

APPROBATION OF THE METHOD FOR ESTIMATION OF CARBON MONOXIDE EMISSIONS FROM GAS TURBINE COMBUSTORS USING A CHEMICAL REACTOR MODEL WITH TRACKING "LEAN" FUEL-AIR MIXTURE JETS

A. R. Kutlumukhamedov ^{1,2a}, D. V. Skiba ^{2b}, G. P. Grebenyuk ^{1c}, F. G. Bakirov ^{2d}

¹ PAO "UEC-UMPO" Design bureau "Motor"

² Ufa State Aviation Technical University (UGATU)

^a kutlum22@yandex.ru, ^b d.skiba@teplophysics.ru, ^c grebenukgennadij8@gmail.com, ^d fgbakirov@bk.ru

Submitted 2022, May 11

Abstract. The article describes the main stages of the methodology for calculating carbon monoxide (CO) emissions from the combustion chambers of gas turbine engines using a reactor model developed on the basis of three-dimensional modeling results. The peculiarity of the technique is in identifying and tracking low-temperature "lean" jets of air-fuel mixture. This makes it possible to take into account the heterogeneity of the composition of the burning mixture in more detail and, accordingly, to improve the accuracy of estimating CO emissions. The results of approbation of the proposed calculation method are presented on the example of estimating CO emissions from the experimental single-burner compartment of the combustion chamber of a ground-based gas turbine engine. The discrepancy between calculations and experiment was about 7–23 %.

Keywords: gas turbine engines; combustion chambers; pollutant emissions; carbon monoxide (CO); three-dimensional modeling; reactor network model; PSR; PFR; chemical kinetics.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО РЕАКТОРНОЙ МОДЕЛИ С ОТСЛЕЖИВАНИЕМ «БЕДНЫХ» СТРУЕК ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

А. Р. Кутлумухамедов ^{1,2a}, Д. В. Скиба ^{2b}, Г. П. Гребенюк ^{1c}, Ф. Г. Бакиров ^{2r}

¹ ПАО «ОДК-УМПО» Опытнo-конструкторское бюро «Мотор»

² ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

^a kutlum22@yandex.ru, ^b d.skiba@teplophysics.ru, ^c grebenukgennadij8@gmail.com, ^r fgbakirov@bk.ru

Поступила в редакцию 11.05.2022

Аннотация. Описаны основные этапы методики расчета выбросов монооксида углерода (CO) из камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) по реакторной модели, разработанной на базе результатов трехмерного моделирования. Особенность методики в выявлении и отслеживании низкотемпературных «бедных» струек топливовоздушной смеси (ТВС). Это позволяет детальнее учесть неоднородность состава горючей смеси и, соответственно, повысить точность оценки выбросов CO. Приведены результаты апробации предлагаемой расчетной

методики на примере оценки выбросов СО из экспериментального одnogорелочного отсека камеры сгорания наземного ГТД. Расхождение расчетов с экспериментом составило порядка 7–23 %.

Ключевые слова: газотурбинные двигатели; камеры сгорания; вредные выбросы; монооксид углерода (СО); трехмерное моделирование; реакторная модель; PSR; PFR; химическая кинетика.

ВВЕДЕНИЕ

Выбросы монооксида углерода из камер сгорания наземных и авиационных ГТД ограничены жесткими нормами, поэтому актуально развитие методик расчетной оценки концентраций СО в продуктах выхлопа.

Активно развивается комбинированный метод расчета выбросов вредных веществ, в котором реакторная модель камеры сгорания строится на базе результатов трехмерного моделирования средствами вычислительной газовой динамики (реакторный метод + Computational Fluid Dynamics (CFD)) [1, 2]. Такой подход направлен на объединение достоинств обоих методов. Реакторный метод позволяет проводить быстрые вычисления с применением детальных механизмов химической кинетики, но с упрощением структуры течения. CFD-моделирование позволяет рассчитать сложную трехмерную газодинамическую структуру течения с распределением реагентов в исследуемой камере сгорания, однако, прямое применение детальных (многокомпонентных) механизмов химической кинетики значительно увеличивает время расчетов и потребляемую мощность вычислительной техники.

Актуальна задача повышения точности оценки выбросов СО по комбинированному методу [2]. С этой целью в реакторной модели камеры сгорания предлагается учитывать наличие «бедных» струек (зон) в неоднородном по составу газовом потоке. Для этого «бедные» струйки выявляются по результатам CFD-моделирования и выделяются отдельными реакторами, именно в них рассчитывается количество СО, не успевшее окислиться до СО₂.

В настоящей статье описаны основные этапы предлагаемой методики расчета выбросов СО, приведены результаты ее апробации применительно к камере сгорания наземного ГТД.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД ПО РЕАКТОРНОЙ МОДЕЛИ С ОТСЛЕЖИВАНИЕМ «БЕДНЫХ» СТРУЕК ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Рассмотрим основные этапы разработки реакторной модели камеры сгорания с отслеживанием «бедных» струек ТВС [3, 4].

