

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

A. R. Kutlumukhamedov ^a, D. V. Skiba ^b, F. G. Bakirov ^c

Ufa State Aviation Technical University (UGATU)

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

Submitted 2021, December 6

Abstract. The article provides an overview of works devoted to the estimation of carbon monoxide (CO) emissions from gas turbine combustion chambers. Studies were considered in which the reactor network model of the combustion chamber is built on the basis of three-dimensional modeling (combined method). This approach makes it possible to carry out calculations using detailed chemistry kinetic mechanisms and taking into account the main features of the stream. The data on the methods of constructing reactor models, the results of comparing the calculations with the experiment are presented. The urgency of further development of the combined method for predicting CO emissions is noted.

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

ОБЗОР РАБОТ, ПОСВЯЩЕННЫХ ОЦЕНКЕ ВЫБРОСОВ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО РЕАКТОРНОЙ МОДЕЛИ, РАЗРАБОТАННОЙ НА БАЗЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Р. Кутлумухамедов ^а, Д. В. Скиба ^б, Ф. Г. Бакиров ^в

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

^а kutlum22@yandex.ru, ^б d.skiba@teplophysics.ru, ^в fgbakirov@bk.ru

Поступила в редакцию 06.12.2021

Аннотация. Приведен обзор работ, посвященных расчетной оценке выбросов монооксида углерода (СО) из камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД). Рассматривались исследования, в которых реакторная модель камеры сгорания строится на базе результатов трехмерного моделирования (комбинированный метод). Такой подход позволяет проводить вычисления с применением детальных механизмов химической кинетики и учетом основной структуры потока. Приведены данные по методам построения реакторных моделей, результаты сравнения расчетов с экспериментом. Отмечена актуальность дальнейшего развития комбинированного метода расчета выбросов СО.

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

ВВЕДЕНИЕ

К камерам сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) предъявляются требования по допустимой концентрации вредных веществ в продуктах выхлопа. Одно из таких веществ – это монооксид углерода (СО) как продукт неполного сгорания топлива. Соответственно, в рамках разработки малоэмиссионных камер сгорания ГТД актуально создание и развитие методов расчетной оценки выбросов СО.

Активно развивается комбинированный метод расчета вредных веществ, в котором реакторная модель камеры сгорания строится на базе результатов трехмерного CFD (Computational Fluid Dynamics) моделирования [1]. Такой метод позволяет проводить относительно быстрые вычисления с применением детальных механизмов химической кинетики и учетом основных особенностей структуры потока.

Наибольшую популярность, при построении реакторных моделей камер сгорания, получили математические модели реактора идеального смешения PSR (Perfectly Stirred Reactor) и идеального вытеснения PFR (Plug Flow Reactor) [2].

В математической модели реактора PSR сделано допущение об идеальном (бесконечно быстром и полном) смешении газов во всем рабочем объеме. Скорость выгорания топлива в таком реакторе лимитируется скоростью химических реакций.

В реакторе PFR горючая смесь выгорает по мере ее течения в осевом направлении, при этом в поперечных сечениях реактора смесь однородна по составу и параметрам.

Расчет реакторных моделей выполняют в специальных программных продуктах типа CHEMKIN, CANTERA, Chemical Workbench (Кинтех Лаб) и др. Некоторые научные организации используют программы собственной разработки.

Можно выделить два направления построения реакторных моделей по результатам CFD моделирования.

Первое направление – построение на базе 3D расчетной структуры потока. Здесь, в явном виде выделяются основные зоны рабочего процесса – зона пламени, зона рециркуляции, пристеночная зона, зона разбавления и др. Эти зоны моделируются отдельными реакторами или группами реакторов. Параметры потока в характерных зонах, тепло- и массообмен между ними определяются по результатам обработки CFD результата.

Второе направление – «алгоритмическое» или «автоматическое». При таком подходе разрабатывается специальная программа, которая обрабатывает параметры потока в каждой расчетной ячейке CFD результата и объединяет объемы соседних ячеек в реакторы в зависимости от заданных критериев селекции. В качестве критериев селекции могут выступать интервалы значений по температуре газов, составу смеси и др. – ячейки с параметрами газа в заданном интервале объединяются в один реактор.

В настоящей статье приведен обзор работ, посвященных расчетной оценке выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД, выполненных с помощью комбинированного метода (CFD + реакторный метод). Также, кратко описан предлагаемый авторами комбинированный метод расчета выбросов СО по реакторной модели камеры сгорания с отслеживанием «бедных» струек топливовоздушной смеси (ТВС).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ИНТЕНСИВНОГО СМЕШЕНИЯ

Прежде, чем переходить к разбору работ, посвященных оценке выбросов вредных веществ из камер сгорания ГТД, рассмотрим работу [3], в которой моделируются устройства, прибли-

женные по условиям работы к гомогенному реактору. Эта работа интересна тем, что показывает насколько успешно одно- двухреакторные математические модели справляются с расчетом горелочных устройств интенсивного смешения.

