

УДК 621.45.022.5

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА УРОВЕНЬ ВЫБРОСОВ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА С ПОМОЩЬЮ РЕАКТОРНОЙ МОДЕЛИ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

А. Р. Кутлумухамедов¹, Д. В. Скиба², Ф. Г. Бакиров³

¹ kutlum22@mail.ru, ² d.skiba@teplophysics.ru, ³ fgbakirov@bk.ru

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

Поступила в редакцию 16.11.2019

Аннотация. Приведены результаты расчетных исследований влияния отдельных факторов на уровень выбросов монооксида углерода (СО) от малогабаритной камеры сгорания с предварительной подготовкой топливовоздушной смеси. Исследовалось влияние состава смеси, температуры воздуха на входе в камеру, температуры газов в пристеночной области и давления в камере сгорания. Построены соответствующие зависимости. Расчеты выполнены с помощью реакторной модели камеры сгорания, построенной на базе результатов трехмерного CFD-моделирования.

Ключевые слова: камера сгорания; вредные выбросы; монооксид углерода (СО); трехмерное моделирование; реакторная модель; теплообмен; химическая кинетика.

ВВЕДЕНИЕ

Разработчики малоэмиссионных камер сгорания ГТД все чаще сталкиваются с проблемой ограничения выбросов монооксида углерода СО. Вызвано это, главным образом, двумя причинами: жесткими требованиями по допустимым концентрациям оксидов азота (NO_x) в продуктах выхлопа и необходимостью работы ГТД в широком диапазоне мощностей.

Основная концепция снижения выбросов NO_x – сжигание заранее подготовленной обедненной топливовоздушной смеси. При этом температура в зоне горения не превышает ~1800 К, что и ограничивает образование оксидов азота по термическому механизму. Однако снижение температуры замедляет реакции окисления топлива и продуктов неполного сгорания. Этот факт, в сочетании с «замораживанием» горения в холодной пристеночной области, может привести к недопустимо высоким концентрациям СО на выходе.

Необходимость работы ГТД в широком диапазоне мощностей усугубляет проблему выбросов СО. При переходе на режимы малой мощности температура в зоне горения падает, следовательно, растет выброс монооксида углерода.

Отметим, что проблема выбросов СО особенно остро встает перед малогабаритными камерами сгорания. Как правило, для них характерно меньшее время пребывания топливовоздушной смеси τ в зоне горения. По этой причине, СО не успевает полностью окислиться до СО₂. Кроме того, у малогабаритных камер сгорания больше отношение площади поверхности жаровой трубы к ее объему (S/V). Это увеличивает относительный вклад гашения пламени в холодной пристеночной области на общий уровень выбросов СО.

В связи с вышеизложенным, актуальны расчетно-экспериментальные исследования процессов образования/выгорания монооксида углерода и развитие методик расчета

концентраций СО на выходе из камер сгорания ГТД.

В настоящей работе приведены результаты расчетов малогабаритной камеры сгорания с предварительной подготовкой топливовоздушной смеси [1]. Исследовалось влияние состава смеси, температуры воздуха на входе в камеру, температуры газов в пристеночной области и давления в камере сгорания на уровень выбросов СО. Расчеты выполнены с помощью комбинированного метода [2, 3], в котором реакторная модель камеры сгорания строится на базе результатов трехмерного *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) моделирования. Основное достоинство комбинированного метода – возможность проведения относительно быстрых вычислений с применением детальных механизмов химической кинетики с учетом основной структуры течения газов в камере сгорания.

ИССЛЕДУЕМАЯ КАМЕРА СГОРАНИЯ

Схема исследуемой камеры сгорания приведена на рис. 1 [1]. Камера состоит из трубчатой жаровой трубы диаметром 19,5 мм и длиной 80 мм. Стенки жаровой трубы выполнены из кварцевого стекла, что позволяет визуально контролировать положение пламени. Основная топливовоздушная смесь подается через завихритель. Дополнительно в центр камеры подается пилотная топливовоздушная смесь для поддержания устойчивости горения. Некоторое количество топлива подается в пристеночную область камеры.

Рабочее давление внутри камеры – атмосферное, суммарный коэффициент избытка воздуха $\alpha_{\Sigma}=2,0$, топливо – пропан (C_3H_8) [1].

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

На первом этапе построения расчетной модели исследуемой камеры сгорания было выполнено трехмерное *CFD* моделирование. Использовались модель турбулентности *SST*; модель горения *Eddy Dissipation – Finite Rate Chemistry (EDM/FRC)* и упрощенный двухшаговый механизм реакций окисления пропана [4]. Суммарное количество расчетных элементов составило порядка 5 млн.

