чрезмерно «богатой» горючей смесью, что снижает эффективность процессов горения (см. реакторы ОСНІ и ОСНІ с $\alpha = 0,28–0,55$);
- в секциях 3 и 4 подводится большое количество вторичного воздуха, что приводит к чрезмерному «обеднению» горючей смеси и неэффективному использованию объемов этих зон.

Таким образом, эксперимент и расчеты ожидаемо показали необходимость доводки камеры сгорания по распределению воздуха в жаровой трубе при конвертировании с жидкого керосина на природный газ.

Реакторная модель доведенной конвертированной камеры сгорания приведена на Рис. 8. Результаты расчетов на режиме $\alpha_{кс} = 3,9$ приведены в Табл. 2.

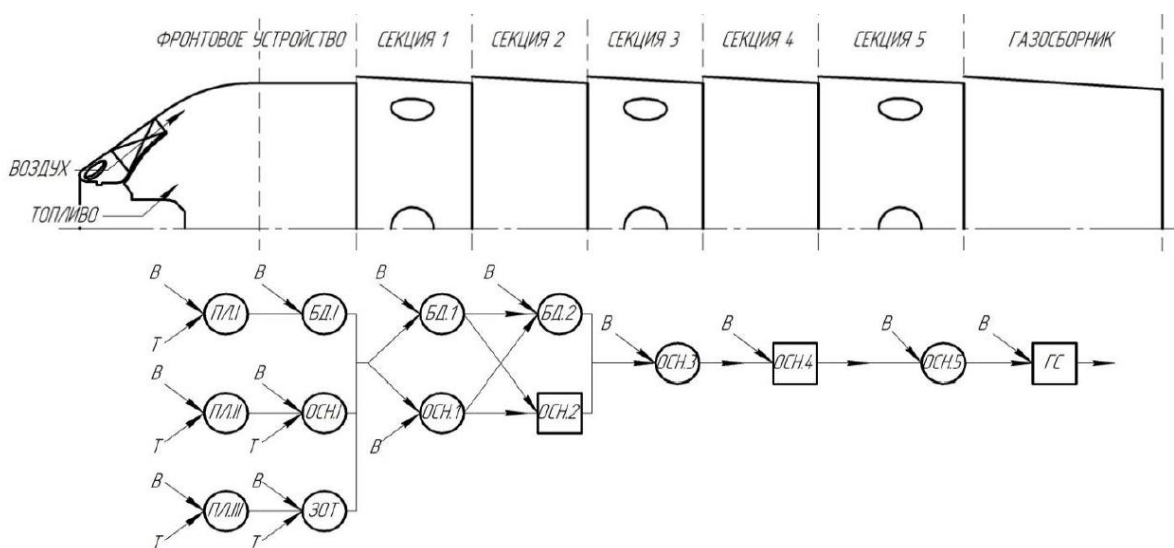


Рисунок 8. Расчетные сечения и реакторная модель конвертированной камеры сгорания ($\alpha_{кс} = 3,9$).

Таблица 2. Результаты расчета реакторной модели (конвертированная компоновка, режим $\alpha_{кс} = 3,9$, $T^*_{к} = 460$ К, $p_{к} = 0,36$ МПа, $\lambda_{к} = 0,41$).

Зона	Реактор	Тип реактора	[CO], млн ⁻¹	[NOx], млн ⁻¹	α	T, К	τ , мс	g(i)
фронтное устройство	ПЛ.І	PSR	$4,54 \cdot 10^4$	385	0,841	2190	1,04	0,001
	БД.І		3154	161	2,340	1430	1,09	0,003
	ПЛ.ІІ		$4,52 \cdot 10^4$	387	0,841	2191	1,04	0,032
	ОСН.І		$6,47 \cdot 10^4$	47	0,549	1773	0,79	0,076
	ПЛ.ІІІ		$4,51 \cdot 10^4$	387	0,842	2191	1,04	0,004
	ЗОТ		$1,17 \cdot 10^4$	94	0,030	722	22,4	0,011
секция 1	БД.1	PSR	$1,04 \cdot 10^4$	25	2,171	1418	0,90	0,153
	ОСН.1		$6,33 \cdot 10^4$	22	0,500	1605	0,71	0,102
секция 2	БД.2	PSR	4248	27	2,180	1478	0,83	0,033
	ОСН.2	PFR	$2,09 \cdot 10^4$	116	0,935	2318	0,54	0,233
секция 3	ОСН.3	PSR	2190	63	1,961	1595	0,41	0,504
секция 4	ОСН.4	PFR	331	55	2,057	1568	0,40	0,529
секция 5	ОСН.5	PSR	167	33	3,452	1171	0,41	0,878
газосборник	ГС	PFR	130	30	3,939	1093	0,95	1,000

По результатам доводки удалось обеспечить требования к камере сгорания ГТЭ-10/953, в том числе по полноте сгорания топлива и эмиссионным характеристикам.