В работе [3] исследуются два реактора хорошего смешения: одноструйный и многоструйный. Оба устройства работают на заранее подготовленной горючей смеси воздуха и метана.

Объем одноструйного реактора – $1,5 \text{ см}^3$. Горючая смесь подается в реактор через одну струйную форсунку диаметром 1,4 мм. Зона рециркуляции организована за счет ударного натекания струи на стенки реактора. Пробы продуктов сгорания отбираются непосредственно из зоны рециркуляции. Температура газов в одноструйном реакторе поддерживалась равной $\sim 1800 \text{ К}$ за счет регулирования состава горючей смеси. Время пребывания смеси варьировалось от 0,5 до 4,0 мс. Рабочее давление – 3,0, 4,7 и 6,5 атм. Работы проводились как с подогревом ТВС до 573 К, так и без подогрева.

Объем многоструйного реактора – 19 см^3 . Горючая смесь подается в реактор через 20 форсунок диаметром 0,6 мм, расположенных под углом 12° в радиальном направлении. Это позволяет организовать интенсивное смешение за счет закрутки потока. Устройство имеет три выхлопных патрубка, в которых отбираются пробы продуктов сгорания. Температура газов в многоструйном реакторе также поддерживалась равной $\sim 1800 \text{ К}$. Время пребывания горючей смеси – 1,0 и 2,0 мс. Рабочее давление – от 1 до 20 атм. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,82$. Работы проводились с подогревом ТВС.

Одноструйный реактор при малых значениях времени пребывания τ моделировался единичным PSR, предполагалось, что зона пламени охватывает весь объем реактора. При относительно больших τ реактор моделировался двумя последовательно расположенными PSR – первый моделировал зону пламени, второй – постпламенную зону. Многоструйный реактор моделировался двумя последовательно расположенными реакторами. Первый – PSR моделировал зону пламени, второй – PFR моделировал постпламенную зону и выхлопные патрубки до сечения отбора проб газа.

При расчетах реакторных моделей применялся детальный механизм химической кинетики GRIMECH 3.0 ($\text{CH}_4 + \text{воздух}$).

Измеренные значения выбросов CO варьировались от 100 до 6700 ppmv. Отметим хорошее, судя по предоставленным в работе [3] графическим данным, согласование расчетных и измеренных выбросов монооксида углерода на режимах с давлением $P > 5 \text{ атм}$ (высокое давление характерно для камер сгорания ГТД).

Успешное применение идеализированных моделей типа PSR и PFR при расчете горелочных устройств с интенсивным смешением показало потенциальную возможность успешного моделирования более сложных устройств с помощью этих моделей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

В табл. 1 приведены сводные результаты обзора работ по расчету выбросов монооксида углерода из камер сгорания ГТД, а также представлены краткие данные по исследуемым камерам сгорания, данные по количеству элементов в разработанной реакторной модели (Nэл), сравнение результатов расчетов с экспериментом.

Таблица 1. Сводные результаты обзора

Работа	Конструкция	Топливо	Различие с экспериментом		Nэл
			NOx	CO	
Метод построения реакторной модели по структуре потока					
[4]	«простая» ¹ камера сгорания А	метан	–	$\delta = 15\%$	8
[4]	«сложная» ² камера сгорания В	jet А	–	$\delta < 20\%$ режим малого газа $\delta > 100\%$ режим полной тяги	15 + 15
[4]	«сложная» камера сгорания D	jet А	–	$\delta < 20\%$ режим малого газа $\delta > 100\%$ режим полной тяги	18
[5]	«сложная»	природный газ	$\delta < 10\%$	$\delta < 1\%$ ^{3,8}	31
[6]	«сложная»	метан	–	$\delta < 50\%$ $\alpha > 1,54$ $\delta > 100\%$ $\alpha < 1,54$	16
[7]	«сложная»	природный газ	$\delta < 25\%$	$\delta > 100\%$ в отдельных точках	18
[8]	«сложная»	керосин	$\delta < 8\%$ ⁴	– ⁵	6
[9]	«сложная»	синтез-газ	$\delta < 27\%$	$\delta = 40–60\%$	12
[10]	«простая»	пропан	–	$\delta = 16\%$	4
«Автоматический» метод построения реакторной модели					
[11] ⁶	«простая»	природный газ; суррогат керосина	–	$\delta = 10–20\%$	320
[11] ⁶	«сложная»	суррогат керосина	–	$\delta \approx 20\%$ ⁸	100
[12] ⁷	«сложная»	метан	–	$\delta > 50\%$	5551

Примечание:

¹ «простая» конструкция – без подвода вторичного воздуха в зону горения;

² «сложная» конструкция – с подводом вторичного воздуха в зону горения;

³ $[CO]_{расч} \approx [CO]_{экс} \approx 2 \text{ ppm}$;

⁴ на режимах с малым содержанием NOx ($EINOx < 2$) различие достигает ~ 30 %;

⁵ авторы работы [8] отмечают необходимость повышения точности расчетов выбросов CO;

⁶ реакторы формировались по распределению температуры и топлива;

⁷ реакторы формировались по распределению температуры и осевой составляющей скорости;

⁸ приведены результаты расчетов выбросов CO для отдельного (единичного) режима.