Первый этап – трехмерное CFD-моделирование.

Цель CFD-моделирования – оценка распределения скоростей и состава рабочего тела в объеме камеры сгорания. Рекомендуется проводить моделирование в стационарной постановке с применением RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) моделей турбулентности и «экономичных» моделей горения типа Eddy Dissipation Model, Eddy Dissipation/Finite Rate Model, Flamelet и др.

Второй этап – выбор расчетных сечений.

Расчетные сечения выбираются, исходя из конструктивных особенностей исследуемой камеры сгорания, сечения можно располагать на участках начала секций жаровой трубы, подвода основного воздуха, начала газосборника и так далее. По расчетным сечениям объем камеры сгорания, в дальнейшем, разбивается на реакторы.

Третий этап – выявление «бедных» струек ТВС в расчетных сечениях.

Пример расчетной неоднородности состава смеси в жаровой трубе трубчато-кольцевой камеры сгорания приведен на рис. 1.

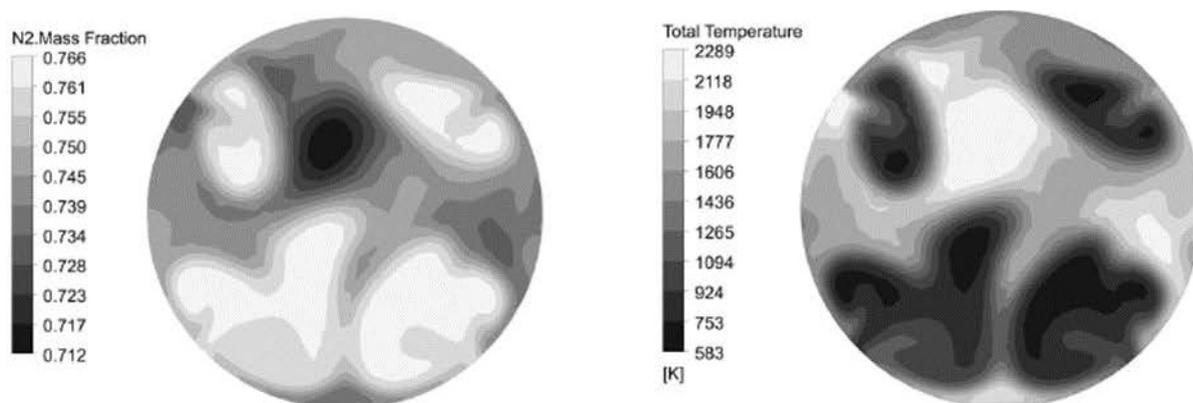


Рис. 1. Распределение массовой доли азота и температуры в жаровой трубе трубчато-кольцевой камеры сгорания

В предлагаемой методике, в каждом расчетном сечении, «бедные» зоны объединяются в одну «бедную» струйку с составом, соответствующим адиабатической температуре продуктов сгорания $T_{adia} = 1450 \pm 50$ К. При такой температуре скорость окисления CO относительно мала, однако еще нет полного «замораживания» процессов горения [5]. Зная давление и температуру на входе в камеру, можно оценить состав смеси, который будет соответствовать заданной T_{adia} .

В качестве параметра для выявления «бедных» струек (зон) выбрана объемная доля содержания азота $r(N_2)$. Азот не участвует в химических реакциях при применении в CFD-моделировании глобальных одно- или двухшаговых механизмов химической кинетики и, поэтому, количество азота позволяет оценить состав горючей смеси.

Такой подход позволяет более детально учесть наличие «бедных» струек будь то в пристеночной области или в следе за струями подвода основного воздуха.

Опишем процедуру выявления «бедной» струйки.

Для каждого расчетного сечения с CFD результата экспортируется массив данных с объемной долей азота и массовым расходом (массив содержит данные от всех расчетных ячеек, пересекающих расчетное сечение). Полученный массив $r(N_2)_i$ и G_i сортируется по убыванию $r(N_2)$ – от «бедных» струек к более «богатым». Уже в отсортированном массиве «бедные» струйки объединяются в одну с заданным составом смеси $r(N_2)_{\text{ЦЕЛЕВОЕ}}$ (с требуемой T_{adia}):

$$r(N_2)_{\text{ЦЕЛЕВОЕ}} = \frac{G_1 \cdot r(N_2)_1 + G_2 \cdot r(N_2)_2 + \dots + G_n \cdot r(N_2)_n}{G_1 + G_2 + \dots + G_n} \quad (1)$$

При этом расход объединенной «бедной» струйки будет равен:

$$G_{\text{бд}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n \quad (2)$$

Данные массива позволяют рассчитать расход и состав оставшейся (основной) струйки ТВС для каждого расчетного сечения.

«Бедные» струйки моделируются в реакторной модели камеры сгорания отдельными реакторами.

Четвертый этап – построение и расчет реакторной модели камеры сгорания.

Отдельно рассмотрим особенности построения реакторной схемы в первом расчетном сечении вслед за фронтовым устройством (рис. 2). Это наиболее сложная зона для моделирования, в которой можно выделить: зону обратных токов, пламени, основную и «бедную» струйки газового потока, а также остатки «несгоревшего» воздуха.