Сравнение расчетной зависимости $[CO] = f(\alpha_{кс})$ и экспериментальной для конвертированной камеры сгорания ГТЭ-10/953 приведено на Рис. 9. При сопоставлении расчетов с экспериментом непосредственно в точках измерений различие составило в среднем 13,1% в диапазоне по составу смеси $\alpha_{кс} = 2,7$ –5,5 (экспериментальная точка на режиме $\alpha_{кс} \approx 4,8$ принята выпавшей). Таким образом, реакторная модель с формализованным построением по результатам трехмерного моделирования позволяет с достаточной точностью прогнозировать выбросы монооксидов углерода из камер сгорания ГТД.

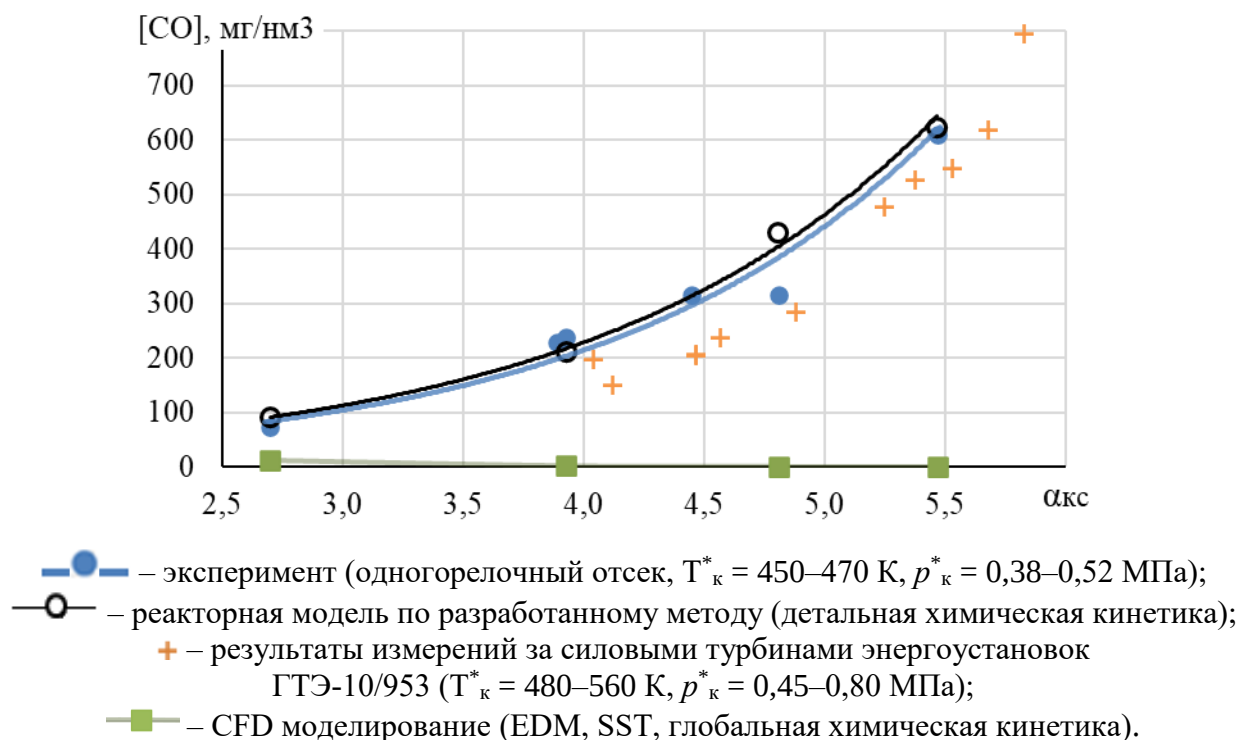


Рисунок 9. Экспериментальная и расчетная зависимости выбросов CO от суммарного коэффициента избытка воздуха камеры сгорания (при 15% O₂ в «сухих» продуктах сгорания).

Из рисунка также видно, что расчетные выбросы CO, полученные по CFD с моделью горения EDM, не согласуются с экспериментом, что объясняется применением упрощенного глобального механизма химической кинетики.