В работах [4–10] приведены данные расчетов выбросов CO по реакторным моделям камер сгорания, построенных по структуре потока.

В работе [4] рассмотрены четыре камеры сгорания с условными обозначениями А, В, С и D.

Рассмотренные камеры сгорания работали как на метане, так и на жидком керосине. В случае метана в моделировании применялся детальный механизм химической кинетики GRIMECH 3.0 (53 компонента, 325 реакций). Интересно отметить, что в случае жидкого керо-

сина применялся тот же механизм, однако в камеру сгорания подавался пропан со скорректированным по теплотворным способностям массовым расходом. Это позволило существенно сократить время моделирования, т.к. детальные механизмы окисления многокомпонентного жидкого топлива типа авиационного керосина на порядок «тяжелее».

Распределение воздуха и топлива получено по результатам трехмерного моделирования холодной продувки всех четырех камер сгорания.

Камера сгорания А – трубчатая камера сгорания упрощенной конструкции. Она смоделирована восьмью реакторами, из которых пять пристеночные.

По заключению автора работы [4] результаты расчета камеры сгорания А упрощенной конструкции позволяют сделать вывод о возможности расчета «реальных» камер сгорания ГТД по комбинированному методу (CFD + реакторный метод).

Камера сгорания В – кольцевая камера сгорания с 12 горелками. Реакторная модель камеры сгорания В построена для двух продольных сечений: первое – в следе за горелками; второе – в зоне между горелками.

Течение в следе за горелками камеры сгорания смоделировано 15 реакторами. В первичной зоне зона обратных токов моделировалась четырьмя реакторами. Также четыре реактора были использованы для оценки образования/выгорания СО в пристеночной области. Промежуточная зона, как и зона разбавления, моделировались одним центральным реактором и двумя пристеночными реакторами. Газосборник камеры сгорания моделировался единичным реактором.

Течение в зоне между горелками моделировалось реакторной сетью с той же вышеописанной структурой.

Камера сгорания С исключена из рассмотрения, т.к. для нее в работе [4] приведены только расчетные исследования без сравнения результатов расчета с экспериментом.

Камера сгорания D – кольцевая камера сгорания с 24 горелками. Первичная зона камеры сгорания D смоделирована четырьмя центральными и четырьмя пристеночными реакторами. В промежуточной области один центральный и два пристеночных реактора. В зоне разбавления два центральных и четыре пристеночных реактора. Газосборник смоделирован единичным реактором.

Течение в зоне между горелками не моделировалось ввиду относительно малого расстояния между ними.

В работе [5] исследовалась кольцевая камера сгорания с предварительной подготовкой ТВС. Количество горелок – 14, в горелках организован подвод пилотного топлива.

Трехмерное моделирование исследуемой камеры сгорания выполнено в программном комплексе Star-CD Version 3.24. Расчетная сетка состоит из пяти миллионов ячеек. Модель горения – EDM (Eddy Dissipation Model) с добавлением уравнения Аррениуса для расчета скоростей химических реакций. Применялся глобальный восьмиступенчатый механизм химической кинетики. Топливный газ состоял из метана с небольшим количеством азота – адиабатическая температура пламени такой смеси соответствовала природному газу, применяемому при испытаниях.

В работе [5] построенная по результатам CFD моделирования реакторная модель камеры сгорания состоит из 31 элемента со следующими зонами:

- зона «основного» пламени, состоящая из внутреннего, центрального и внешнего потоков горючей смеси;
- зона пилотного пламени;
- центральная зона обратных токов;
- периферийная зона обратных токов;
- постпламенная зона – зона смешения и догорания СО.

Зоны пламени моделировались двумя-тремя последовательно расположенными реакторами. Оценка параметров массообмена зон рециркуляции выполнена интегрированием по изоповерхности с нулевым значением осевой составляющей скорости потока.

Отметим, что зона «основного» пламени была разделена на три потока для более детального учета несовершенства смешения топлива и воздуха в горелочном устройстве. Потoki различаются по массовому расходу и составу горючей смеси. В работе показано, что реакторные модели без учета радиальной неравномерности на выходе из горелочного устройства занижают выбросы NOx в три раза по сравнению с экспериментом.

Также, в работе [5] показано, что при построении реакторных моделей важно учитывать не только радиальную, но и окружную неравномерность состава смеси на выходе из горелки. Получено, что прирост выбросов NOx, вызванный окружной неравномерностью, достигает 20 %.