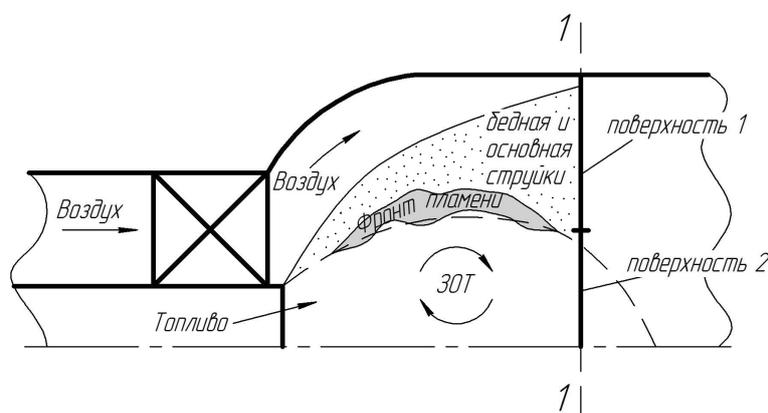


Рис. 2. Структура течения фронтального устройства

Отметим, что сечение 1-1 выбрано таким образом, что пересекает зону обратных токов (рис. 2). В постпроцессоре CFD программы в этом сечении строятся две непересекающиеся поверхности. Первая поверхность – кольцевая над зоной обратных токов (ЗОТ). В ней протекают основная и «бедная» струйки, остатки чистого «несгоревшего» 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 упростить моделирование зоны фронтального устройства – ЗОТ моделируется одним реактором идеального смешения с потоком малого расхода (без рециркуляции между реакторами).

Объем ЗОТ от начала фронтального устройства до сечения 1-1 определяется по результатам CFD моделирования.

Под зоной пламени, в настоящей работе, подразумевается горячая смесь с температурой продуктов сгорания более 1900 К. При такой температуре уже существенна диссоциация CO_2 в CO [6]. Расположение зоны пламени, ее объем и расход газа определяется с помощью изообъема с заданным диапазоном объемной доли азота $r(\text{N}_2)$. Так, например, при температуре исходной метано-воздушной смеси 470 К температуре пламени $T > 1900$ К соответствует диапазон $r(\text{N}_2)$ от 0,738 до 0,715.

Объемы реакторов определяются из соотношения соответствующих расходов.

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

Отметим, что модель реактора идеального смешения (PSR – Perfectly Stirred Reactor [7]) построена на допущении об идеальном – бесконечно быстром и полном смешении компонентов во всем объеме реактора. В таком реакторе процессы горения лимитируются скоростью химических реакций и временем пребывания горючей смеси.

Модель реактора идеального вытеснения (PFR – Plug Flow Reactor [7]) можно представить в виде трубчатого реактора, в котором горючая смесь выгорает по мере движения в осевом на-

правлении, при этом, делается допущение о равномерном распределении смеси и параметров в поперечных сечениях реактора.

Относительная простота математических моделей реакторов PSR и PFR позволяет применять в вычислениях «тяжелые» детальные механизмы химической кинетики, наиболее точно рассчитывающие скорость химических реакций и, соответственно, образование компонентов смеси.

Расчеты реакторных моделей выполняют в специальных программах типа Chemkin, Cantera, Chemical Workbench (Кинтех Лаб) и др.

ИССЛЕДУЕМАЯ КАМЕРА СГОРАНИЯ

Исследовалась камера сгорания наземной газотурбинной энергетической установки ГТЭ-10/953 номинальной мощностью 8 МВт [8]. ГТЭ-10/953 создана на базе высоконадежного авиационного двигателя Р13-300, эксплуатируемого на истребителях типа МиГ-21 и Су-15. Основной задачей при конвертировании авиационного двигателя в наземную установку был перевод работы камеры сгорания с жидкого топлива на природный газ с обеспечением требований ГОСТ 29328 по допустимому содержанию оксидов азота NO_x в продуктах сгорания (не более 50 мг/нм^3).

Доводка конвертированной камеры сгорания выполнена на одnogорелочном отсеке на стенде горячих продувок ОКБ «Мотор» в период 2000–2001 гг. По результатам экспериментально-расчетных исследований выбрана конструкция камеры сгорания с оптимальным законом распределения состава ТВС по длине жаровой трубы, обеспечившим устойчивое горение с высокой полнотой сгорания на рабочих режимах ($\eta_r \geq 0,99$) в условиях высокой приведенной скорости воздуха на входе в камеру сгорания $\lambda_k = 0,4$.

Подтверждение экологических характеристик камеры сгорания выполнено на стендовой базе АО «Авиадвигатель» испытаниями на «чистом» подогретом воздухе [8, 9]. Получена концентрация оксидов азота в продуктах сгорания, при условном содержании 15 % кислорода, $[\text{NO}_x] = 38 \text{ мг/нм}^3$. Последующие многократные измерения химического состава продуктов сгорания ГТД подтвердили достигнутый уровень концентрации оксидов азота $[\text{NO}_x] \leq 50 \text{ мг/нм}^3$.