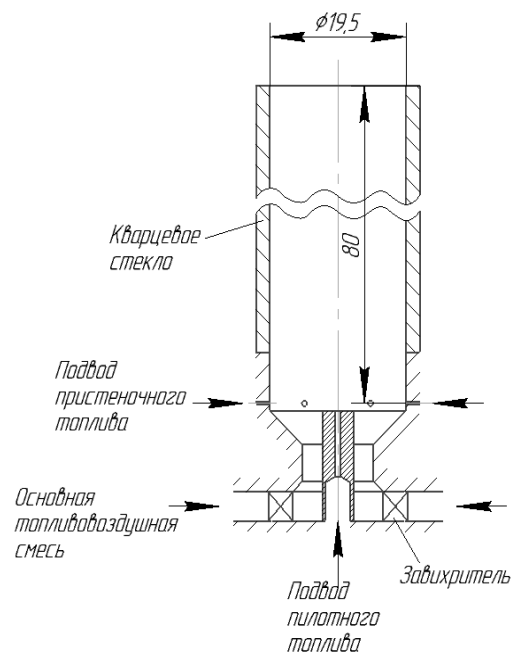


Рис. 1. Схема исследуемой камеры сгорания

Далее по результатам *CFD*-моделирования (объем зоны обратных токов, распределение скоростей и топлива) была построена реакторная модель камеры сгорания, состоящая из четырех реакторов (рис. 2).

Зону обратных токов моделировал реактор идеального смешения *PSR* (*Perfectly Stirred Reactor* [5]). Зона догорания моделировалась реактором идеального вытеснения *PFR* (*Plug Flow Reactor* [5]).

Пристеночная область камеры сгорания моделировалась последовательно расположенными реакторами идеального смешения *PSR_w* и идеального вытеснения *PFR_w*. В реакторе *PSR_w* происходил розжиг горючей смеси, в реакторе *PFR_w* учитывался теплоотвод в пристеночной области. Для определения теплового потока использовались критериальные зависимости при течении газов внутри и снаружи трубы [6, 7] с учетом теплового излучения газов (CO_2+H_2O) к стенкам жаровой трубы [8]. При этом сделано допущение, что температура газа у стенки равна адиабатической температуре горючей смеси в пристеночной области, состав которой получен по результатам *CFD*-моделирования.

В расчетах применялся детальный механизм химической кинетики окисления пропана, включающий в себя 46 компонентов и 235 реакций.

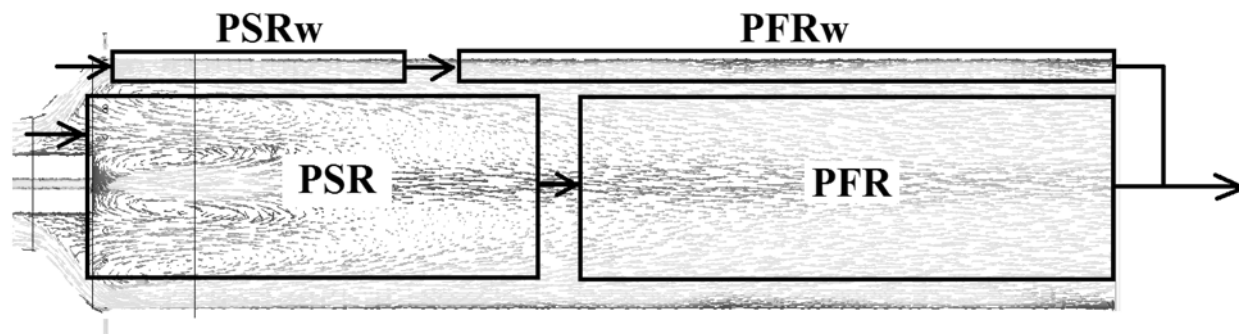


Рис. 2. Распределение скоростей и реакторная модель камеры сгорания

Данные по расчету концентраций CO на выходе из исследуемой камеры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов

Параметр	Значение
Концентрация монооксида углерода на выходе из камеры $[CO]_{\text{вых}}$, ppmv	84
Равновесная концентрация монооксида углерода на выходе из камеры $[CO]_{\text{равн}}$, ppmv	1
Объемная доля O_2 на выходе из камеры	0,105
Объемная доля H_2O на выходе из камеры	0,078
Объемная доля CO_2 на выходе из камеры	0,058
Адиабатическая температура газа на выходе из камеры T_{adia} , К	1511
Температура газа в пристеночной области $T_{w \text{ gas}}$, К	1355
Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м ² К)	10,4

Измеренные концентрации монооксида углерода на выходе из камеры сгорания составили порядка 100 ppmv [1], т.е. расхождение расчета с экспериментом составляет 15–20%.

Отметим, что по результатам проведенного CFD-моделирования с применением модели горения EDM/FRC расчетные концентрации CO на выходе из камеры сгорания составили порядка 5700 ppmv. Несоответствие с экспериментом можно объяснить применением упрощенной химической кинетики и сложностью моделирования процессов горения в пристеночной области [9].