Расчеты выполнены на режиме полной нагрузки с варьированием доли пилотного топлива. Механизм химической кинетики – GRIMECH 3.0.

Нужно отметить, что работа [5] больше посвящена исследованию выбросов NOx нежели CO (это справедливо для большинства работ с применением комбинированного метода) и, к сожалению, не приводит данных для всего диапазона режимов работы ГТД (от α_{\min} до α_{\max}).

В работе [6] исследовалась трубчатая камера сгорания с пленочным охлаждением и предварительной подготовкой ТВС. Режимные параметры: давление 9,9 атм; температура воздуха на входе – 646 К; температура топлива (метана) – 305 К; коэффициент избытка воздуха горелки – $\alpha = 1,25-2,0$.

При построении реакторной модели камеры сгорания принято допущение о Гауссовом (нормальном) распределении коэффициента избытка воздуха в жаровой трубе. Следуя этому допущению, топливо и воздух распределены таким образом, что у верхнего ряда реакторов (см. рис. 1) наиболее «бедный» состав смеси, у нижнего ряда – наиболее «богатый». Состав на выходе из центрального ряда реакторов, через который проходит 40 % газа, соответствует суммарному коэффициенту избытка воздуха в камере сгорания.

Механизм химической кинетики – GRIMECH 2.11 (CH₄ + воздух).

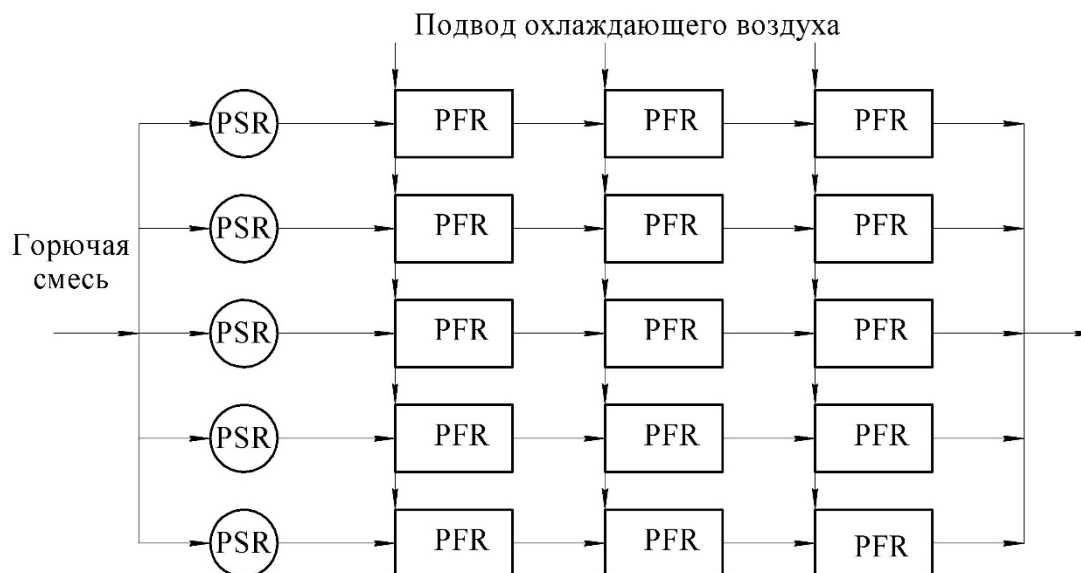


Рис. 1. Реакторная модель [6]

В работе [6] отмечено, что основным источником монооксида углерода является наиболее «бедный» сегмент реакторной модели, а основным источником оксидов азота – наиболее «богатый».

Объем реакторов подбирался таким образом, чтобы время пребывания горючей смеси в них составляло 2–3 мс. Это позволило получить устойчивое горение даже в самых «бедных» реакторах.

В работе вводится параметр, характеризующий несовершенство смешения топлива с воздухом. Расчеты с учетом несовершенства смешения успешно согласуются с экспериментом по выбросам СО на режимах с $\alpha > 1,54$. На более «богатых» режимах расчетные выбросы СО существенно превышают экспериментальные, однако, качественная расчетная зависимость $[CO] = f(\alpha)$ согласуется с результатами измерений. Важно отметить, что в расчетах с однородной по составу смесью выбросы СО ни количественно, ни качественно не согласуются с экспериментом.

Подход, примененный в работе [6], позволил получить важные данные о влиянии неравномерности состава горючей смеси на выбросы монооксида углерода. Поэтому эта работа включена авторами в обзор, несмотря на то, что расчетные исследования в ней выполнены без применения результатов трехмерного моделирования (не по комбинированному методу).

В работе [7] исследовалась модель камеры сгорания наземного ГТД с предварительным смешением топлива, с двумя завихрителями для стабилизации пламени основного и пилотного топлива. Испытания выполнены на режимах от малого газа до номинального в условиях стандартного, холодного и жаркого дня. Давление – атмосферное.