Допустимый по ГОСТ 29328 уровень выбросов NO_x получен за счет реализации процесса сжигания топлива по концепции «богато-бедного» горения (RQL – Rich-Quench-Lean) без предварительного перемешивания ТВС. Успешная реализация данной концепции позволяет получить преимущество конвертированной камеры сгорания с базовой конструкцией в тех же габаритных размерах, и широкий диапазон статически и динамически устойчивого горения.

Схема экспериментального одnogорелочного отсека приведена на рис. 3. Жаровая труба камеры сгорания состоит из фронтального устройства с периферийным завихрителем, пяти секций и газосборника. Форсунка – одноконтурная со струйной подачей природного газа. Система охлаждения – конвективно-пленочная.

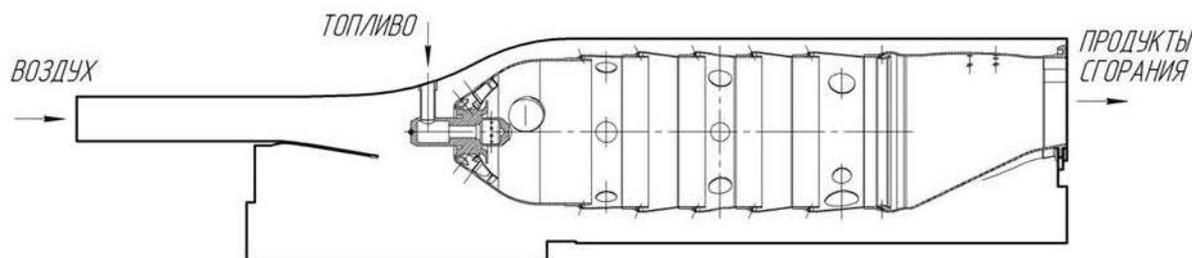


Рис. 3. Одnogорелочный отсек камеры сгорания ГТЭ-10/953

АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ СО ИЗ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Первый этап методики, трехмерное CFD моделирование исследуемой камеры сгорания, выполнен в программном комплексе ANSYS CFX v.16.1. Использовались: модель турбулентности SST (Shear Stress Transport); модель горения EDM (Eddy Dissipation Model); двухшаговый механизм химической кинетики окисления метана [10]; модель теплового излучения – Discrete Transfer; спектральная модель – Weighted Sum of Gray Gases. Тэтраэдрическая расчетная сетка модели камеры сгорания состояла из 13,5 млн элементов.

Расчетное распределение температур на режимах $\alpha = 2,7$ и $\alpha = 5,5$ приведено на рис. 4.

