

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДА АЗОТА И ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

© 2006 Ю. Г. Куценко, С. Ф. Онегин

ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь

Рассматриваются проблемы математического моделирования физико-химических процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Проведены расчеты течения многокомпонентного реагирующего газа в камере сгорания. С использованием результатов проведенной серии параметрических расчетов камеры сгорания выбрана конструкция жаровой трубы, характеризующаяся минимальным уровнем эмиссии оксида азота.

1. Введение

Проектирование и доводка камер сгорания (КС) газотурбинных двигателей (ГТД) – сложный процесс, который включает в себя большой объем конструкторских и экспериментальных работ. Применение методов вычислительной газовой динамики позволяет снизить объем экспериментальных работ по доводке КС и внести изменения в их конструкцию на ранних стадиях проектирования. Несмотря на наличие коммерческих (доступных на рынке) пакетов программ вычислительной газовой динамики, успешное применение их в практике проектирования малоэмиссионных камер требует решения целого ряда проблем, обусловленных существенной нелинейностью и связанностью газодинамических и химических процессов (горения), то есть разработки специальной технологии моделирования. Разработка технологии математического моделирования процессов в КС включает в себя большой объем работ по настройке математических моделей турбулентности, горения, радиационного теплообмена. В данной работе рассматривается практическое применение технологии математического моделирования к расчету уровня эмиссии оксида азота в камере сгорания ГТД.

2. Математические модели

Для проведения расчетов камер сгорания были использованы следующие математические модели.

I. Для моделирования турбулентного течения производилось решение уравнений Навье-Стокса, использовалась *k-ε RNG* мо-

дель турбулентности. Выбранная для решения задачи система уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{r}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{r} \tilde{u}_j) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{r} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{r} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \overline{ru_i''u_j''}); \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{r} \tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{r} \tilde{u}_j \tilde{h} + \bar{r} \tilde{u}_j'' \tilde{h}'' - k \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{\tau}_{ij} + \tilde{u}_i'' \bar{\tau}_{ij}); \quad (3)$$

$$p = \sum_{k=1}^K [X_k] RT. \quad (4)$$

Здесь p – давление, r – плотность, T – температура, h – энтальпия, u_i – компоненты скорости, $[X_k]$ – молярная концентрация компонента смеси, R – универсальная газовая постоянная. В моделях, применяемых для расчета турбулентных течений, гипотеза турбулентной вязкости Буссинеска связывает тензор Рейнольдсовых напряжений с градиентами осредненного поля скорости [1]:

$$-\overline{ru_i''u_j''} = \bar{r} m_i \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \bar{r} m_i \nabla \tilde{V} - \frac{2}{3} d_{ij} \bar{r} k. \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности

$$m_t = C_m \frac{k^2}{e} \quad (6)$$

есть турбулентная вязкость.

Уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации e записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial \bar{r}k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{r}\tilde{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{r} \left(m + \frac{m_t}{s_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - P_k - \bar{r}e, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{r}e}{\partial t} + \frac{\partial \bar{r}\tilde{u}_j e}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{r} \left(m + \frac{m_t}{s_k} \right) \frac{\partial e}{\partial x_j} \right) + \\ &+ \frac{e}{k} (C_{e1} P - C_{e2} \bar{r}e) + rR, \end{aligned} \quad (8)$$

где источниковый член рассчитывается по формуле

$$P_k = -\overline{r u_i'' u_j''} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}, \quad (9)$$

добавочный член для k - e RNG модели турбулентности выражается в виде

$$R = C_m \frac{h^3 \left(1 - \frac{h}{h_0} \right)}{(1 + bh^3)} \frac{e^2}{k}. \quad (10)$$

Для моделирования процессов турбулентного смешения и горения использовалась модель тонкого фронта пламени (Flamelet). При расчете КС авиационных ГТД совместно с моделью горения использовалась модель распространения и испарения капель керосина в лагранжевой постановке. Модель горения Flamelet описывает взаимодействие процессов химической кинетики и турбулентного смешения в пределе быстрых реакций – при большом значении числа Дамкёлера (Число Дамкёлера $Da = t_f / t_c$ – отношение временных масштабов течения и химических реакций). Горение происходит в слое, называемом тонким фронтом пламени. Если скорость химических реакций достаточно высо-

ка, чтобы достигнуть завершения (или равновесия) как только реагенты смешаны, то термохимическое состояние полученной смеси может быть определено с использованием консервативной переменной – массовой доли восстановленного топлива.

Уравнения для массовой доли восстановленного топлива \tilde{Z} и ее вариации, применяемые в рамках Flamelet модели горения, имеют вид:

$$\frac{\partial(\bar{r}\tilde{Z})}{\partial t} + \nabla(\bar{r}\tilde{v}\tilde{Z}) - \nabla(\bar{r}D\nabla\tilde{Z}) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\bar{r}\tilde{Z}''^2)}{\partial t} + \nabla(\bar{r}\tilde{v}\tilde{Z}''^2) - \nabla(\bar{r}D\nabla\tilde{Z}''^2) = C_c \frac{m_t}{Sc_t} (\nabla\tilde{Z})^2 - \bar{r}\tilde{c}. \quad (12)$$

Неравновесные эффекты – влияние внешнего поля течения на зону горения – описываются выражением для скорости диссипации массовой доли восстановленного топлива:

$$c = C_c \frac{k}{e} \tilde{Z}''^2. \quad (13)$$

Значениям \tilde{Z} , \tilde{Z}''^2 , c соответствуют определенные значения массовых долей топлива, окислителя и продуктов сгорания, полученные путем генерации Flamelet библиотеки с использованием кинетических механизмов, описывающих процесс горения топлива.

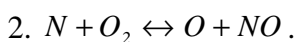
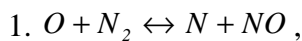
II. Для расчета пространственного распределения концентрации оксида азота в камере сгорания решалось уравнение переноса для массовой доли NO

$$\frac{\partial(\bar{r}\tilde{Y}_{NO})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{r}\tilde{u}_j \tilde{Y}_{NO})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{m_t}{Sc_t} \frac{\partial \tilde{Y}_{NO}}{\partial x_j} \right) + R_{NO}, \quad (14)$$

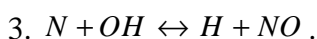
где источниковый член R_{NO} – скорость образования NO .