Конечно, в CFD имеются и более успешные модели горения, разработанные специ-

ально для оценки вредных выбросов. Однако им присуще свои требования и недостатки (например, наличие высокопроизводительного вычислительного кластера и др.), что не является темой настоящей работы.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЫБРОСОВ CO ОТ СОСТАВА СМЕСИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ

С помощью разработанной реакторной модели камеры сгорания построена зависимость выбросов монооксида углерода от состава горючей смеси и температуры воздуха на входе в камеру (рис. 3, 4, табл. 2, 3).

Расчеты выполнены для двух значений температуры воздуха на входе в камеру – 300 К и 600 К. При этом условное время пребывания топлива и давление в жаровой трубе сохранялось постоянным ($\tau = 36$ мс, $P = 1$ атм), для чего расход горючей смеси на режиме с $T_{\text{вх}} = 600$ К был уменьшен (так как с ростом температуры уменьшается плотность смеси).

Условия охлаждения жаровой трубы также оставались постоянными – естественная конвекция в атмосферных условиях ($T_{\text{охл}} = 300$ К).

В расчетах на режимах с «бедным» составом смеси минимальный объем реактора PSR_w подбирался, исходя из обеспечения розжига смеси. Чем «беднее» смесь, тем больше отношение объема реактора PSR_w (V_{PSR_w}) к объему всей пристеночной области V_w .

Отметим некоторые особенности результатов расчета.

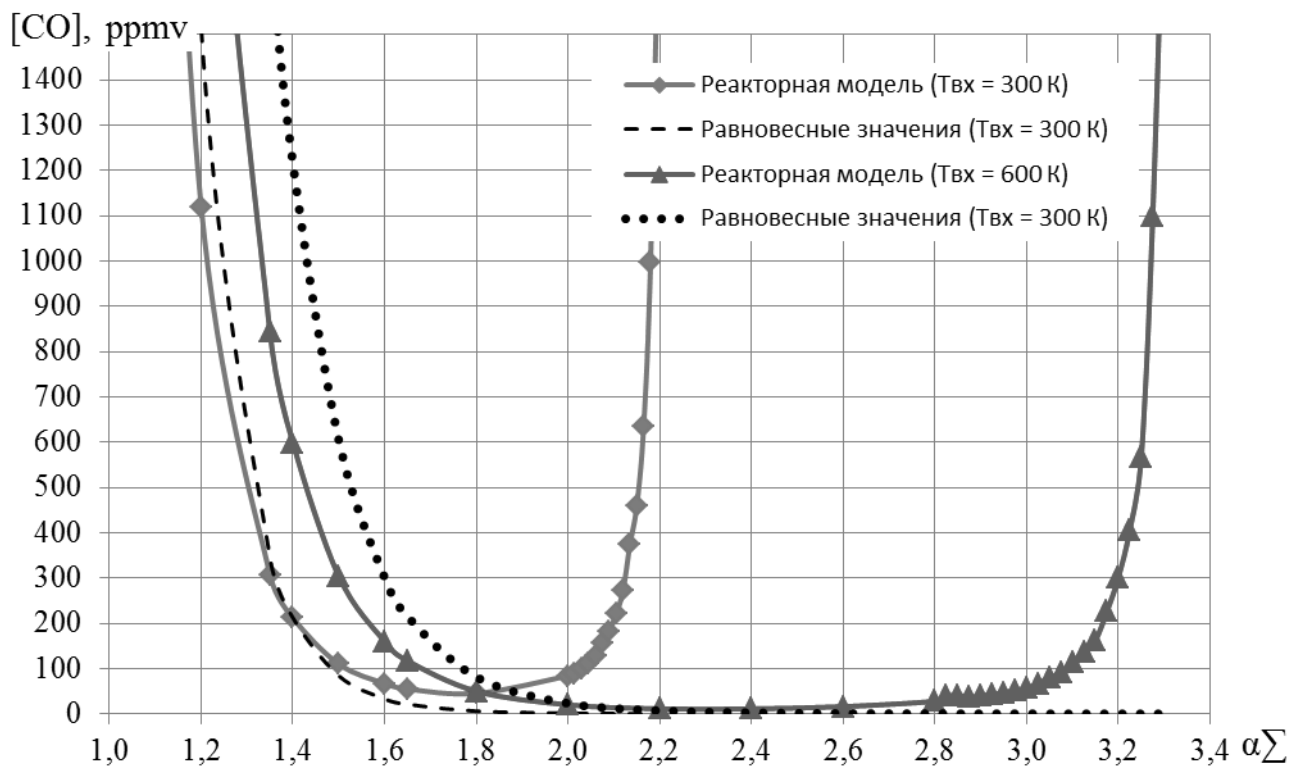


Рис. 3. Зависимость выбросов CO от суммарного коэффициента избытка воздуха и температуры воздуха на входе в камеру сгорания