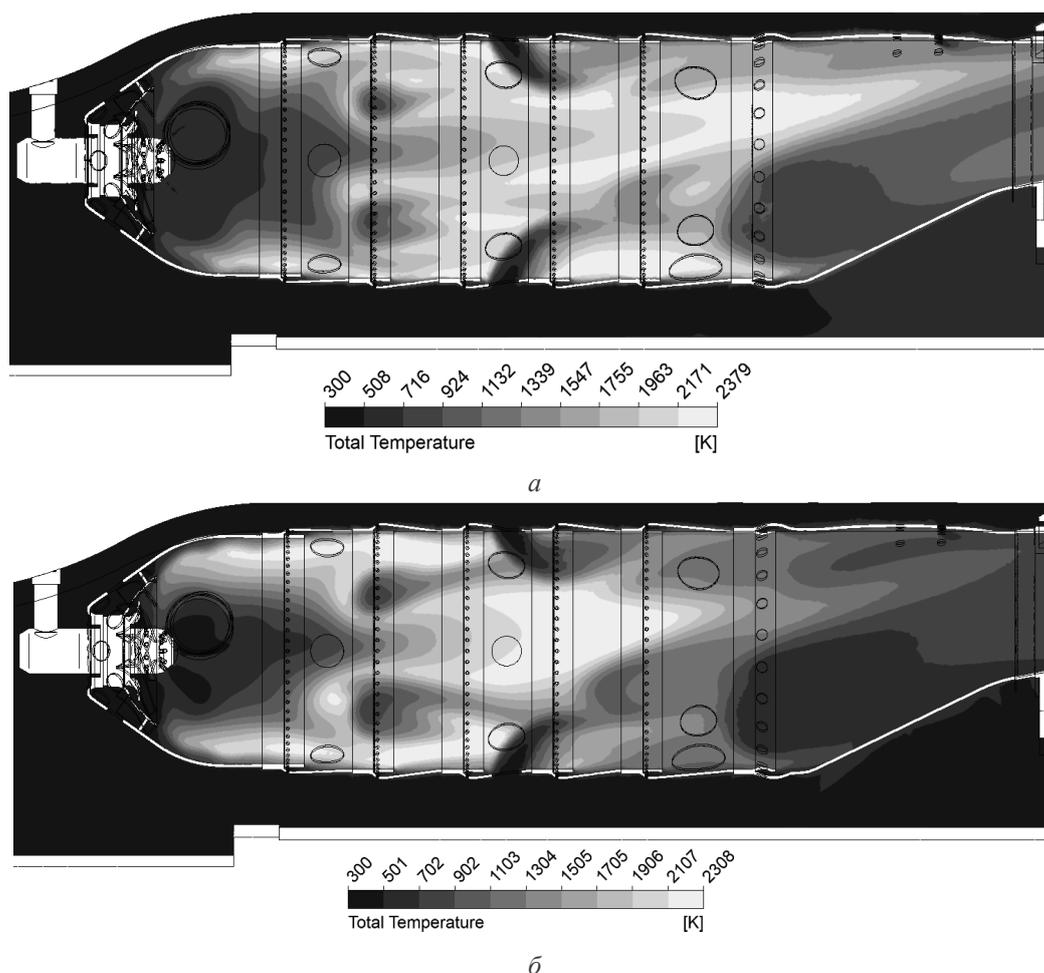


Рис. 4. Расчетное распределение температуры газов:
a – режим $\alpha = 2,7$; *б* – режим $\alpha = 5,5$

При двукратном форсировании камеры сгорания с $\alpha = 5,5$ до $\alpha = 2,7$ обеспечено сжигание основной массы топлива ко второму ряду отверстий за счет интенсивного перемешивания ТВС с развитой поверхностью окисления, генерируемой закруткой потока воздуха периферийным завихрителем.

Схема разбиения жаровой трубы на расчетные сечения (второй этап), а также разработанные, по предложенной методике, реакторные модели камеры сгорания приведены на рис. 5 (третий и четвертый этапы методики). Нужно отметить, что реакторные модели для «бедных» режимов ($\alpha = 3,9–5,5$) несколько отличаются от модели для «богатого» режима ($\alpha = 2,7$). Это связано с изменением структуры горения при двукратном уменьшении количества топлива в фронтном устройстве.