В камерах сгорания ГТД к образованию NO приводят два различных химических процесса: механизмы «термических» (Зельдовича) и «быстрых» NO . Механизм Зельдовича

– основной источник оксида азота при протекании процесса горения с температурой выше 1800 К. NO формируется вследствие комбинации атомов O и N , которые образуются при высоких температурах. Основные реакции, приводящие к образованию «термических» NO из молекулярного азота, приведены ниже:



При условиях, близких к стехиометрическим и в богатых топливно-воздушных смесях, определенный вклад вносит реакция



Скорости для данных реакций известны из экспериментальных данных и определяются по формулам:

$$k_1 = 1,8 \times 10^8 e^{-38370/T}; \quad (15)$$

$$k_{-1} = 3,8 \times 10^7 e^{-425/T}; \quad (16)$$

$$k_2 = 1,8 \times 10^4 T e^{-4680/T}; \quad (17)$$

$$k_{-2} = 3,8 \times 10^3 T e^{-20820/T}; \quad (18)$$

$$k_3 = 7,1 \times 10^7 e^{-450/T}; \quad (19)$$

$$k_{-3} = 1,7 \times 10^8 e^{-24560/T}. \quad (20)$$

Здесь k_1, k_2, k_3 – константы скоростей прямых реакций и k_{-1}, k_{-2}, k_{-3} соответствующие им скорости обратных реакций. Суммарная скорость образования NO определяется по формуле

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] - k_{-1}[NO][N] - k_{-2}[NO][O] - k_{-3}[NO][H]. \quad (21)$$

Расчет уровня эмиссии оксида азота в камерах сгорания ГТД обычно производится с использованием некоторых допущений. Одним из таких допущений является предположение о квазиравновесном состоянии для расчета концентрации N . Скорость реакции образования оксида азота значительна

только на высоких температурах, так как для образования N требуется разрыв сильной тройной связи молекулы N_2 (энергия диссоциации 941 кДж/гмоль). Это физическое явление представлено большой величиной энергии активации реакции 1 (15), которая лимитирует скорость образования NO в рамках механизма Зельдовича. С другой стороны, энергия активации для окисления N в результате реакции 2 невелика (17). Когда имеется достаточно кислорода, например, в бедной смеси, скорость потребления атомов свободного азота становится равной скорости его образования, и, следовательно, имеет место квазиравновесное состояние. Таким образом, выражение для скорости образования NO принимает вид:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[O][N_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{-1}k_{-2}[NO]^2}{k_1[N_2]k_2[O_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{-1}[NO]}{k_2[O_2]k_3[OH]}\right)}. \quad (22)$$

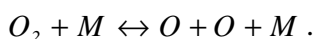
Для расчета концентрации атомарного кислорода O может быть использован один из трех методов.

1. Допущение о равновесности реакции диссоциации-рекомбинации O . Скорость реакции образования NO намного медленнее, чем скорость окисления углеводородных соединений. Как следствие этого, основная масса термических NO образуется после завершения процесса окисления углеводородных соединений. Поэтому процесс образования термических NO может быть отделен от механизма основных реакций процесса горения. Скорость образования NO может быть определена, исходя из предположения о равновесности химических реакций. С использованием данного предположения вычисление скорости образования «термических» NO значительно упрощается. Величина равновесной концентрации атома свободного кислорода может быть получена из выражения [2]:

$$[O] = 3,97 \times 10^5 T^{-1/2} [O_2]^{1/2} e^{-31090/T}. \quad (23)$$

2. Предположение о частичном равновесии реакции диссоциации-рекомбинации

O. Упомянутый выше метод расчета концентрации *O* может быть усовершенствован путем расчета реакций с участием третьего тела в процессе диссоциации-рекомбинации O_2 :



Уравнение (23) в этом случае заменяется следующим выражением [3]:

$$[O] = 36,64T^{1/2} [O_2]^{1/2} e^{-27123/T} . \quad (24)$$

3. Концентрация атомарного кислорода может быть предсказана с использованием моделей горения, таких как модель тонкого фронта пламени.

Для расчета концентрации радикала *OH* также могут быть использованы три метода.

1. Пренебрежение концентрацией *OH*. В рамках этого допущения третья реакция в механизме Зельдовича предполагается мало-значительной при выполнении следующих условий:

$$k_2 [O_2]_{\text{равновесная}} \gg k_3 [OH]_{\text{равновесная}} . \quad (25)$$

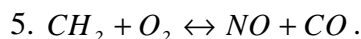
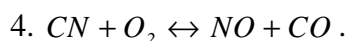
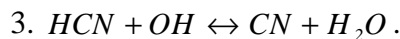
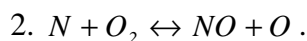
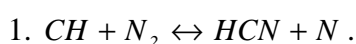
Такое предположение справедливо для бедных смесей и является допустимым для большинства случаев.

2. Допущение о частичном равновесии реакции образования *OH*. С использованием этого приближения концентрация *OH* для механизма Зельдовича определяется по формуле

$$[OH] = 2,129 \times 10^2 T^{-0,57} e^{-4595/T} [O]^{1/2} [H_2O]^{1/2} . \quad (26)$$

3. Концентрация *OH* может быть предсказана с использованием моделей горения, таких как модель тонкого фронта пламени.

Присутствие второго механизма, приводящего к образованию *NO*, впервые было выявлено Фенимором. Этот механизм был назван «быстрым». «Быстрые» *NO* формируются в значительном количестве при низких температурах в богатой топливо-воздушной смеси. Процесс образования «быстрых» *NO* включает в себя множество реакций и промежуточных компонентов:



Предполагается, что основным источником «быстрых» *NO* в углеводородных пламенах являются компоненты, получившиеся путем распада топлива. Основной вклад вносят реакция 1 с участием *CH* и реакция 5 с участием CH_2 . Скорость образования «быстрых» *NO* пропорциональна числу атомов углерода, приходящихся на единицу объема, и не зависит от типа углеводорода и используемого топлива. Количество образующегося *HCN* возрастает при увеличении концентрации углеводородных радикалов, которая в свою очередь возрастает при уменьшении коэффициента избытка воздуха. Реакция 1 играет определяющую роль в образовании «быстрых» *NO*. Проведенные исследования [4] показали, что основная часть «быстрых» *NO* образуется по реакции 1. Предполагая, что реакция 1 является лимитирующей для механизма образования «быстрых» *NO*, получаем

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_o [CH] [N_2] . \quad (27)$$