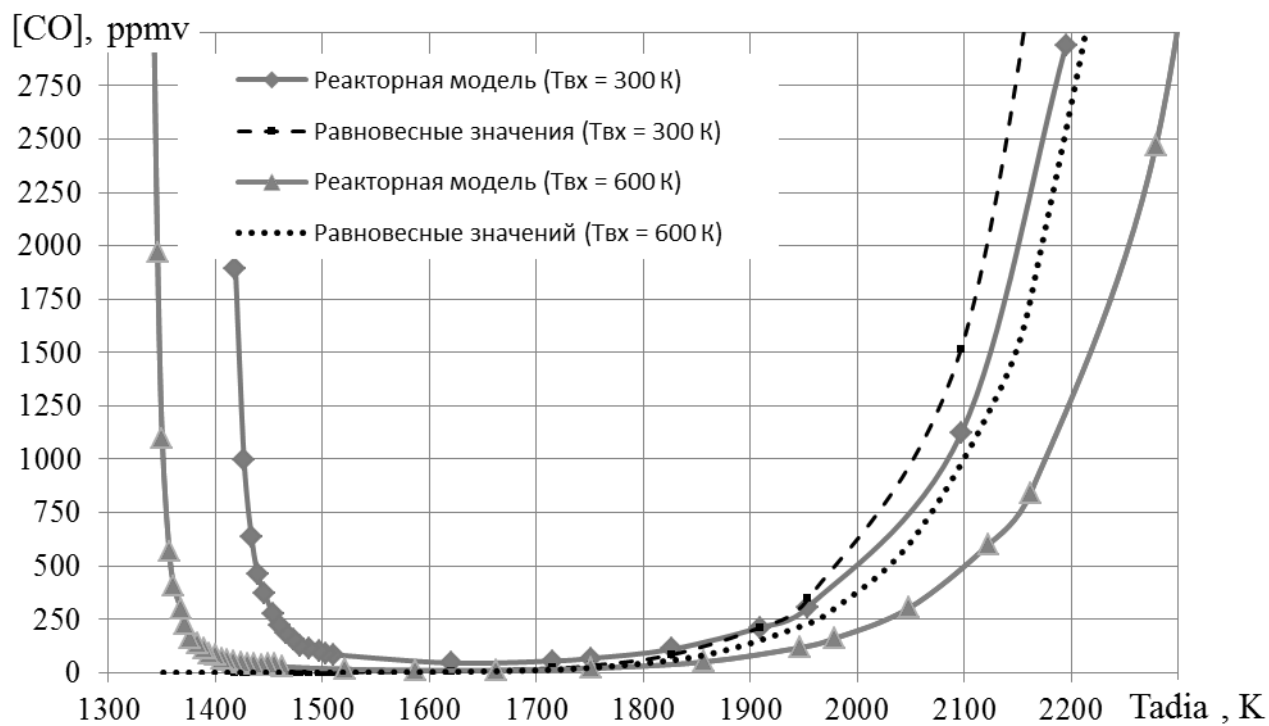


Рис. 4. Зависимость выбросов CO от адиабатической температуры газов на выходе из камеры сгорания

Таблица 2

Зависимость выбросов CO от состава смеси ($T_{\text{вх}} = 300 \text{ К}$, $T_{\text{охл}} = 300 \text{ К}$)

α_{Σ}	$[\text{CO}]_{\text{вых}}, \text{ppmv}$	$[\text{CO}]_{\text{равн}}, \text{ppmv}$	$[\text{CO}]_{\text{w}}/[\text{CO}]_{\text{вых}}$	$V_{\text{PSRW}}/V_{\text{w}}$	$T_{\text{adia}}, \text{К}$	$T_{\text{w gas}}, \text{К}$	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$
1,1	2938	4245	0,58	0,278	2195	1961	13,7
1,2	1120	1516	0,61	0,278	2097	1867	12,9
1,35	307	345	0,74	0,278	1954	1738	12,3
1,4	212	212	0,80	0,278	1909	1702	11,9
1,5	110	84	0,93	0,278	1827	1628	11,7
1,6	67	33	1,06	0,278	1751	1565	11,1
1,65	55	21	1,13	0,278	1716	1533	11,2
1,8	45	6	1,29	0,278	1621	1453	10,5
2	84	1	1,42	0,278	1511	1355	10,4
2,015	88	1	1,43	0,307	1503	1350	10,3
2,03	99	1	1,44	0,321	1497	1343	10,3
2,045	112	1	1,45	0,335	1488	1337	10,2
2,06	127	1	1,46	0,362	1480	1332	10,1
2,075	156	1	1,46	0,404	1474	1324	10,1
2,09	183	1	1,46	0,432	1466	1318	10
2,105	221	0	1,47	0,474	1460	1312	10
2,12	273	0	1,47	0,516	1454	1306	10
2,135	374	0	1,47	0,558	1446	1299	9,9
2,15	460	0	1,48	0,613	1440	1292	9,8
2,165	636	0	1,48	0,669	1434	1285	9,8
2,18	998	0	1,48	0,753	1427	1274	9,8
2,2	1892	0	1,48	0,836	1419	1255	9,7