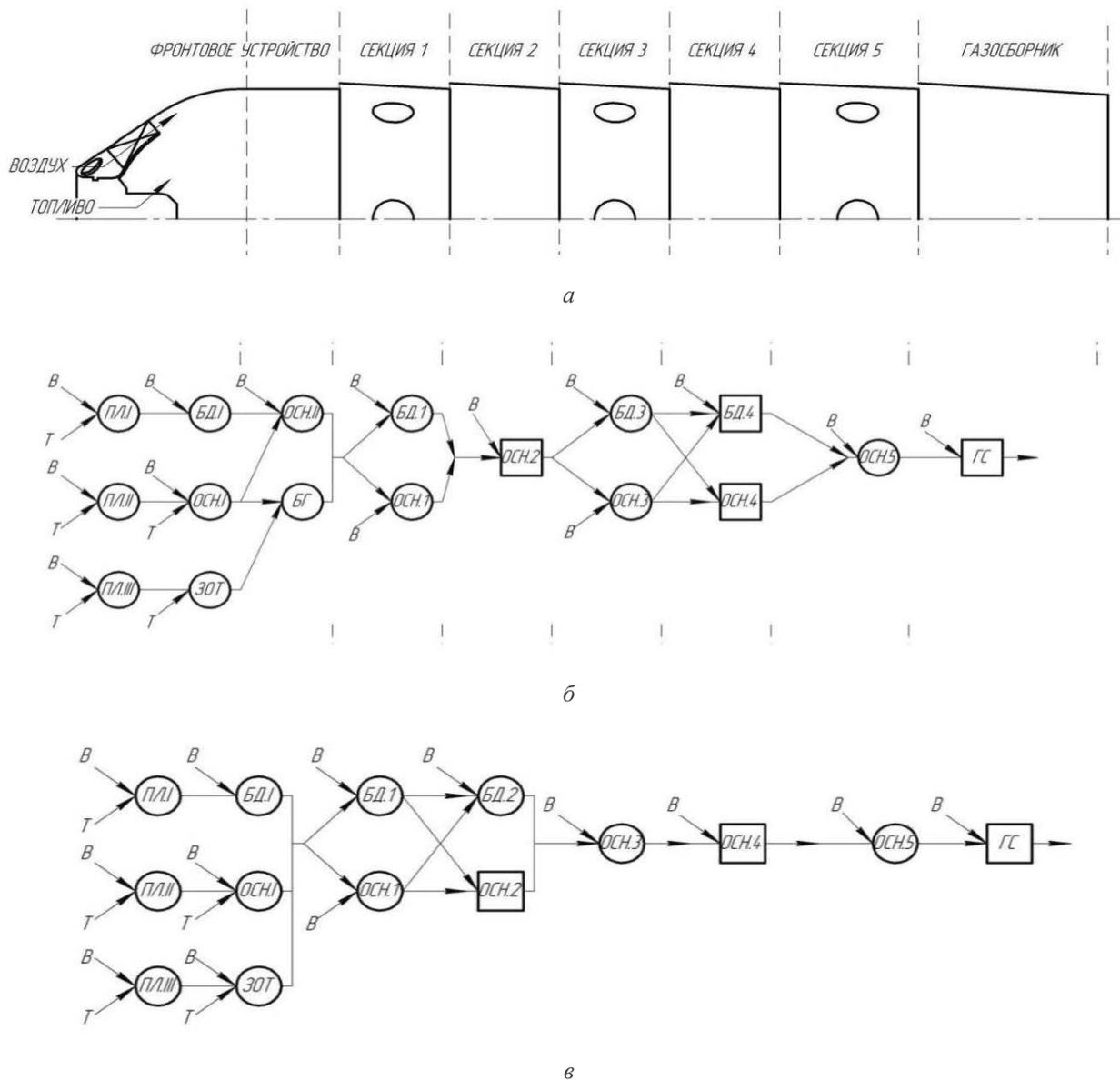


Рис. 5. Расчетные сечения и реакторные модели исследуемой камеры сгорания:
а – расчетные сечения; *б* – режим $\alpha = 2,7$; *в* – режимы $\alpha = 3,9; 4,8; 5,5$

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, БГ – «богатая» струйка (зона), ОСН – основной поток, ЗОТ – зона обратных токов, ГС – газосборник.

Отметим некоторые особенности реакторных моделей:

- «бедная» струйка во фронтальном устройстве формируется газом от зоны пламени и воздухом;
- интенсивное смешение в секции 1 моделируется с допущением, что в первую очередь смешиваются струи газа за фронтальным устройством, затем происходит смешение газов с основным и охлаждающим воздухом;
- после подвода определенного количества основного воздуха «бедная» струйка вырождается и отдельно не моделируется – весь поток становится «бедным».

В реакторной модели допускается небольшое перераспределение расходов относительно исходного (полученного по результатам CFD-моделирования) для поддержания горения в «бедных» струйках (реакторы, моделирующие «бедные» струйки, близки к границе срыва пламени). Так, на режимах $\alpha = 2,7$, $\alpha = 3,9$ и $\alpha = 5,5$ от реактора ОСН.1 отбирается небольшая часть газа в реактор БД.1 (не показано на схеме). При этом расход газа в «бедном» реакторе БД.1 от первоначального изменился незначительно – в пределах 0,7–2,8 %.

Также отдельного внимания требуют реакторы БД.4 (рис. 5, б) и БД.2 (рис. 5, в). Здесь сложная картина смешения – реакторы формируются тремя потоками: охлаждающий воздух; часть газа от предыдущей «бедной» струйки и часть газа от предыдущего основного потока. В реакторной модели потребовалась корректировка распределения расходов между тремя потоками относительно исходного, так чтобы выдержать требуемый состав газа в «бедной» струйке. При этом после корректировок расход газа в «бедных» струйках изменился не более чем на 10 %.

Таким образом, допускается локальная корректировка распределения расходов, при условии, что расход газа в «бедных» струйках изменяется не более чем ~10 % от исходного и состав смеси соответствует $T = 1450 \pm 50$ К. Объемы «бедных» и основных струек (реакторов) – без изменений.

Расчеты реакторных моделей выполнены с применением детального механизма химической кинетики окисления метана GRIMECH 3.0 (53 компонента и 325 реакций).

Результаты расчета реакторной модели на режимах $\alpha = 2,7$ и $\alpha = 5,5$ приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Результаты расчета реакторной модели (режим $\alpha = 2,7$, $T_k = 469$ К, $P^*_{к} = 5,15$ бар, $\lambda_k = 0,36$)

Зона	Реактор	Тип реактора	[CO], ppmv	[NO _x], ppmv	α	T, К	τ , мс
фронтное устройство	ПЛ.1	PSR	$5,92 \cdot 10^4$	176	0,78	2132	0,58
	БД.1		5002	101	2,33	1421	0,82
	ПЛ.2		$5,93 \cdot 10^4$	183	0,78	2136	0,57
	ОСН.1		$1,52 \cdot 10^4$	47	0,19	825	1,2
	ПЛ.3		$5,91 \cdot 10^4$	177	0,78	2133	0,58
	ЗОТ		$2,5 \cdot 10^4$	73	0,06	–	35,0
	ОСН.2		$6,97 \cdot 10^4$	39	0,68	2039	2,2
	БГ		$1,58 \cdot 10^4$	48	0,18	–	1,8
секция 1	БД.1	PSR	9989	14	2,05	1473	1,0
	ОСН.1		$1,93 \cdot 10^4$	30	0,43	933	1,5
секция 2	ОСН.2	PFR	$1,49 \cdot 10^4$	22	0,70	1114	1,3
секция 3	БД.3	PSR	$1,13 \cdot 10^4$	39	2,0	1486	0,5
	ОСН.3		$5,01 \cdot 10^4$	284	0,82	2179	0,35
секция 4	БД.4	PFR	1232	50	2,26	1486	0,53
	ОСН.4	PFR	449	181	1,27	2087	0,37
секция 5	ОСН.5	PSR	175	93	2,40	1442	0,41
газосборник	ГС	PFR	81	83	2,72	1345	0,96