Однако имеется неопределенность, связанная с выражением для скорости данной реакции. Ознакомившись с реакциями 1-5 образования «быстрых» *NO*, можно заключить, что расчет уровня эмиссии «быстрых» *NO* должен проводиться совместно с механизмом окисления углеводородных соединений. Кинетические механизмы окисления углеводородных топлив включают много шагов и чрезвычайно сложны для проведения расчета совместно с решением газодинамической задачи. Поэтому для определения уровня эмиссии «быстрых» *NO* обычно используется модель, предложенная Де Соетом [5]. Он показал, что общая скорость образования «быстрых» *NO* может быть определена из выражения

$$\frac{d[NO]}{dt} = f k'_{pr} [O_2]^a [N_2] [FUEL] e^{-E_a/RT} , \quad (28)$$

где

$$f = 4,75 + 0,0819n - \frac{23,2}{a} + \frac{32}{a^2} - \frac{12,3}{a^3}, \quad (29)$$

n – число атомов углерода в молекуле углеводородного топлива, a – коэффициент избытка топлива. Порядок реакции для кислорода зависит от условий протекания процесса горения и связан с молярной долей кислорода в пламени:

$$a = \begin{cases} 1,0; X_{O_2} < 4,1 \times 10^{-3}, \\ -3,95 - 0,9 \ln X_{O_2}; 4,1 \times 10^{-3} \leq X_{O_2} \leq 1,11 \times 10^{-2}, \\ -0,35 - 0,11 \ln X_{O_2}; 1,11 \times 10^{-2} < X_{O_2} < 0,03, \\ 0; X_{O_2} \geq 0,03. \end{cases} \quad (30)$$

Скорости реакции образования NO сильно зависят от температуры из-за большой величины энергии активации. Следовательно, флуктуации температуры могут сильно увеличить концентрацию оксида азота, образующегося в турбулентных пламенах. Для учета влияния турбулентных пульсаций на процесс образования оксида азота производилось решение уравнения для вариации температуры:

$$\frac{\partial(rT^{n_2})}{\partial t} + \frac{\partial(ru_j T^{n_2})}{\partial x_j} = \frac{\partial(\Gamma_t \nabla T^{n_2})}{\partial x_j} + C_{g1} m_i \left(\frac{dT}{dx} \right)^2 - C_{g2} r \frac{e}{k} T^{n_2} + P_c \quad (31)$$

Для определения осредненной скорости реакции образования NO – R_{NO} использовалась следующая формула:

$$R_{NO} = \frac{1}{T_u - T_l} \int_{T_l}^{T_u} R_k(T) P(T, T^{n_2}) dT, \quad (32)$$

где T_u и T_l – верхний и нижний пределы интегрирования по температуре, P – b -функция плотности распределения вероятности.

3. Анализ результатов расчетов

Для анализа процесса образования NO были проведены газодинамические расчеты с учетом процесса горения камеры сгорания наземной ГТУ, созданной на базе авиационного двигателя ПС-90А. Для проведения расчетов использовалась геометрическая модель, включающая в себя сопло завихрителя, жаровую трубу и газосборник. Размер расчетной сетки составил около 1 млн. узлов. Расчеты проводились с использованием коммерческого газодинамического пакета *CFX-TASCflow* [6]. В качестве граничных условий для проведения расчетов в основных отверстиях, на выходе из завихрителей и в щелях системы охлаждения задавались расходы воздуха, рассчитанные исходя из распределения эффективных площадей. На выходе из газосборника задавалось значение статического давления, рассчитанное исходя из величины потерь полного давления в камере сгорания 5,5 %. Расчеты были проведены для режимов, приведенных в табл. 1.

При анализе результатов расчетов было выявлено, что доля «быстрых» NO , образующихся в КС, незначительна и составляет от 0,1 до 0,2 % от общего выхода NO . Поэтому дальнейший анализ был проведен для результатов, полученных с использованием механизма Зельдовича.

Образование «термических» NO происходит вблизи поверхности стехиометрии – в зоне высоких температур при наличии достаточного количества атомарного кислорода. Вклад реакции 3 механизма Зельдовича – образования оксида азота с участием радикала OH – невелик и составляет 6,56; 2,14; 4,44 % от общего выхода NO для режимов 1, 2, 3, соответственно.

Таблица 1. Граничные условия для проведения расчетов

Режим	P_k , кгс/см ²	T_k , К	a	G , кг/с
1	8,07	553	4,96	1,81
2	14,82	655	3,27	2,91
3	20,07	720	2,51	3,63