CFD моделирование выполнено в ПК STAR-CCM+. Модель турбулентности – realizable k-ε, модель горения PCFM – Partially Premixed Coherent Flame Model.

Реакторная модель камеры сгорания состоит из 17 реакторов идеального смешения и одного реактора идеального вытеснения. Реакторы PSR использовались в зонах со случайным распределением направления векторов скоростей. В то время, как реактор PFR использовался в зоне с однонаправленным течением – газосборнике.

Расположение пламени основного и пилотного топлива определено по распределению температуры и параметра «flame area density». Основная, периферийная зоны рециркуляции и зона рециркуляции пилотного топлива определены по распределению скоростей и температуры. Постпламенные зоны определены по температуре.

Зона пламени основного топлива разделена на три потока. При этом часть газа из внешнего потока поступает в постпламенную пристеночную зону. Постпламенная зона разделена на два потока – промежуточный и пристеночный, которые затем объединяются в один центральный постпламенный поток с относительно равномерным распределением температуры. Зона пилотного пламени моделировалась двумя последовательно расположенными реакторами PSR.

Механизм химической кинетики – GRIMECH 3.0.

Состав ТВС на выходе из основного завихрителя принят однородным в окружном направлении. В радиальном направлении принят как однородный состав, так и неоднородный – линейное распределение коэффициента избытка топлива φ по радиальной координате r ; при этом внешнему потоку соответствует минимальное φ , внутреннему – максимальное. Состав смеси на выходе из пилотного контура принят равномерным.

Авторами работы [7] отмечено, что реакторная модель, построенная с учетом неоднородности состава горючей смеси на выходе из горелки, лучше предсказывает выбросы СО по сравнению с моделью без учета неоднородности. Также, реакторная модель корректно предсказала снижение выбросов монооксида углерода с повышением температуры окружающей среды.

В работе [8] исследовалась модель одnogорелочного отсека диффузионной камеры сгорания. Во фронтальном устройстве камеры сгорания организовано три соосных ввода с закруткой потока.

Трехмерное CFD моделирование выполнено с моделью турбулентности k - ϵ и «квазиравновесной» моделью химической кинетики, в которой температура и плотность потока являются функцией восстановленной концентрации топлива Z . Количество расчетных элементов порядка 10^6 . Трехмерное моделирование выполнено на режиме: $p = 11,3$ атм; $T = 733$ К; $\alpha = 2,98$; $\tau = 7$ мс.

Разработанная реакторная модель камеры сгорания состоит из 6 реакторов, характерные зоны определены по распределению параметра Z . В прифронтальной зоне организован один «богатый» и два «бедных» гомогенных реактора. Пристеночная зона моделируется системой из двух параллельно расположенных реакторов, один моделирует зону непосредственной у стенки, второй более «богатую» зону, расположенную ближе к основному потоку. Отмечено, что непосредственно у стенки однозначная связь между Z и T нарушается ввиду сложных процессов теплообмена. Время пребывания ТВС в реакторах составило 0,9–3,0 мс.

По результатам расчетов получено хорошее согласование экспериментальных и расчетных выбросов NO_x . Однако, применительно к оценке выбросов CO , авторы работы [8] отмечают необходимость повышения точности расчетов.

Механизм химической кинетики – JP10Det (топливо – керосин, 62 компонента, 316 реакций).

Авторы работы [8] выделяют две основные проблемы создания реакторных моделей диффузионных камер сгорания: моделирование зоны пламени и моделирование пристеночной области.

В работе [9] исследовалась модель трубчатой противоточной камеры сгорания с отдельной подачей топлива и воздуха. Фронтное устройство с радиальным завихрителем.

Измерение вредных выбросов выполнено на режимах с давлением от 1 до 3,5 атм. Имитировались режимы 100 %, 80 % и 60 % от полной мощности. В качестве топлива использовался синтез-газ составом 37 % H_2 , 48 % CO и 15 % N_2 по объему.

Трехмерное моделирование выполнено с помощью модели горения realizable k - ϵ и модели горения Eddy Dissipation Concept. Разбиение жаровой трубы на реакторы выполнено по распределению температуры и состава смеси.

Реакторная модель камеры сгорания состоит из 10 реакторов PSR и двух реакторов PFR. Отметим, что течение в следе за завихрителем разделено на три потока по радиальной координате аналогично работе [5].

Авторы выделяют следующие зоны реакторной модели: богатые зоны в центральной части жаровой трубы (зона рециркуляции и ближний след за ней); высокотемпературные зоны ($T > 1800$ К); зоны средних температур ($T = 1500$ – 1800 К); низкотемпературные зоны ($T = 298$ – 1500 К) и зоны близкие по составу к воздуху.

В расчетах использовался детальный механизм химической кинетики окисления синтез-газа «You-Ranzi».