Таблица 2. Результаты расчета реакторной модели (режим $\alpha = 5,5$, $T_k = 453$ К, $P^*_k = 3,75$ бар, $\lambda_k = 0,45$)

Зона	Реактор	Тип реактора	[CO], ppmv	[NO _x], ppmv	α	T, К	τ , мс
фронтное устройство	ПЛ.І	PSR	$4,28 \cdot 10^4$	394	0,85	2191	1,1
	БД.І		$2,73 \cdot 10^4$	164	2,35	1425	1,36
	ПЛ.ІІ		$4,32 \cdot 10^4$	393	0,85	2190	1,1
	ОСН.І		$4,66 \cdot 10^4$	381	0,83	2182	0,83
	ПЛ.ІІІ		$4,34 \cdot 10^4$	392	0,85	2189	1,1
	ЗОТ		$1,29 \cdot 10^4$	65	0,07	-	12,8
секция 1	БД.1	PSR	$1,23 \cdot 10^4$	67	2,13	1399	0,79
	ОСН.1		$5,74 \cdot 10^4$	80	0,55	1811	0,56
секция 2	БД.2	PSR	3593	65	2,27	1448	0,82
	ОСН.2	PFR	1539	151	1,17	2175	0,48
секция 3	ОСН.3	PSR	757	64	2,79	1306	0,45
секция 4	ОСН.4	PFR	552	61	2,89	1283	0,44
секция 5	ОСН.5	PSR	321	37	4,87	976	0,44
газосборник	ГС	PFR	279	33	5,50	921	1,02

Применительно к табл. 1, 2 нужно отметить следующее:

– время пребывания горючей смеси τ рассчитано по плотности горячих продуктов сгорания;

– для реакторов типа PFR параметры [CO], [NO_x] и T указаны на выходе из реактора.

По результатам расчетов видно, что основным источником CO, в зонах близких к завершению горения, являются «бедные» струйки ТВС (см. секцию 4 на режиме $\alpha = 2,7$ и секцию 2 на режиме $\alpha = 5,5$).

Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей выбросов монооксида углерода от режима работы камеры сгорания приведено на рис. 6. Получено согласование результатов расчета с экспериментом – различие составило порядка 7–23 %.

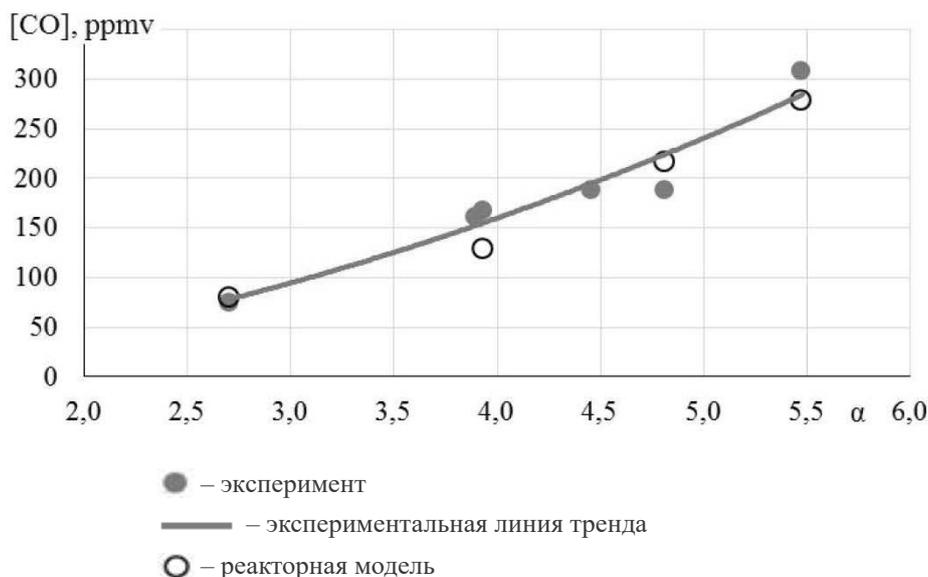


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная зависимости выбросов монооксида углерода от суммарного коэффициента избытка воздуха камеры сгорания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и апробирована методика расчета выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД по реакторной модели с отслеживанием «бедных» струек ТВС. «Бедные» струйки выявляются по результатам трехмерного CFD расчета и моделируются в реакторной модели камеры сгорания отдельными реакторами. Такой подход позволяет более детально учесть неоднородность состава смеси на выбросы СО и повысить точность расчетов.