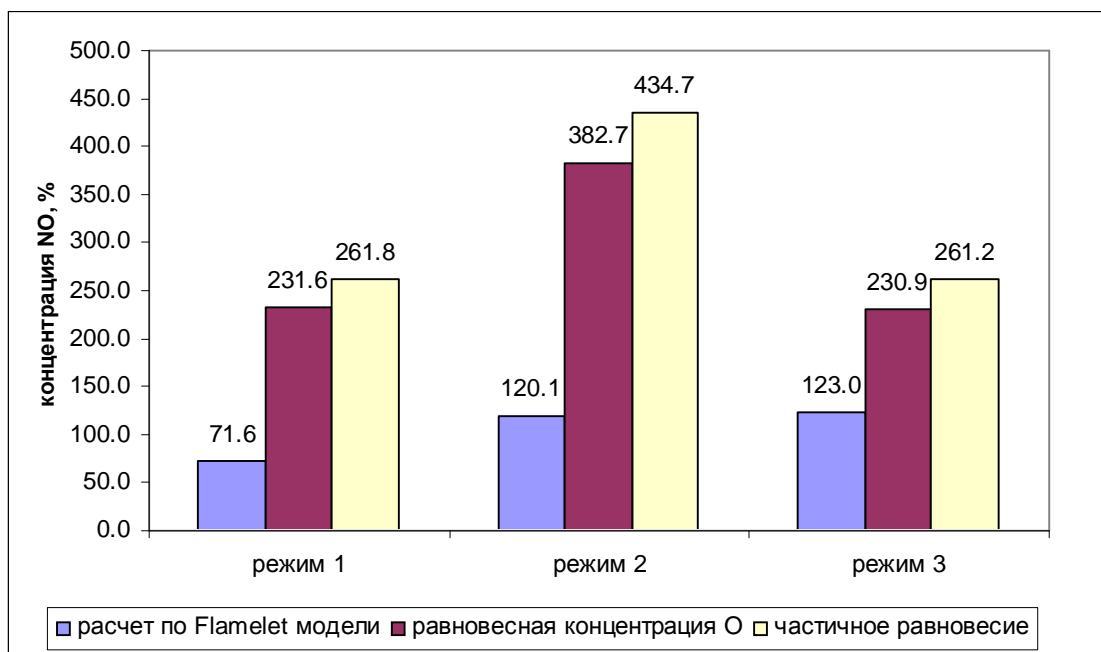


Рис. 1. Уровень эмиссии NO в процентах от экспериментальных данных

Для расчета выхода NO с использованием реакций 1 и 2 механизма Зельдовича важно правильно определить концентрацию атомарного кислорода. На рис. 1 представлены результаты расчетов уровня эмиссии NO при использовании допущений о химическом равновесии атомарного кислорода, частичном равновесии реакции диссоциации-рекомбинации O_2 и с использованием концентрации, рассчитанной с использованием Flamelet модели. Значения уровня эмиссии NO представлены в процентном отношении к экспериментальным замерам концентрации NO (100 %). Наиболее хорошее совпадение с экспериментальными данными наблюдается при использовании для расчета концентрации атомарного кислорода, полученной в рамках Flamelet модели горения, от 71,6 % для режима 1, до 123 % для режима 3. Расчет уровня эмиссии NO с использованием равновесной концентрации O и допущения о частичном равновесии реакции диссоциации-рекомбинации O_2 дает превышение экспериментального уровня в 2-4 раза. Также необходимо отметить важность учета турбулентных пульсаций температуры при расчете скорости реакции образования NO. Расчет без осреднения скорости реакции по температуре с использованием b -функции плотности распределения вероятности приводит к получению почти в 2 раза заниженных концентраций оксида азота на выходе из КС.

4. Выбор конструкции камеры сгорания с наименьшим уровнем эмиссии оксида азота

С использованием методологии проведения параметрических численных исследований были проанализированы варианты конструкций КС, различавшиеся между собой распределением расхода воздуха по жаровой трубе (расположением основных отверстий).

1. Вариант с расположением основных отверстий через секцию (№ 1) – основные отверстия первого ряда расположены в 4, 5 секциях; отверстия второго ряда в 6, 7 секциях жаровой трубы (рис. 2).

2. Вариант с расположением основных отверстий в соседних секциях (№ 2) – отверстия первого ряда сдвинуты к отверстиям второго ряда и расположены в 5, 6 секциях (рис. 3).

3. Вариант с шахматным расположением основных отверстий (№ 3) – отверстия первого ряда сдвинуты относительно оси жаровой трубы на 90° (рис. 3).

4. Вариант с шахматным расположением основных отверстий в соседних секциях (№ 4) – отверстия первого ряда сдвинуты относительно оси жаровой трубы на 90° и расположены в 5 и 6 секциях (рис. 3).

5. Вариант с одним рядом отверстий (№ 5) – 8 отверстий расположены в 6 и 7 секциях жаровой трубы (рис. 3).

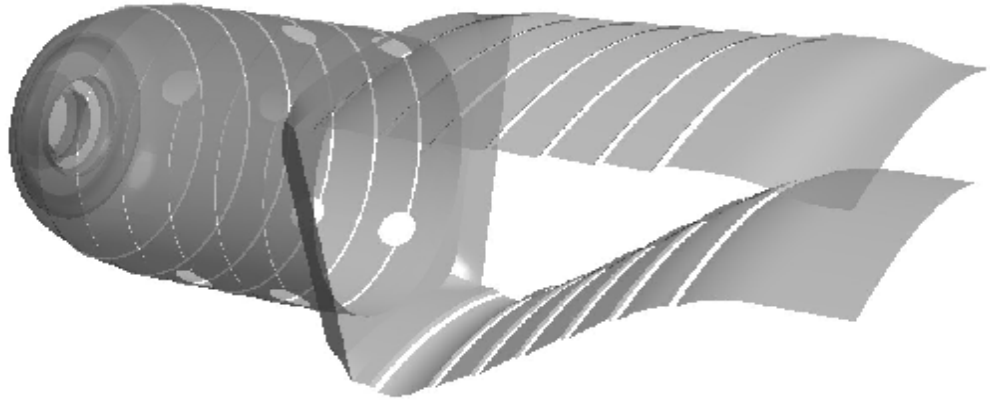


Рис. 2. Модель жаровой трубы и газосборника камеры сгорания в пакете CFX-TASCflow

Для проведения расчетов использовались геометрические модели, включающие в себя сопла радиального и осевого завихрителей, жаровую трубу и газосборник (рис. 2). Размер расчетной сетки составил около 900 тысяч узлов. Расчеты проводились с использованием коммерческого газодинамического пакета CFX-TASCflow.

В качестве граничных условий для проведения расчетов в основных отверстиях, на выходе из завихрителей и в щелях системы

охлаждения задавались расходы воздуха, рассчитанные исходя из распределения эффективных площадей. На выходе из газосборника задавалось значение статического давления, рассчитанное исходя из величины потерь полного давления в камере сгорания 5,5 %. Расчеты были произведены для режима: $P_{\kappa}^* = 17,95$ кгс/см², $T_{\kappa}^* = 829$ К, $G_6 = 4,067$ кг/с, $a = 3,05$. В табл. 2 приведены результаты расчетов концентрации NO на выходе из камеры сгорания.