Дополнительно, на Рис. 9 приведены результаты измерений выбросов CO за силовыми турбинами энергетических установок ГТЭ-10/953 при эксплуатации. В эксплуатации температура и давление воздуха перед камерой сгорания выше по сравнению с испытаниями на одногорелочном отсеке (на 30–90 К и 0,07–0,28 МПа), что вызвано ограничениями по стендовому оборудованию. Соответственно, на энергоустановках ГТЭ-10/953 получен меньший уровень выбросов монооксида углерода.

Заключение

Разработан метод расчета выбросов монооксида углерода (CO) по реакторной модели камеры сгорания ГТД, построенной на базе результатов трехмерного CFD моделирования. Построение реакторной модели формализовано и базируется на критериях моделирования реакторами зон, лимитирующих окисление CO: низкотемпературные «бедные» зоны ($T_{adia} = 1450 \pm 50$ К) и высокотемпературная зона пламени ($T_{adia} > 1900$ К). Критерии разработаны на основе экспериментальных данных и расчетов метановоздушных пламен с применением детальной химической кинетики.

По разработанному методу рассчитана камера сгорания наземной энергоустановки ГТЭ-10/953 разработки ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО» в компоновках до и после доводки по конвертированию с авиационного керосина на природный газ. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом – различие по выбросам монооксида углерода составило в среднем 13%.

Литература:

1. Мингазов Б.Г. Горение топлив и проектирование камер сгорания газотурбинных двигателей. Теория, расчеты и проектирование: учебное пособие. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2026. 256 с. [Mingazov B.G. Fuel combustion and design of gas turbine engine combustion chambers. Theory, calculations, and design: textbook. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya, 2026. 256 p. (in Russian)]. ISBN 978-5-9729-2903-0.
2. Khodayari H., Ommi F., Saboohi Z. A review on the applications of the chemical reactor network approach on the prediction of pollutant emissions // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 2020. Vol. 94. No. 4. P. 551–570.
3. Кутлумухамедов А.Р., Скиба Д.В., Бакиров Ф.Г. Обзор работ, посвященных оценке выбросов монооксида углерода из камер сгорания газотурбинных двигателей по реакторной модели, разработанной на базе результатов трехмерного моделирования // Вестник УГАТУ. 2022. Т. 26. № 1(95). С. 69–80. [Kutlumukhamedov A.R., Skiba D.V., Bakirov F.G. A review of works dedicated to the assessment of carbon monoxide emissions from gas turbine combustion chambers using reactor network models developed on the basis of the three-dimensional simulation results // Vestnik UGATU. 2022. Vol. 26. № 1(95). P. 69–80 (in Russian)].
4. Захаров В.М., Козлов В.Е., Лебедев А.Б. и др. Разработка реакторных моделей диффузионной камеры сгорания для сравнительного анализа детальных и редуцированных кинетических схем горения углеводородных топлив // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 2. С. 20–28. [Zaharov V.M., Kozlov V.E., Lebedev A.B., et al. Development of diffusion combustor reactor models for comparative analysis of detailed and reduced kinetic schemes of hydrocarbon fuels combustion // Fizika Goreniya i Vzryva. 2009. Vol. 45. No. 2. P. 20–28 (in Russian)].
5. Zubrilin I.A., Gurakov N.I., Semenikhin A.S., et al. Simulation of CO emission in primary and secondary zone of a small gas turbine combustion chamber using CFD and reactors network. In: ASME 2019 Gas Turbine India Conference. ASME, 2019. DOI: 10.1115/GTINDIA2019-2594.
6. Gas Research Institute. GRI-Mech 3.0 [webpage]. URL: <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/> (accessed: 25.01.2026).