Таблица 3

Зависимость выбросов CO от состава смеси ($T_{\text{вх}} = 600 \text{ К}$, $T_{\text{охл}} = 300 \text{ К}$)

α_{Σ}	$[\text{CO}]_{\text{вых}}, \text{ppmv}$	$[\text{CO}]_{\text{равн}}, \text{ppmv}$	$[\text{CO}]_{\text{w}}/[\text{CO}]_{\text{вых}}$	$V_{\text{PSRW}}/V_{\text{w}}$	$T_{\text{adia}}, \text{К}$	$T_{\text{w gas}}, \text{К}$	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$
1,1	5085	10269	0,32	0,278	2352	1991	16,4
1,2	2469	5091	0,27	0,278	2279	1910	15,8
1,35	843	1751	0,24	0,278	2162	1790	15,6
1,4	599	1216	0,25	0,278	2122	1762	15,3
1,5	304	605	0,28	0,278	2049	1705	14,7
1,6	160	301	0,33	0,278	1979	1644	14,7
1,65	117	215	0,36	0,278	1946	1620	14,5
1,8	50	81	0,48	0,278	1856	1550	14,3
2	20	23	0,75	0,278	1751	1478	13,5
2,2	11	7	1,09	0,278	1663	1411	13,2
2,4	11	2	1,27	0,278	1587	1352	13
2,6	16	1	1,44	0,278	1521	1301	12,9
2,8	28	0	1,46	0,278	1462	1261	12,5
2,825	39	0	1,46	0,278	1456	1256	12,4
2,85	41	0	1,46	0,278	1450	1254	12,2
2,875	37	0	1,43	0,278	1443	1246	12,4

Окончание табл. 1

α_Σ	$[\text{CO}]_{\text{вых}},$ ppmv	$[\text{CO}]_{\text{равн}},$ ppmv	$[\text{CO}]_{\text{w}}/[\text{CO}]_{\text{вых}}$	$V_{\text{PSRw}}/V_{\text{w}}$	$T_{\text{adia}},$ К	$T_{\text{w gas}},$ К	$k_s,$ Вт/(м ² К)
2,9	40	0	1,45	0,278	1437	1241	12,3
2,925	43	0	1,47	0,278	1431	1235	12,5
2,95	47	0	1,47	0,278	1424	1230	12,5
2,975	52	0	1,48	0,278	1418	1225	12,5
3	57	0	1,46	0,278	1411	1222	12,4
3,025	67	0	1,46	0,307	1407	1216	12,4
3,05	80	0	1,48	0,335	1400	1211	12,4
3,075	91	0	1,48	0,362	1394	1208	12,3
3,1	115	0	1,47	0,404	1390	1202	12,3
3,125	136	0	1,49	0,432	1383	1200	12,2
3,15	162	0	1,48	0,474	1377	1195	12,2
3,175	226	0	1,48	0,544	1372	1189	12,2
3,2	301	0	1,48	0,599	1368	1182	12,4
3,225	406	0	1,48	0,655	1361	1178	12,3
3,25	568	0	1,48	0,711	1357	1172	12,3
3,275	1100	0	1,48	0,808	1351	1160	12,3
3,3	1973	0	1,48	0,892	1346	1146	12,3
3,325	3438	0	1,48	0,990	1342	1120	12,2

При суммарном коэффициенте избытка воздуха более $\sim 2,1$ для ветви графика с $T_{\text{вх}}=300$ К (рис. 3) получено резкое увеличение количества монооксида углерода в продуктах сгорания. Это объясняется приближением к границе «бедного» срыва пламени и соответствующим уменьшением полноты сгорания топлива. Расчетная закономерность $[\text{CO}]=f(\alpha_\Sigma)$ в целом согласуется с экспериментом, что можно качественно проследить по экспериментальной зависимости полноты сгорания топлива от состава смеси, приведенной в работе [1]. Согласно экспериментальным данным:

- при $\alpha_\Sigma=1,6-2,0$ полнота сгорания топлива составляет порядка 99,9 %;
- при $\alpha_\Sigma=2,2$ полнота сгорания падает до 99,6 %;
- при $\alpha_\Sigma>2,2$ наблюдается резкое уменьшение полноты сгорания.

Т.е. согласно эксперименту рост выбросов СО происходит при $\alpha_\Sigma>2,0$.

Для ветви графика с $T_{\text{вх}}=600$ К резкое увеличение монооксида углерода в продуктах сгорания получено при $\alpha_\Sigma>3,15$, т.е. увеличение температуры на 300 К рас-

ширило границы работы камеры сгорания при низком уровне выбросов СО.