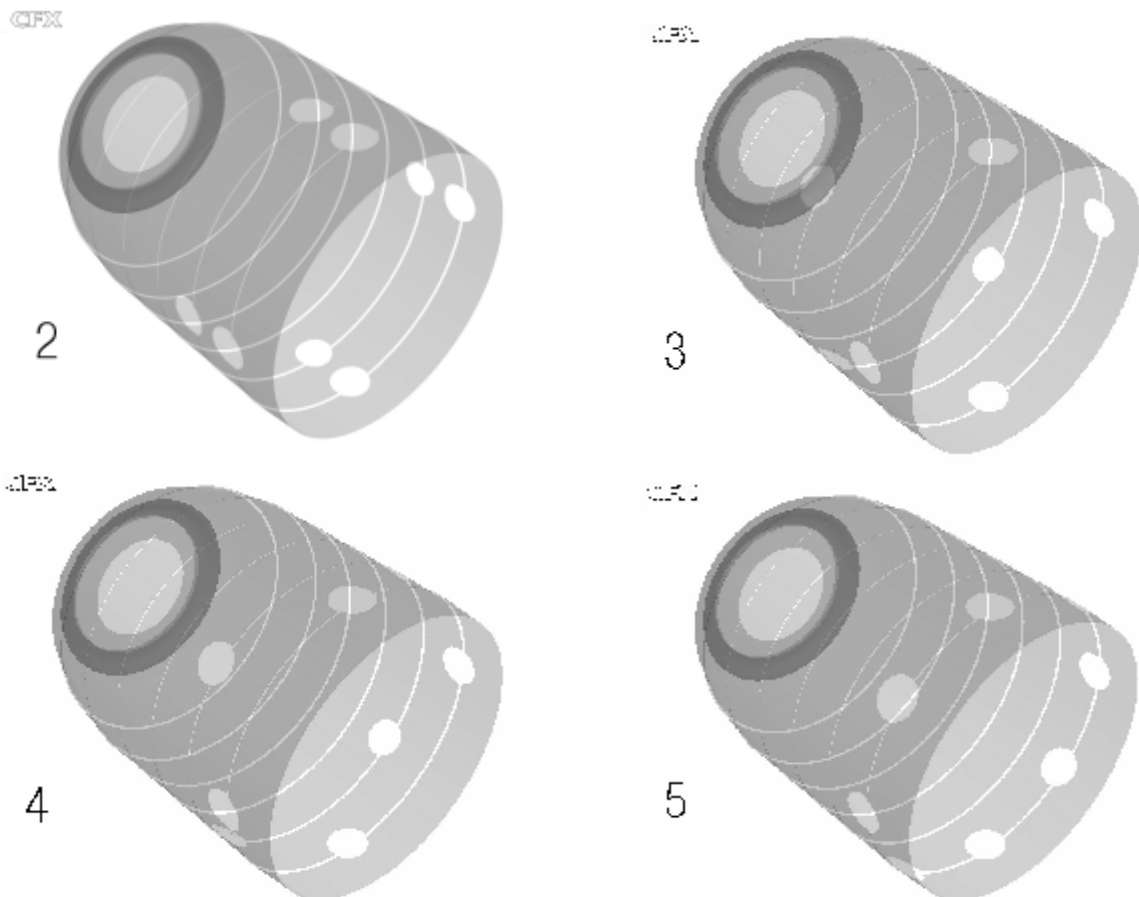


Рис. 3. Модификации жаровой трубы

Таблица 2. Результаты расчетов концентрации NO

№ варианта	Модификация жаровой трубы	Изменение уровня эмиссии NO по отношению к варианту № 1, %
1	Расположение основных отверстий через секцию	–
2	Расположение основных отверстий в соседних секциях	+1,2
3	Шахматное расположение основных отверстий через секцию	+22,3
4	Шахматное расположение основных отверстий в соседних секциях	+29,3
5	Один ряд отверстий	+30,2

На рис. 4 показаны распределения концентрации оксида азота по длине модификаций жаровых труб камеры сгорания и газосборника, приведенные к концентрации NO на выходе из камеры сгорания для варианта № 1. Анализ графиков концентрации оксида азота позволяет подразделить их на группы по уровню эмиссии NO на выходе из камеры сгорания и характеру увеличения концентрации в газосборнике (список № 1):

- варианты с расположением 1 и 2 ряда основных отверстий через секцию (№ 1) и в соседних секциях (№ 2);

- варианты с шахматным расположением основных отверстий через секцию (№ 3) и в соседних секциях (№ 4);

- вариант с расположением отверстий в одном ряду (№ 5).

По характеру увеличения концентрации оксида азота в первичной зоне разделение следующее (список № 2):

- варианты с расположением 1 и 2 ряда основных отверстий через секцию (№ 1) и с шахматным расположением основных отверстий (№ 3);

- варианты с шахматным расположением

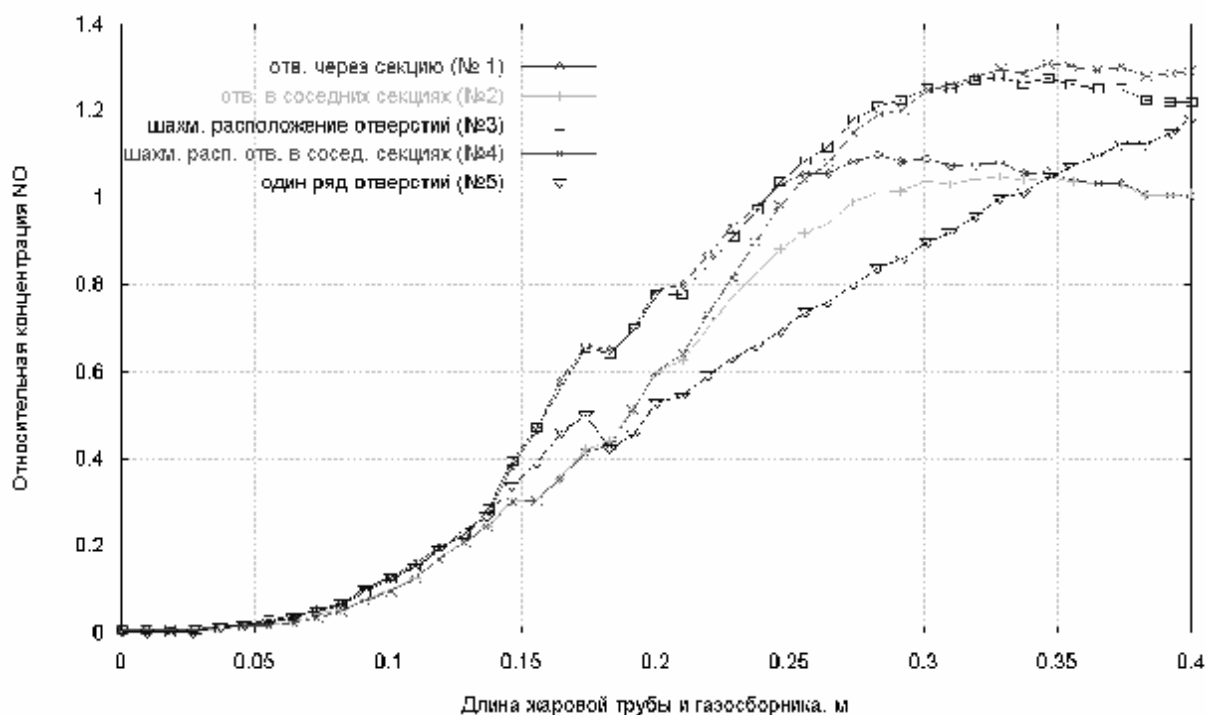


Рис. 4. Влияние расположения основных отверстий на уровень эмиссии NO

ем основных отверстий в соседних секциях (№ 4) и со стандартным расположением 1 и 2 ряда основных отверстий в соседних секциях (№ 2);

- вариант с расположением отверстий в одном ряду (№ 5).