По разработанной методике выполнен расчет выбросов СО камеры сгорания наземной энергетической установки. Получено согласование расчетных и экспериментальных данных – расхождение составило порядка 7–23 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Khodayari H., Omni 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. Pp. 551-570.
2. **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*. Т. 26, № 1 (95). С. 69–80. 2022. DOI: 10.54708/19926502_2022_2619569. [A. R. Kutlumukhamedov, D. V. Skiba, F. G. Bakirov, "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", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 26, no. 1 (95), pp. 69-80, 2022. DOI: 10.54708/19926502_2022_2619569.]
3. **Кутлумухамедов А. Р., Скиба Д. В., Бакиров Ф. Г.** Комбинированный метод расчета выбросов монооксида углерода из камер сгорания газотурбинных двигателей // *Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. (23–25 июня 2021 г.)*. В 2 т. Т. 2. Самара: Самарский университет, 2021. С. 132–133. [A. R. Kutlumukhamedov, D. V. Skiba, F. G. Bakirov, "Combined method for estimation of carbon monoxide emission from gas turbines combustion chambers", (in Russian), in *Problems and prospects for the development of engine building: materials of the reports of the international. sci.-tech. conf.*, in 2 vol. Vol. 2, Samara, 2021, pp. 132-133.]
4. **Кутлумухамедов А. Р., Скиба Д. В., Бакиров Ф. Г.** Разработка реакторной модели камеры сгорания с отслеживанием «бедной» струйки топливоздушной смеси для расчета выбросов монооксида углерода // *Молодежный Вестник УГАТУ*. 2020. № 2 (23). С. 72–75. [A. R. Kutlumukhamedov, D. V. Skiba, F. G. Bakirov, "Development of a reactor network model for combustion chamber with tracking a "lean" fuel-air mixture stream for estimating carbon monoxide emission", (in Russian), in *Molodezhnyj Vestnik UGATU*, no. 2 (23), pp. 72-75, 2020.]
5. **Лефевр А.** Процессы в камерах сгорания ГТД; пер. с англ. М.: Мир, 1986. 566 с. [A. Lefevre, *Processes in combustion chambers of GTE*, (in Russian). Moscow: Mir, 1986.]
6. **Кутлумухамедов А. Р., Скиба Д. В., Бакиров Ф. Г.** Расчетное исследование влияния отдельных факторов на уровень выбросов монооксида углерода с помощью реакторной модели малоэмиссионной камеры сгорания // *Вестник УГАТУ*. 2019. Vol. 23, № 4 (86). С. 84–92. [A. R. Kutlumukhamedov, D. V. Skiba, F. G. Bakirov, "Numerical investigation of individual factor's influence on carbon monoxide emission with the help of low-emission combustor's chemical reactor network model", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 23, no. 4 (86), pp. 84-92, 2019.]
7. **Turns S. R.** An Introduction to Combustion: concepts and applications. 2nd ed. McGraw-Hill series in mechanical engineering, 2000. 676 p.
8. **Особенности** конвертирования форсированной по скорости камеры сгорания при работе на природном газе / А. Ф. Ивах [и др.] // *Вестник СГАУ им. акад. С. П. Королева*. 2002. № 2 (2). С. 21–26. [A. F. Ivah, et al., "Peculiarities of converting speed-boosted combustion chamber operating on natural gas", (in Russian), in *Vestnik SGAU im. akad. S. P. Koroleva*, no. 2 (2), pp. 21-26, 2002.]
9. **Результаты** испытаний жаровой трубы 953.03.2.2100 камеры сгорания двигателя ГТП-10/953 в одногорелочном отсеке на стенде ОАО «Авиадвигатель» / *Технический отчет № 37618*. Пермь, 2002. [*The results of testing the flame tube 953.03.2.2100 of the combustion chamber of the GTP-10/953 engine in the single-burner compartment at the stand of JSC "Aviadvigatel"*, (in Russian), Technical report № 37618. Perm, 2002.]
10. **Westbrook C. K., Dryer F. L.** Simplified Reaction Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames // *Combustion Science and Technology*. 1981. Vol. 27, Iss. 1-2. Pp. 31-43.

ОБ АВТОРАХ

КУТЛУМУХАМЕДОВ Артур Рамилевич, вед. инж.-кон. ОКБ «Мотор», асп. каф. АТиТ УГАТУ.

СКИБА Дмитрий Владимирович, ст. науч. сотр. каф. АТиТ УГАТУ, канд. техн. наук.

ГРЕБЕНЮК Геннадий Петрович, вед. инж.-кон. ОКБ «Мотор», канд. техн. наук.

БАКИРОВ Фёдор Гайфуллович, проф. каф. АТиТ УГАТУ, д-р. техн. наук.

KUTLUMUKHAMEDOV, Artur Ramilevich, Leading design engineer, Design bureau “Motor”, postgraduate student, USATU.

SKIBA, Dmitriy Vladimirovich, Senior Researcher of the Dept. of aviation of the thermal engineering and heat power engineering, USATU, Cand. of Tech. Sci.

GREBENYUK, Gennadij Petrovich, Leading design engineer, Design bureau “Motor”, Cand. of Tech. Sci.

BAKIROV, Fedor Gayfullovich, Prof. of the Dept. of aviation of the thermal engineering and heat power engineering, USATU, Dr. of Tech. Sci.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 2 (96), pp. 82-92, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).