Минимальные расчетные концентрации монооксида углерода на ветви $T_{\text{вх}}=300$ К составили 45 ppmv при $\alpha_\Sigma = 1,8$, на ветви $T_{\text{вх}}=600$ К – 11 ppmv при $\alpha_\Sigma = 2,2-2,4$.

По мере дальнейшего движения вдоль графика к «богатому» составу горючей смеси расчетные концентрации монооксида углерода приближаются к равновесным значениям. Для ветви с $T_{\text{вх}}=300$ К расчетные СО равны равновесным при $\alpha_\Sigma \approx 1,4$, для ветви с $T_{\text{вх}}=600$ К – при $\alpha_\Sigma \approx 2,0$.

Объясняется это ростом температуры в зоне горения и соответствующим ростом диссоциации продуктов сгорания. В этой области основная причина выбросов СО – это смещение термодинамического равновесия в сторону исходных веществ.

При дальнейшем движении к стехиометрическому составу смеси расчетные концентрации монооксида углерода меньше равновесных (при $\alpha_\Sigma<1,3$ для $T_{\text{вх}}=300$ К и $\alpha_\Sigma<1,8$ для $T_{\text{вх}}=600$ К). Объясняется это тем, что в расчетах по реакторной модели камеры сгорания учитывается теплоотвод от газа

к стенкам камеры. Наличие тепловых потерь уменьшает температуру в зоне горения, и равновесие смещается в сторону продуктов сгорания. Влияние температуры на равновесные и расчетные выбросы CO хорошо прослеживается на рис. 4 и в табл. 3, 4.

Известно, что в относительно холодной пристеночной области CO не успевает окислиться до CO₂ ввиду «замораживания» химических реакций [8].

Зависимость выбросов CO от температуры газов в пристеночной области, полученная по результатам расчетов реакторной модели камеры сгорания, приведена на рис. 5. Зависимость построена по данным табл. 2 и 3.

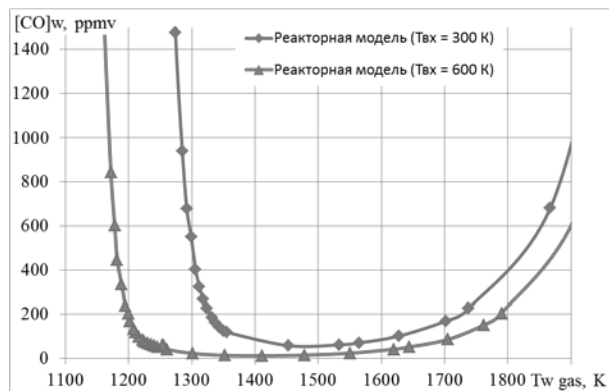


Рис. 5. Зависимость выбросов CO от температуры газов в пристеночной области

Согласно расчетам при температуре газов в пристеночной области менее $\sim 1350 \text{ K}$ для $T_{\text{вх}} = 300 \text{ K}$ и $\sim 1250 \text{ K}$ для $T_{\text{вх}} = 600 \text{ K}$ получено быстрое увеличение уровня выбросов монооксида углерода, что согласуется с ранее проведенными исследованиями.

Так, например, в работе [10] показано, что скорость основной реакции окисления монооксида углерода $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ падает на два порядка при снижении температуры с 1800 K , характерной для зоны горения, до $1100\text{--}1200 \text{ K}$, характерной для пристеночной области.

Отметим, что при одинаковой температуре газов в пристеночной области выбросы CO на ветви $T_{\text{вх}} = 600 \text{ K}$ ниже по сравнению с ветвью $T_{\text{вх}} = 300 \text{ K}$. Объяснить это можно различием состава горючей смеси — большим начальным температурам соответствуют «бедные» смеси с меньшим содержанием углеводородов. Так, например, для $T_{w\text{ gas}} \approx 1300 \text{ K}$:

$$- \alpha_{\Sigma} \approx 2,1 \text{ при } T_{\text{вх}} = 300 \text{ K};$$

$$- \alpha_{\Sigma} \approx 2,6 \text{ при } T_{\text{вх}} = 600 \text{ K}.$$

В табл. 2, 3 приведено отношение концентраций монооксида углерода в пристеночной области $[\text{CO}]_w$ к концентрациям на выходе из камеры $[\text{CO}]_{\text{вых}}$. Видно, что для исследуемой малогабаритной камеры сгорания «замораживание» реакций горения в пристеночной области является основной причиной выбросов CO при $\alpha_{\Sigma} > 1,5\text{--}1,8$.

Таким образом, результаты расчетов по реакторной модели камеры сгорания в части зависимости выбросов монооксида углерода от состава и температуры смеси согласуются с теоретическими представлениями о рабочих процессах камер сгорания.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЫБРОСОВ CO ОТ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Зависимость выбросов монооксида углерода от давления в камере сгорания приведена на рис. 6 и в табл. 4.