Анализируя полученные данные, необходимо отметить следующее: варианты КС в группах, отмеченных в списке № 2, схожи по организации течения в первичной зоне. Поэтому имеет место совпадение по характеру увеличения концентрации NO . Анализ групп конструкций жаровых труб КС, упомянутых в списке № 1, показывает, что определяющим фактором, влияющим на уровень эмиссии NO , является расположение второго ряда основных отверстий. Так размещение основных отверстий первого и второго ряда в соседних секциях не оказывает значительного влияния на уровень эмиссии оксида азота. Наиболее интенсивно процесс образования NO идет в зоне разбавления и в газосборнике.

Концентрация оксида азота, определяемая с помощью «термического» механизма Зельдовича, зависит от следующих основных факторов: концентрации атомарного кислорода O , образующего в результате распада молекулы O_2 , и температуры.

На рис. 5 приведено распределение массовой доли атомарного кислорода по длине камеры сгорания и газосборника. Из представленных данных видно, что в целом подтверждается зависимость увеличения концентрации NO на выходе из КС от повышенного содержания в продуктах сгорания атомарного кислорода. Исключения составляют конструкции жаровых труб с расположением основных отверстий в соседних секциях (№ 2) и с шахматным расположением основных отверстий через секцию (№ 3). При одинаковом уровне массовой доли O на выходе из камеры сгорания изменение уровня эмиссии оксида азота по отношению к варианту № 1 составляет +1,2 % для варианта № 2 и +22,3 % для варианта № 3. Дело в том, что в варианте № 2 воздух через основные отверстия в соседних секциях более эффективно разбивает высокотемпературную зону, которая занимает меньший объем в газосборнике по сравнению с вариантом № 3. На рис. 6 приведены данные о средней массовой доле O в высокотемпературных зонах. В высокотемпературных зонах варианта № 2 содержится меньшее количество свободного кислорода, чем в варианте № 3. В данном случае объем высокотемпературной зоны в газосбор-

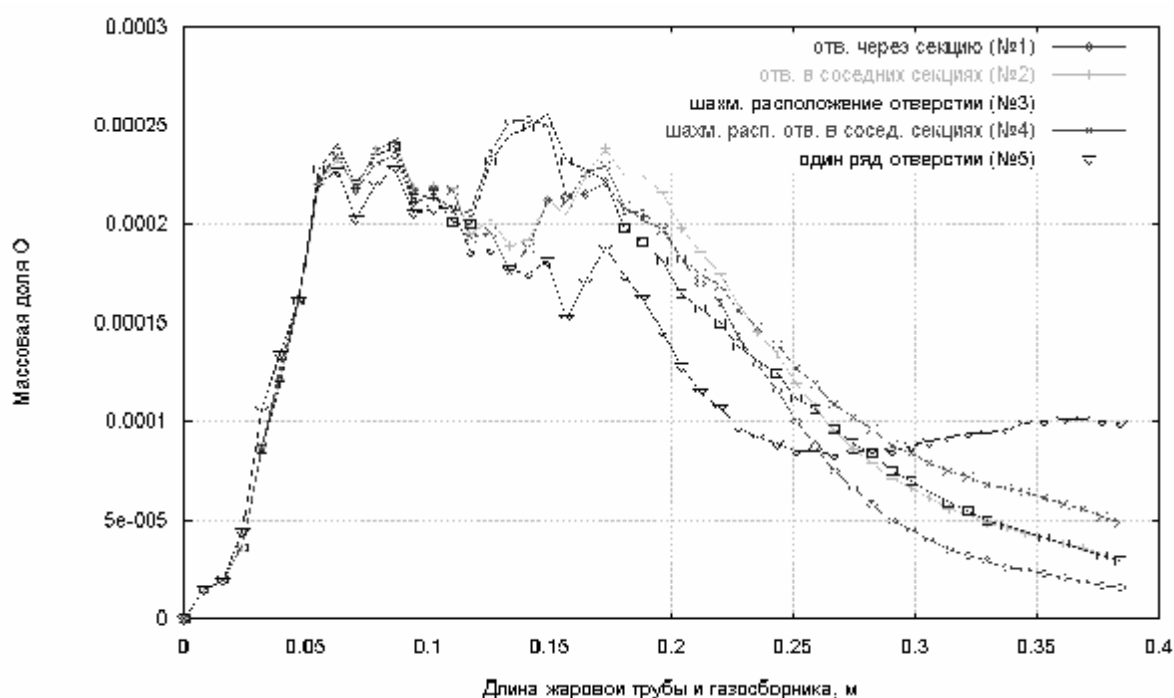


Рис. 5. Влияние расположения основных отверстий на распределение массовой доли O по длине жаровой трубы и газосборника