В работе [10] исследовалась малогабаритная камера сгорания с предварительной подготовкой ТВС. Диаметр жаровой трубы модели – 19,5 мм, длина – 80 мм.

CFD моделирование выполнено с моделью турбулентности SST и моделью горения EDM/FRC (Eddy Dissipation / Finite Rate Chemistry). Применялся глобальный двухшаговый механизм окисления пропана. Исследовался режим: $p = 1$ атм; $T_{\text{вх}} = 300$ К, $\alpha = 2,0$.

Разработанная реакторная модель камеры сгорания состоит из четырех реакторов. Два реактора – PSR + PFR моделируют зону обратных токов и зону догорания топлива основного потока. Два других реактора – PSR + PFR моделируют пристеночную область. Механизм химической кинетики – GRIMECH 3.0.

В работе [10] отмечено, что при $\alpha > 1,5$ – $1,8$ выбросы монооксида углерода из исследуемой малогабаритной камеры сгорания большей частью вызваны «замораживанием» процессов горения в относительно холодной пристеночной области.

Работы [11, 12] посвящены «автоматическому» построению реакторных моделей.

В работе [11] приведены результаты расчетов выбросов монооксида углерода из модельной камеры сгорания с уголковым стабилизатором пламени и модели камеры сгорания с предварительной подготовкой ТВС.

CFD моделей камер сгорания выполнено в ANSYS Fluent 18.0. Модель горения – Flamelet. Турбулентность моделировалась с помощью подхода LES (Large Eddy Simulation – моделирование крупных вихрей).

В качестве топлива применялся природный газ и суррогат керосина (н-декан (80 %) и бензол (20 %) – в объемном соотношении). Для природного газа применялся механизм GRIMECH 3.0, для суррогата керосина – PoliMi. Реакторная модель построена автоматически средствами ПК ANSYS.

Огневые испытания выполнены на режимах: $\alpha = 1,1$ – $1,5$, $T_{вх} = 373$ – 423 К – для модели с уголковым стабилизатором и $\alpha = 2,3$; $T_{вх} = 423$ К – для модели камеры сгорания с предварительной подготовкой ТВС. Давление – атмосферное.

В работе [12] исследована модель диффузионной КС на режиме с атмосферным давлением, температурой воздуха на входе 320 К и номинальным коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,2$.

CFD моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent на расчетной сетке с 1,78 млн ячеек. Модель турбулентности – k - ω SST, модель лучистого теплообмена – P1, модель горения – EDC (Eddy Dissipation Concept), применялся глобальный трехшаговый механизм окисления метана.

Расчетная область CFD модели камеры сгорания была разбита на сеть реакторов идеального смешения с помощью специально разработанной пользовательской функции (UDF – User Defined Function). В такой функции задается набор диапазонов для параметров, по которым производится селекция расчетных ячеек CFD результата в реакторы. Соседние ячейки, параметры которых попадают по значениям в определенный интервал, объединяются в общий реактор. В работе [12] использованы интервалы по температуре ($\Delta T = 100$ К) и по осевой составляющей скорости ($\Delta u = 2,5$ м/с). Разработанная реакторная модель состояла из 5551 реактора PSR. Стоит отметить, что при оценке массообмена между реакторами учитывались как конвективный (адвективный) перенос массы, так и перенос из-за турбулентной диффузии.

Расчеты реакторной модели выполнены с помощью детального механизма химической кинетики окисления метана C_0 - C_{22} , состоящего из 103 компонентов и 582 реакций.

Отметим, что работ с применением комбинированного метода расчета выбросов вредных веществ из камер сгорания ГТД достаточно много [1]. Однако, большинство из них посвящены оценке выбросов оксидов азота NOx и, поэтому, не включены в настоящий обзор.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБЗОРА

Работы, рассмотренные в настоящем обзоре, охватили широкий круг моделей камер сгорания, существенно различающихся как по конструкции, так и по значениям рабочих параметров. Приведены расчеты трубчатых и кольцевых, прямоточных и противоточных камер сгорания, камер сгорания с раздельной подачей топлива и подачей подготовленной ТВС. В том числе рассмотрены работы со сложной конструкцией фронтального устройства – с организацией подвода пилотного топлива, с несколькими завихрителями и т.д.

Параметры рабочего процесса моделей камер сгорания варьировались в диапазонах: по давлению от 1 до 20 атм; по температуре воздуха на входе от 300 до 733 К; по суммарному

коэффициенту избытка воздуха от 1,1 до 3,0. В качестве топлива применялись метан, природный газ, пропан, синтез-газ, авиационный керосин, суррогат керосина.

В CFD расчетах наибольшее применение нашли модели турбулентности RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) подхода. Модели горения варьировались у авторов в зависимости от условий организации рабочего процесса в камере сгорания.