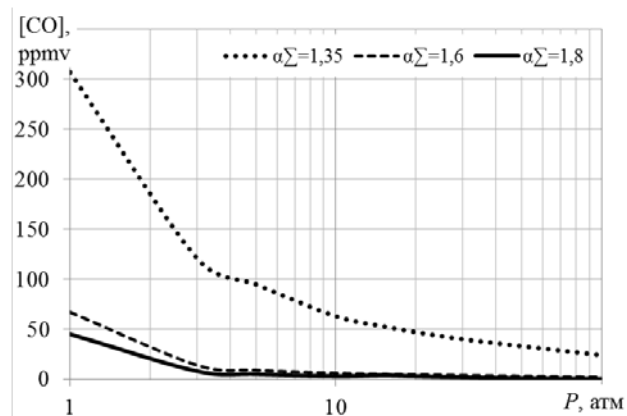


Рис. 6. Зависимость выбросов CO от давления в камере

В расчетах с повышением давления увеличивался расход горючей смеси так, чтобы условное время пребывания топлива в жаровой трубе оставалось постоянным.

Из графика видно, что с повышением давления выбросы CO падают. Это вызвано ростом скорости химических реакций с ростом давления, что в свою очередь крайне упрощенно объясняется уменьшением межмолекулярного расстояния и повышением частоты столкновений частиц реагентов.

При этом уменьшение выбросов монооксида углерода происходит, несмотря на увеличение тепловых потерь, в пристеночной области.

Таблица 4

Зависимость выбросов СО от давления () в камере сгорания

α_{Σ}	Параметр	P , атм								
		1	3	5	10	15	20	30	50	100
1,35	$[CO]_{\text{вых}}, \text{ppmv}$	307	121	95	63	53	47	40	33	24
	$[CO]_{\text{равн}}, \text{ppmv}$	340	201	157	112	92	80	66	51	36
	$T_{\text{adia}}, \text{K}$	1953	1955	1956	1957	1958	1958	1959	1959	1960
	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2\text{K})$	12	22	30	89	106	118	135	153	177
1,60	$[CO]_{\text{вых}}, \text{ppmv}$	67	14	9	6	5	4,5	3,8	3	2
	$[CO]_{\text{равн}}, \text{ppmv}$	33	19	15	11	9	8	6	5	3
	$T_{\text{adia}}, \text{K}$	1751	1751	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752
	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2\text{K})$	11	20	58	81	95	105	119	134	145
1,80	$[CO]_{\text{вых}}, \text{ppmv}$	45	8	5	3	4	3	2	1	1
	$[CO]_{\text{равн}}, \text{ppmv}$	6	3	3	2	2	1	1	1	1
	$T_{\text{adia}}, \text{K}$	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621	1621
	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2\text{K})$	11	18	55	76	88	97	109	121	134

Результаты расчетов могут быть интересны при оценке выбросов СО в условиях работы камеры сгорания в составе ГТД (при высоком давлении) по результатам автономных испытаний камеры при нормальных условиях (при атмосферном давлении).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены расчеты концентраций монооксида углерода на выходе из малогабаритной камеры сгорания с предварительной подготовкой топливоздушная смеси. Для этого разработана реакторная модель камеры сгорания по комбинированному методу – по результатам трехмерного *CFD*-моделирования.

Различие между измеренными и расчетными концентрациями СО на выходе из камеры составило порядка 15–20% (режим $\alpha_{\Sigma}=2,0$). Это показало целесообразность дальнейшего развития комбинированного метода расчета концентраций вредных веществ в продуктах выхлопа.

На базе разработанной реакторной модели камеры сгорания выполнены расчетные исследования влияния отдельных факторов (состав смеси, температура воздуха на входе в камеру, температура газов в пристеночной области, давление в камере сгорания) на уровень выбросов монооксида углерода. Построены соответствующие зависимости, которые могут быть полезны при

проектировании малоэмиссионных камер сгорания.