7. CERFACS. BFER global mechanism. Methane/Air combustion [website]. URL: <https://cerfacs.fr/cantera/mechanisms/meth.php#bfer> (accessed: 25.01.2026).
8. Grimm F. Low order reactor network based prediction of pollutant emissions applied to FLOX combustion // *Energies*. 2022. No. 15(5). Art. 1740.
9. Kutlumukhamedov A.R. Skiba D.V., Bakirov F.G. Combined method for prediction of carbon monoxide emission from gas turbine combustion chambers. In: 2021 International Scientific and Technical Engine Conference (EC). IEEE, 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/EC52789.2021.10016861.
10. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / под ред. В.Е. Дорошенко. Пер. с англ. Москва: Мир, 1986. 569 с. [Lefebvre A. Processes in combustion chambers of gas turbine engines / ed. V.E. Doroshenko. M.: Mir, 1986. 569 p. (transl. to Russian)].
11. Нугуманов А.Д., Сипатов А.М., Назукин В.А. Использование мирового опыта регулирования газотурбинных двигателей (ГТД) с малоэмиссионной камерой сгорания (МЭКС) по режимам мощности и в климатическом диапазоне при создании МЭКС для ГТД разработки АО «ОДК-Авиадвигатель» // *Вестник ПНИПУ*. 2017. № 50. С. 139–147 [Nugumanov A.D., Sipatov A.M., Nazukin V.A. Using global experience in regulating gas turbine engines (GTE) with a low-emission combustion chamber (LECC) in power modes and in the climatic range when creating a LECC for GTE developed by JSC UEC-Aviadvigatel // *Vestnik PNIPU*. 2017. No. 50. P. 139–147 (in Russian)].
12. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965. 740 с. [Shchetinkov E.S. Physics of gas combustion. M.: Nauka, 1965. 740 p. (in Russian)].
13. Болдырев О.И. Влияние термической диссоциации продуктов сгорания углеводородного топлива на параметры рабочего процесса перспективных ГТД: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Уфа, 2012. 16 с. [Boldyrev O.I. Influence of thermal dissociation of hydrocarbon fuel combustion products on the operating parameters of promising gas turbine engines: author's abstract of Ph.D. thesis in engineering sciences. Ufa, 2012. 16 p. (in Russian)].
14. Болдырев О.И., Горюнов И.М. Оценка основных параметров ГТД с применением методики моделирования равновесного состояния гомогенной смеси продуктов сгорания углеводородного топлива // *Вестник СГАУ*. 2011. № 3(27). С. 308–313. [Boldyrev O.I., Goryunov I.M. Evaluation of the main parameters of a gas turbine engine using the technique of modeling the equilibrium state of a homogeneous mixture of hydrocarbon fuel combustion products // *Vestnik SGAU*. 2011. No. 3(27). P. 308–313 (in Russian)].
15. Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified reaction mechanism for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames // *Combustion Science and Technology*. 1981. Vol. 27. No. 1–2. P. 31–43.
16. Ивах А.Ф., Гребенюк Г.П., Ишбулатов М.Н. и др. Особенности конвертирования форсированной по скорости камеры сгорания при работе на природном газе. В сб.: *Вестник СГАУ им. акад. С. П. Королева: Материалы IV Всеросс. научно-практ. конф. «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей»*. Самара, СГАУ, 2002. С. 21–26. [Ivah A.F., Grebenyuk G.P., Ishbulatov M.N., et al. Peculiarities of converting speed-boosted combustion chamber operating on natural gas. In: *Vestnik SGAU im. akad. S. P. Koroleva*. Samara: Samara State Aviation University, 2002. P. 21–26 (in Russian)].

Об авторах:

КУТЛУМУХАМЕДОВ Артур Рамилович, канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор отдела «Камеры сгорания и выходные устройства» ОКБ «Мотор» ПАО «ОДК-УМПО», kutlum22@yandex.ru.

СКИБА Дмитрий Владимирович, канд. техн. наук, заместитель научного руководителя ООО «НПФ «Теплофизика», доцент кафедры Авиационной теплотехники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», d.skiba@teplophysics.ru.

БАКИРОВ Фёдор Гайфуллович, д-р. техн. наук, проф., профессор кафедры Авиационной теплотехники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», fgbakirov@bk.ru.

Metadata:

Title: Constructing a gas turbine combustor reactor model with formalized identification of zones limiting carbon monoxide oxidation.

Author 1: Artur Ramilevich Kutlumukhamedov, Cand. Tech. Sci., Leading design engineer, Design Bureau “Motor”, kutlum22@yandex.ru.

Author 2: Dmitriy Vladimirovich Skiba, Cand. Tech. Sci., Deputy Scientific Director of LLC NPF “Teplofizika”, Assoc. Prof. of the Dept. of Aviation Thermal Engineering and Heat Power Engineering, d.skiba@teplophysics.ru.

Author 3: Fedor Gayfullovich Bakirov, Doct. Tech. Sci. in thermal, electrical rocket engines and power plants of aircraft, Prof. of the Dept. of Aviation Thermal Engineering and Heat Power Engineering, fgbakirov@bk.ru.

Abstract: This paper describes the process for constructing a reactor model of a gas turbine engine (GTE) combustion chamber, using 3D modeling results, with a formalized identification of zones limiting carbon monoxide oxidation. The reactor model and calculation results for the combustion chamber of the GTE-10/953 industrial gas turbine are presented, with configurations before and after conversion from aviation kerosene to natural gas. The difference between the calculated and experimental values for carbon monoxide (CO) emissions averaged 13%.

Keywords: combustion chamber, pollutant emissions, carbon monoxide, three-dimensional modeling, formalized reactor model, modeling criterion, low-temperature zone, flame zone.