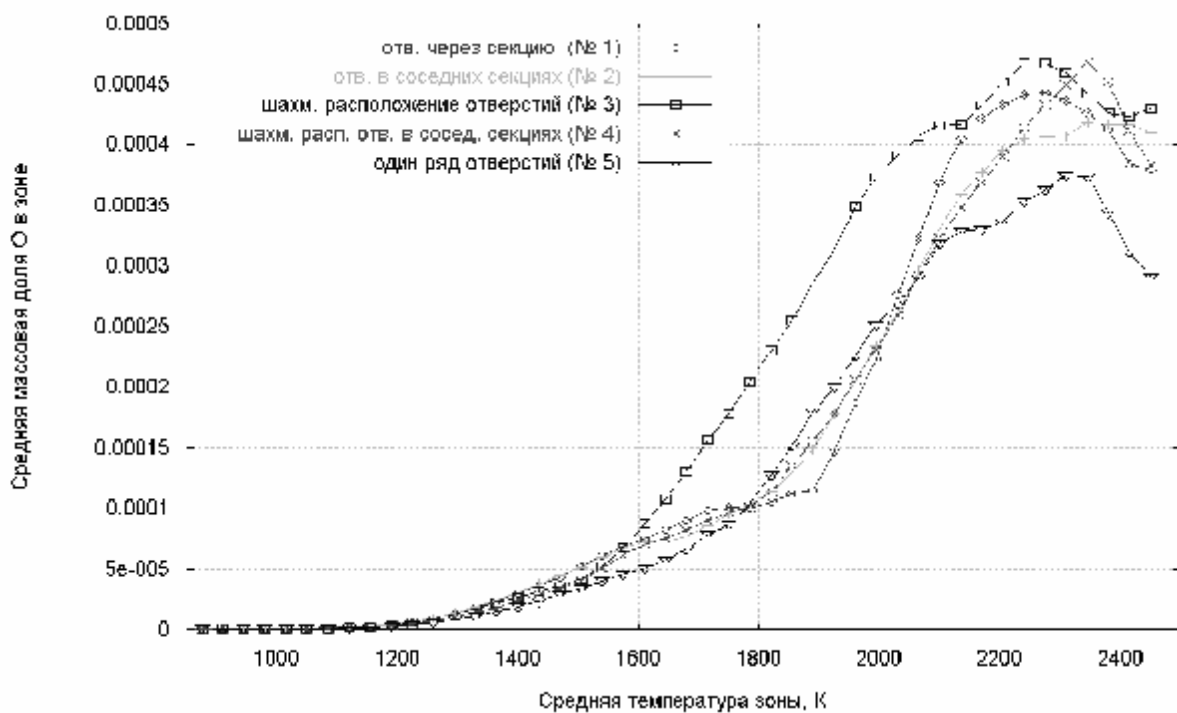


Рис. 6. Средняя массовая доля O в высокотемпературных зонах

нике оказывает определяющее влияние на уровень эмиссии оксида азота.

Информация об относительных объемах ($V_{отн} = \frac{V_{зоны}}{V_{жар.трубы} + V_{газосб}}$), занимаемых высокотемпературными зонами в жаровой трубе КС и в газосборнике, приведена на рис. 7. Вариант № 3 имеет обширные высо-

котемпературные зоны в области температур от 2030 до 2450 К. Наличие данных зон и высокий уровень содержащегося в них свободного кислорода приводит к повышенному уровню эмиссии NO по сравнению с вариантом № 2. Вклад высокотемпературных зон от 2030 до 2450 К варианта № 3 в общий уровень эмиссии NO относительно велик по сравнению с другими вариантами конструкции КС (рис. 8).

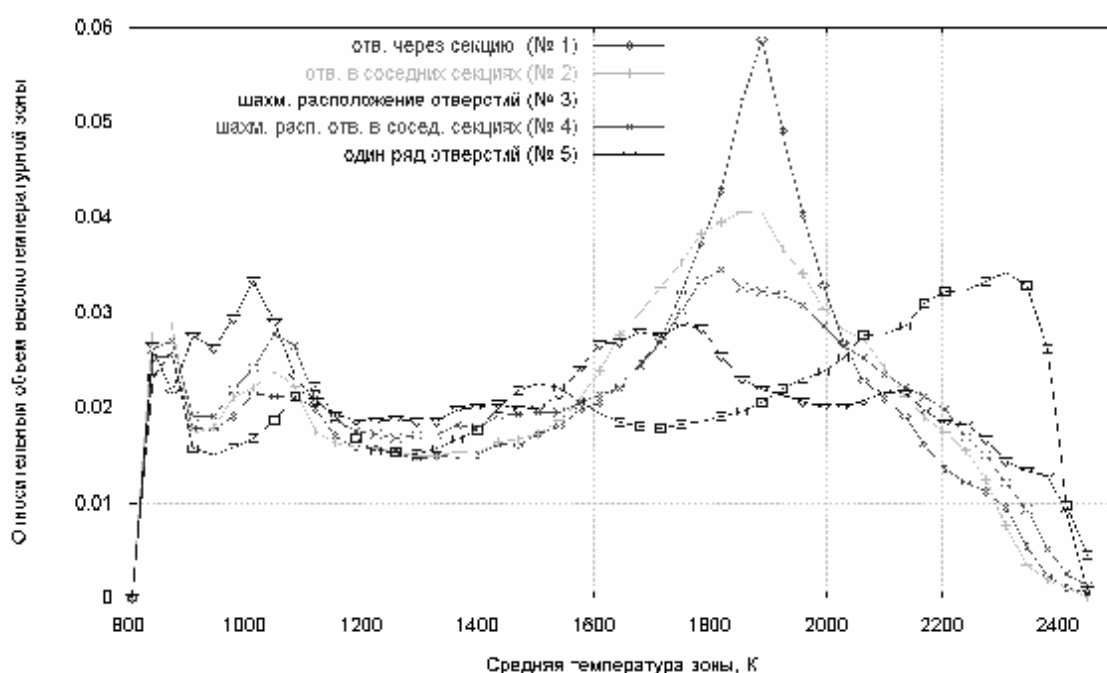


Рис. 7. Относительный объем высокотемпературных зон в жаровой трубе и газосборнике

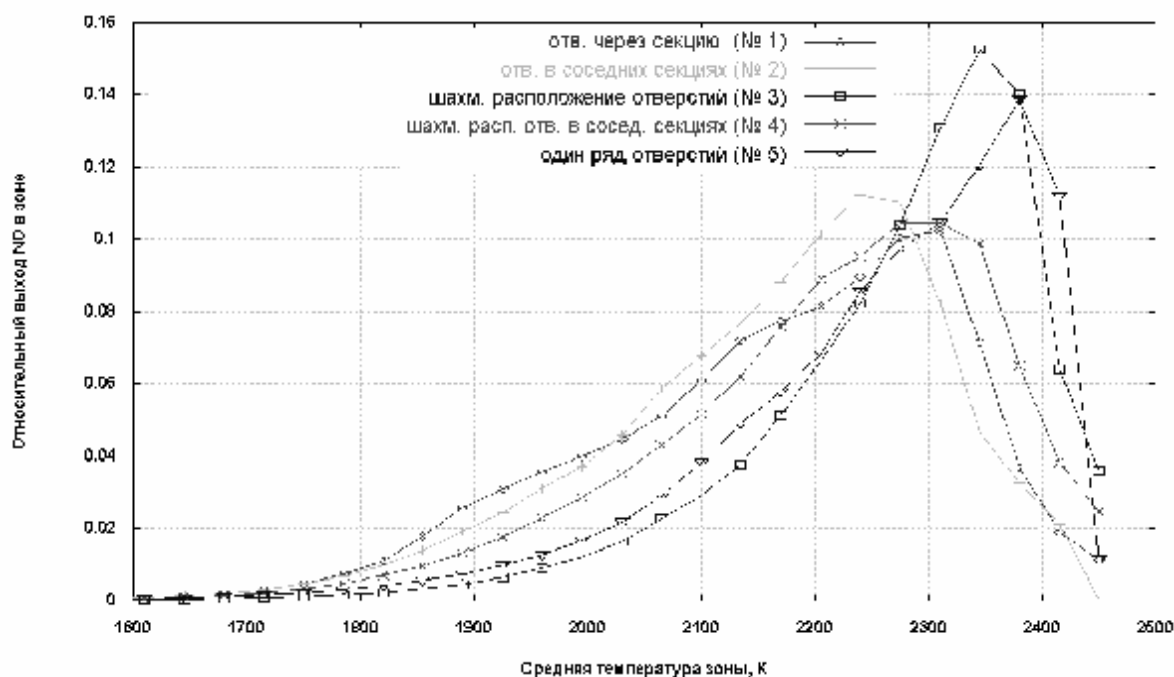


Рис. 8. Относительный выход NO в высокотемпературных зонах жаровой трубы и газосборника