Результаты расчетных исследований по комбинированному методу согласуются с теоретическим представлением о рабочих процессах в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuasa S., Awano R., Sakurai T. Effects of Secondary Premixture-Injection on Combustion Characteristics of a Lean Premixed Propane Combustor for 200 W-Class Gas Turbines // *GTSJ*. 2007. [S. Yuasa, R. Awano, T. Sakurai, "Effects of Secondary Premixture-Injection on Combustion Characteristics of a Lean Premixed Propane Combustor for 200 W-Class Gas Turbines", in *GTSJ*, 2007.]
2. Кутлумухамедов А. Р., Скиба Д. В., Бакиров Ф. Г. Расчетная оценка концентраций монооксида углерода на выходе из малоэмиссионной камеры сгорания с помощью комбинированного метода // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 12-14 сентября 2018 г. Самара: Изд-во «Самарский университет», 2018. С. 87–88. [A. R. Kutlumukhamedov, D. V. Skiba, F. G. Bakirov, "Estimation of carbon monoxide's concentration at the outlet of a low emission combustor using combined method", (in Russian), in *Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroyeniya: materialy dokladov mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.*, Samara: Izd-vo "Samarskiy universitet", 2018, pp. 87-88.]
3. Chemical Reactor Network Application to Emissions Prediction for Industrial DLE Turbine [Text] / I. V. Novosselov, et. al. // *ASME Turbo Expo 2006*. 2006. [I. V. Novosselov et. al., "Chemical Reactor Network Application to Emissions Prediction for Industrial DLE Turbine", in *ASME Turbo Expo 2006*, 2006.]
4. Westbrook C. K., Dryer F. L. Simplified Reaction Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames

[Text] // *Combustion Science and Technology*, 1981. [C. K. Westbrook, F. L. Dryer, "Simplified Reaction Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames", in *Combustion Science and Technology*, 1981.]

5. **Turns S. R.** An Introduction to Combustion: concepts and applications // 2nd ed. McGraw-Hill series in Mechanical Engineering, 2000. 676 p. [S. R. Turns, "An Introduction to Combustion: concepts and applications", 2nd ed., McGraw-Hill series in Mechanical Engineering, 2000.]

6. **Михеев М. А., Михеева И. М.** Основы теплопередачи [Текст] // 2-е издание, стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с. [M. A. Mikheyev, I. M. Mikheyeva, *Basics of heat transfer*, (in Russian). М.: Energiya, 1977.]

7. **Нащочкин В. В.** Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] // 2-е издание, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1975. 496 с. [V. V. Nashchokin, *Technical thermodynamics and heat transfer*, (in Russian). Moscow: Vysshaya shkola, 1975.]

8. **Лефевр А.** Процессы в камерах сгорания ГТД: Пер. с англ. [Текст] / А. Лефевр. М.: Мир, 1986. 566 с. [A. Lefebvre, *Processes in combustion chambers of GTE*, (in Russian). Moscow: Mir, 1986.]

9. **Кутлумухамедов А. Р., Скиба Д. В., Бакиров Ф. Г.** Трудности численного моделирования процессов горения в пристеночной области камер сгорания // Актуальные проблемы науки и техники: материалы X Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых: том 2. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: РИК УГАТУ, 2017. С. 123–126. [A. R. Kutlumukhamedov, D. V. Skiba, F. G. Bakirov, "The difficulties of numerical simulation of combustion processes in the near-wall region of the combustion chamber", (in Russian), in *Aktualnyye problemy nauki i tekhniki: materialy X Vserossiyskoy zimney shkoly-seminara aspirantov i molodykh uchenykh: tom 2*, USATU, Ufa: RIK UGATU, 2017, pp. 123-126.]

10. **Correa S. M.** Carbon Monoxide Emission in Lean Premixed Combustion // *Journal of Propulsion and Power*. Vol. 8, No. 6. Nov.-Dec. 1992. [S. M. Correa, "Carbon Monoxide Emission in Lean Premixed Combustion", in *Journal of Propulsion and Power*, vol. 8, no. 6, 1992.]

ОБ АВТОРАХ

КУТЛУМУХАМЕДОВ Артур Рамилович, асп. каф. АТиТ УГАТУ.

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

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

METADATA

Title: Numerical investigation of individual factors' influence on carbon monoxide emission with the help of low-emission combustor's chemical reactor network model.

Authors: A. R. Kutlumukhamedov¹, D. V. Skiba², F. G. Bakirov³

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹kutlum22@yandex.ru, ²d.skiba@teplophysics.ru, ³fgbakirov@bk.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 4 (86), pp. 84-92, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The article presents the results of computational studies of the influence of various factors on the level of carbon monoxide (CO) emissions from a small-sized lean-premixed combustion chamber. The influence of the mixture composition, the air temperature at the inlet, the gas temperature in the wall region and the pressure in the combustion chamber was studied. The corresponding dependencies are constructed.

The calculations were performed using a chemical reactor network model of the combustion chamber based on the results of three-dimensional CFD modeling.

Key words: combustion chamber; pollutant emissions; carbon monoxide (CO); three-dimensional modeling; chemical reactor network model; heat exchange; chemical kinetics.

About authors:

KUTLUMUKHAMEDOV, Artur Ramilevich, postgraduate student, Ufa state aviation technical University.

SKIBA, Dmitriy Vladimirovich, candidate of technical Sciences, Senior Researcher in the Department of aviation of the thermal engineering and heat power engineering, Ufa state aviation technical University.

BAKIROV, Fedor Gayfullovich, doctor of technical Sciences, Professor, Head of the Department of aviation of the thermal engineering and heat power engineering, Ufa state aviation technical University.