Во всех рассмотренных работах расчетные модели камер сгорания построены с помощью реакторов идеального смешения PSR и идеального вытеснения PFR. Объясняется это относительной простотой математических моделей этих реакторов, что позволяет производить быстрые вычисления на персональных компьютерах. Существуют также различные вариации математической модели реактора неполного смешения PaSR (Partially Stirred Reactor). PaSR позволяет учесть влияние процессов смешения на образование вредных веществ. Однако, математическая модель такого реактора менее однозначна, существенно сложнее и требует применения стохастических (вероятностных) процессов. Это значительно увеличивает расчетное время. Например, если реактор идеального смешения рассчитывается менее чем за одну секунду, то при прочих равных, расчет реактора неполного смешения займет несколько минут [13]. Ввиду этих причин, в настоящее время, PaSR менее распространен.

Количество реакторов варьируется от 4 до 31 при построении реакторной модели на базе структуры потока и от нескольких сотен до нескольких тысяч при «автоматическом» построении (отметим, что имеются работы, посвященные оценке выбросов NOx, с количеством реакторов порядка 100000 [14]).

Сравнивая оба подхода, интересно отметить, что увеличение количества реакторов от нескольких десятков до нескольких тысяч не обязательно приводит к повышению точности расчетов выбросов CO. Можно предположить, что это вызвано некорректной оценкой розжига/нерозжига смеси в реакторах, близких по составу к границе «бедного» срыва. Большое количество таких реакторов в «автоматически» построенной модели может усложнить оценку образования/выгорания монооксида углерода. Напротив, в реакторных моделях, построенных по структуре потока, организовано несколько низкотемпературных реакторов (как правило пристеночных) на базе допущения о розжиге в них смеси. Такое допущение справедливо при высокой полноте сгорания топлива и позволяет уйти от задачи оценки локального срыва пламени.

Рядом авторов отмечена необходимость учета неоднородности горючей смеси по составу для корректной оценки выбросов CO. Для этого предлагается разделять течение на несколько потоков по высоте (для учета радиальной неравномерности), отдельно выделять низкотемпературные зоны (как правило пристеночные).

Применительно к точности расчетов выброса монооксида углерода отметим, что хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных получено только для моделей камер сгорания упрощенной конструкции. Для моделей, близких по сложности конструкции к «реальным» камерам сгорания, точность оценки выбросов CO неудовлетворительна, либо представлено хорошее соответствие с экспериментом только на отдельных (единичных) режимах.

Таким образом, дальнейшее развитие комбинированного метода (CFD + реакторный метод) расчета выбросов CO является актуальной задачей.

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД С ОТСЛЕЖИВАНИЕМ «БЕДНЫХ» СТРУЕК ТВС

Для повышения точности оценки выбросов монооксида углерода авторами настоящей работы предложен комбинированный метод расчета по реакторной модели камеры сгорания с отслеживанием «бедных» струек ТВС [15, 16]. Под «бедной» стружкой понимается поток горючей смеси с адиабатической температурой продуктов сгорания $T_{adia} = 1450$ К. При такой температуре скорость окисления CO до CO₂ относительно мала, однако еще нет полного «замораживания» пламени.

Выявление «бедных» струек осуществляется обработкой распределения объемной доли азота $r(N_2)$ в расчетной области CFD результата. В выбранных характерных сечениях выявляются зоны с малым содержанием топлива (с высокими значениями $r(N_2)$), которые затем группируются в одну «бедную» струйку, состав которой соответствует $T_{adia} = 1450$ К. В реакторной модели эта струйка моделируется отдельным реактором. Такой подход позволяет более детально учесть наличие «бедных» низкотемпературных зон во всем рабочем объеме камеры сгорания – будь то в пристеночной области или в следах подвода основного воздуха.

Содержание азота выбрано в качестве рабочего параметра для выявления и отслеживания «бедных» струек ввиду того, что азот не участвует в реакциях горения при применении в CFD моделировании одно- двухшаговых глобальных кинетических механизмов и, соответственно, его содержание однозначно определяет состав горючей смеси.

Комбинированный метод с отслеживанием «бедных» струек апробирован на камере сгорания наземного ГТД, введенного в эксплуатацию и работающего на природном газе. Получено хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных – расхождение составило 7–23% в диапазоне по составу смеси $\alpha = 2,7–5,5$.

При апробации реакторная модель была построена «в ручную», однако, имеется возможность автоматизировать построение реакторной модели камеры сгорания по предлагаемому методу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен обзор работ, посвященных расчетной оценке выбросов CO по реакторной модели камеры сгорания ГТД, построенной на базе результатов трехмерного моделирования. Отмечено, что требуется дальнейшее развитие комбинированного метода. В рассмотренных работах, хорошее согласование расчетных и экспериментальных зависимостей $[CO] = f(\alpha)$ получено только для моделей с простой конструкцией. Для моделей с конструкцией близкой по сложности к «реальным» камерам сгорания уровень выбросов монооксида углерода прогнозируется либо с неудовлетворительной точностью (расхождение более 30–40 %), либо представлены данные только на отдельных (единичных) режимах.