Повышенный уровень эмиссии NO в вариантах № 4 и № 5 вызван увеличением времени пребывания потока, исходящего из завихрителя, в локальной высокотемпературной зоне, находящейся в центральной части газосборника. Струи из отверстий, расположенных в ряд (№ 5) или расположенных в шахматном порядке в соседних рядах (№ 4), не могут разбить ядро первичной зоны вбли-

зи оси жаровой трубы, что приводит к выходу высокотемпературного закрученного потока в газосборник (рис. 9). Следовательно, в качестве критерия, определяющего уровень эмиссии оксида азота для данных КС, можно использовать среднее время пребывания продуктов сгорания в высокотемпературной зоне. Данные, представленные на рис. 10, подтверждают правильность выбора данного крите-

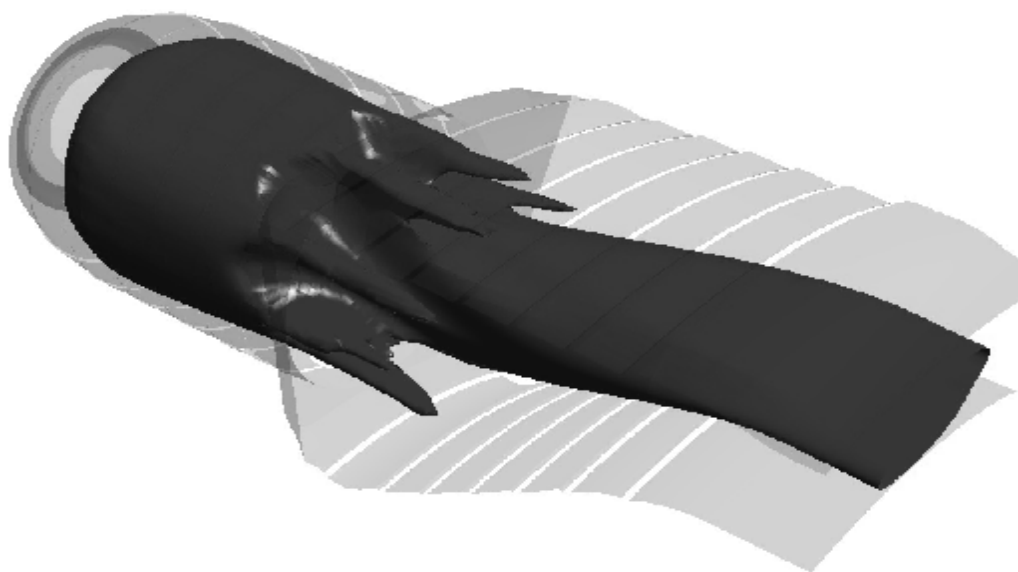


Рис. 9. Изоповерхность температуры 1950 К. Вариант жаровой трубы с одним рядом отверстий (№ 5)

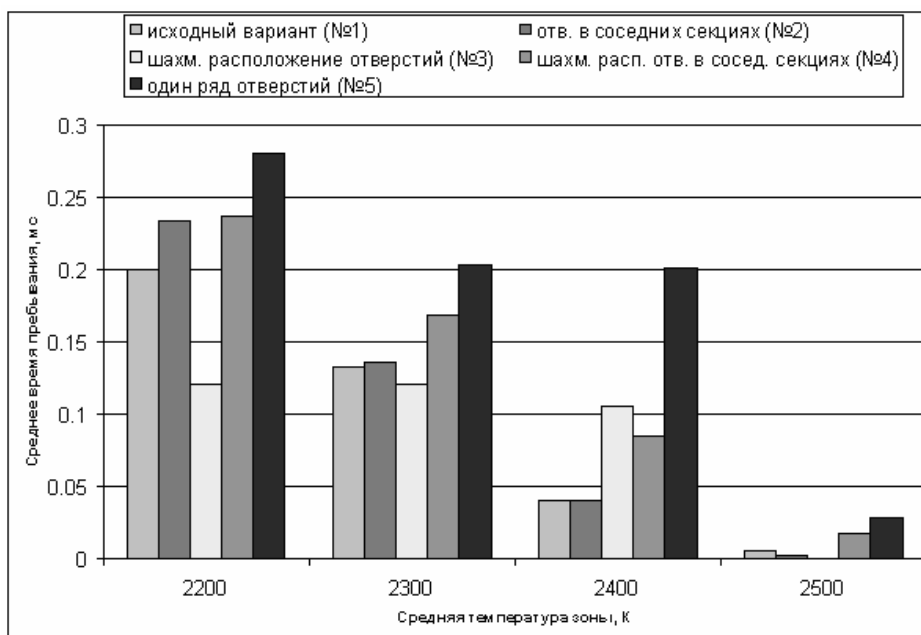


Рис. 10. Среднее время пребывания продуктов сгорания в высокотемпературных зонах

рия. Варианты конструкций КС с шахматным расположением отверстий через секцию (№3), шахматным расположением отверстий в соседних секциях (№4) и одним рядом отверстий (№5) показывают большее время пребывания линий тока в высокотемпературной зоне (при 2400 К) и, соответственно, более высокий уровень эмиссии оксида азота по сравнению с исходным (№1) и вариантом с отверстиями в соседних рядах (№ 2).

Список литературы

1. Турбулентность / Под. ред. П. Брэдшоу. – М.: Машиностроение, 1980.

2. A. A. Westenberg. Comb. Sci. Tech., 4:59, 1971.

3. J. Warnatz. NO_x Formation in High Temperature Processes. University of Stuttgart, Germany.

4. R. W. Schefer, M. Namazian, J Kelly. Combustion Research Facility News, vol. 3, # 4, Sandia, 1991.

5. L. D. Smoot, P. J. Smith. NO_x Pollutant Formation in a Turbulent Coal System. Coal Combustion and Gasification, p. 373, Plenum, NY, 1985.

6. CFX-TASCflow Theory Documentation, AEA Technology, 2002.