Рядом авторов отмечено существенное влияние неоднородности состава смеси на выбросы монооксида углерода. Поэтому, для повышения точности расчетов по комбинированному методу необходимо, в первую очередь, более детально учитывать неравномерность процессов смешения.

Также подчеркивается проблема моделирования реакторами низкотемпературной пристеночной области, в которой скорость окисления CO до CO₂ мала.

На основании проведенного обзора, авторами настоящей работы предложен комбинированный метод расчета выбросов CO по реакторной модели камеры сгорания с отслеживанием «бедных» струек ТВС. Предложенный метод апробирован на камере сгорания наземного ГТД. Получено хорошее согласование экспериментальных и расчетных концентраций монооксида углерода в продуктах выхлопа в диапазоне $\alpha = 2,7–5,5$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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. Pp. 551-570.
2. **Turns S. R.** An Introduction to Combustion: concepts and applications. McGraw-Hill series in mechanical engineering. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill, 2000. 676 p.
3. **Rutar T., Malte P. C.** NOx formation in high-pressure jet-stirred reactors with significance to lean-premixed combustion turbines // J. Eng. Gas Turbines Power. 2002. Vol. 124 (4). Pp. 776-783.
4. **Marchand M. D.** Multi-Dimensional Carbon Monoxide Emissions Predictor for Preliminary Gas Turbine Combustor Design Optimization. Master Thesis. Aerospace Studies University of Toronto, 2013. P. 121.

5. **Chemical** Reactor Network Application to Emissions Prediction for Industrial DLE Turbine / I. V. Novosselov, et al. // ASME Turbo Expo 2006. 2006. Pp. 221-235.
6. **Chemical** Reactor Modeling Applied to the Production of Pollutant Emission in LP Combustors / D. G. Nicol, et al. // 33rd AI-AA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (Seattle, WA -1997). 1997.
7. **Prediction** of NOx and CO emissions from an industrial lean-premixed gas turbine combustor using a chemical reactor network model / J. Park, et al. // Energy Fuels. 2013. Vol. 27 (3). Pp. 1643-1651.
8. **Разработка** реакторных моделей диффузионной камеры сгорания для сравнительного анализа детальных и редуцированных кинетических схем горения углеводородных топлив / В. М. Захаров [и др.] // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45, № 2. С. 20–28. [V. M. Zaharov, et al., "Development of diffusion combustor reactor models for comparative analysis of detailed and reduced kinetic schemes of hydrocarbon fuels combustion", (in Russian), in *Fizika goreniya i vzryva*, vol. 45, no. 2, pp. 20-28, 2009.]
9. **Experimental** and numerical studies of pressure effects on syngas combustor emissions / H. Wang, et al. // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 102. Pp. 318-328.
10. **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, no. 4 (86). Pp. 84-92.
11. **Матвеев С. С.** Методика определения эмиссии оксидов углерода камерами сгорания газотурбинных двигателей с использованием детальной химической кинетики окисления суррогатов керосина: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05. Самара, 2017. [S. S Matveev, *Method for determining the emission of carbon oxides from gas turbine combustion chambers using detailed chemical kinetics of oxidation of kerosene surrogates*: Cand. Tech. Sci. Diss., (in Russian). Samara, 2017.]
12. **Detailed** emissions prediction for a turbulent swirling nonpremixed flame / R. F. D.Monaghan, et al. // Energy Fuels. 2013. Vol. 28 (2). Pp. 1470-1488.
13. **A reactor** network model for predicting NOx emissions in gas turbines / V. Fichet, et al. // Fuel. 2010. Vol. 89, iss. 9. Pp. 2202-2210.
14. **Numerical** modeling of NOx formation in turbulent flames using a kinetic post-processing technique / A. Cuoci, et al. // Energy Fuels. 2013. Vol. 27 (2). Pp. 1104-1122.
15. **Кутлумухамедов А. Р., Скиба Д. В., Бакиров Ф. Г.** Разработка реакторной модели камеры сгорания с отслеживанием «бедной» струйки топливовоздушной смеси для расчета выбросов монооксида углерода // Молодежный Вестник УГА-ТУ. 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.]
16. **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 до-кладов 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.]

ОБ АВТОРАХ

КУТЛУМУХАМЕДОВ Артур Рамилевич, асп. каф. АТИТ УГАТУ.

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

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

KUTLUMUKHAMEDOV, Artur Ramilevich, Postgraduate student (USATU).

SKIBA, Dmitriy Vladimirovich, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher in the Dept. of Aviation of the thermal engineering and heat power engineering (USATU).

BAKIROV, Fedor Gayfullovich, Dr. of Tech. Sci., Prof. in the Dept. of Aviation of the thermal engineering and heat power engineering (USATU).

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 1 (95), pp. 69-80, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).