

## 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:

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

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

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.

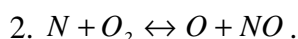
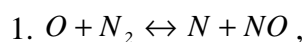
II. Для расчета пространственного распределения концентрации оксида азота в камере сгорания решалось уравнение переноса для массовой доли  $NO$

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

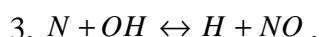
где источниковый член  $R_{NO}$  – скорость образования  $NO$ .

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:

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

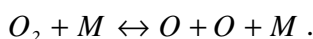
Для расчета концентрации атомарного кислорода  $O$  может быть использован один из трех методов.

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

О. 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:

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

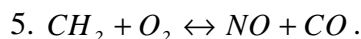
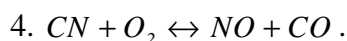
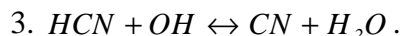
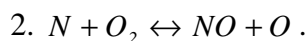
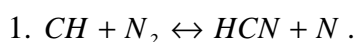
Такое предположение справедливо для бедных смесей и является допустимым для большинства случаев.

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:

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

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 <sup>2</sup>	$T_k$ , 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

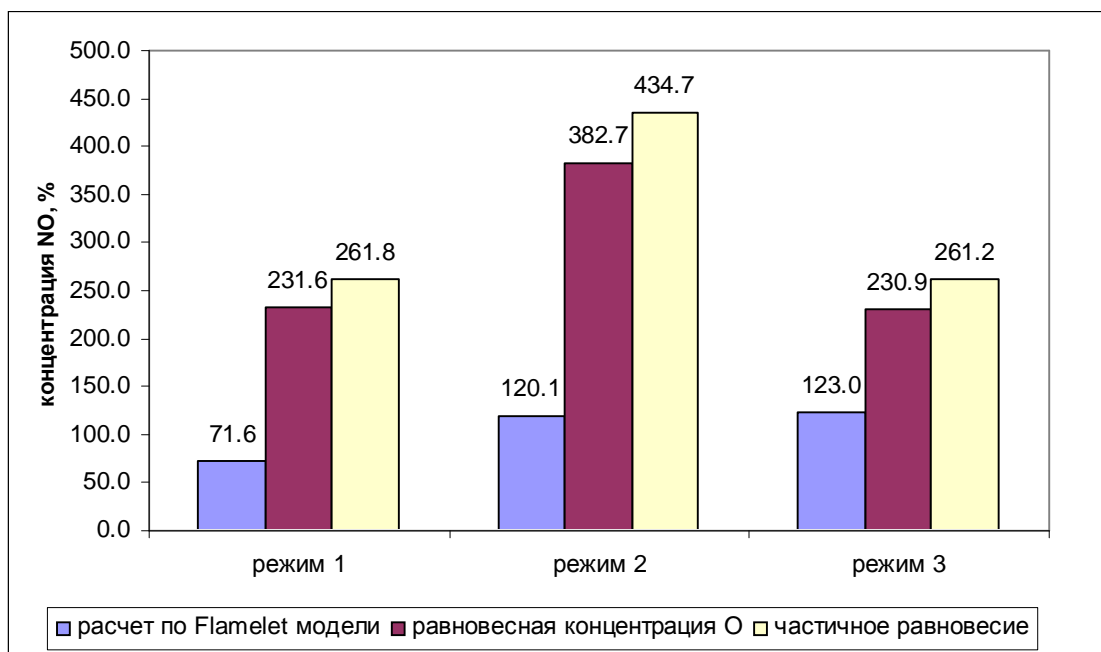


Рис. 1. Уровень эмиссии NO в процентах от экспериментальных данных

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  $90^\circ$  (рис. 3).

4. Вариант с шахматным расположением основных отверстий в соседних секциях (№ 4) – отверстия первого ряда сдвинуты относительно оси жаровой трубы на  $90^\circ$  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).

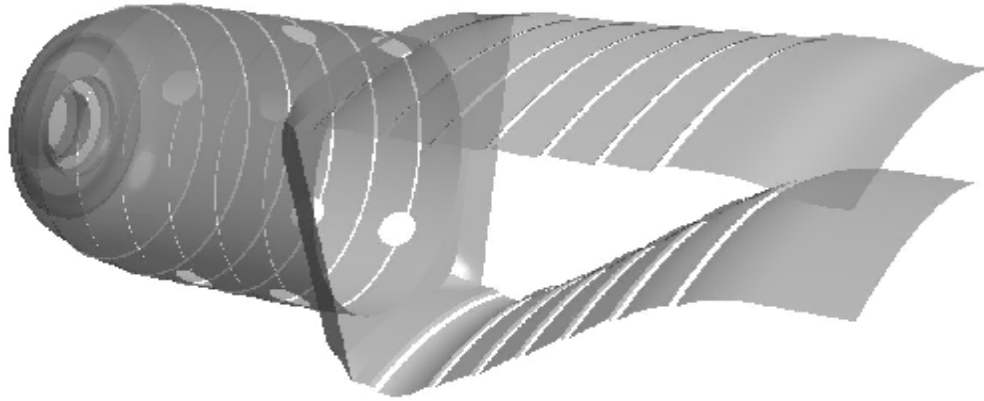


Рис. 2. Модель жаровой трубы и газосборника камеры сгорания в пакете CFX-TASCflow

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/см<sup>2</sup>,  $T_{\kappa}^* = 829$  К,  $G_6 = 4,067$  кг/с,  $a = 3,05$ . В табл. 2 приведены результаты расчетов концентрации NO на выходе из камеры сгорания.

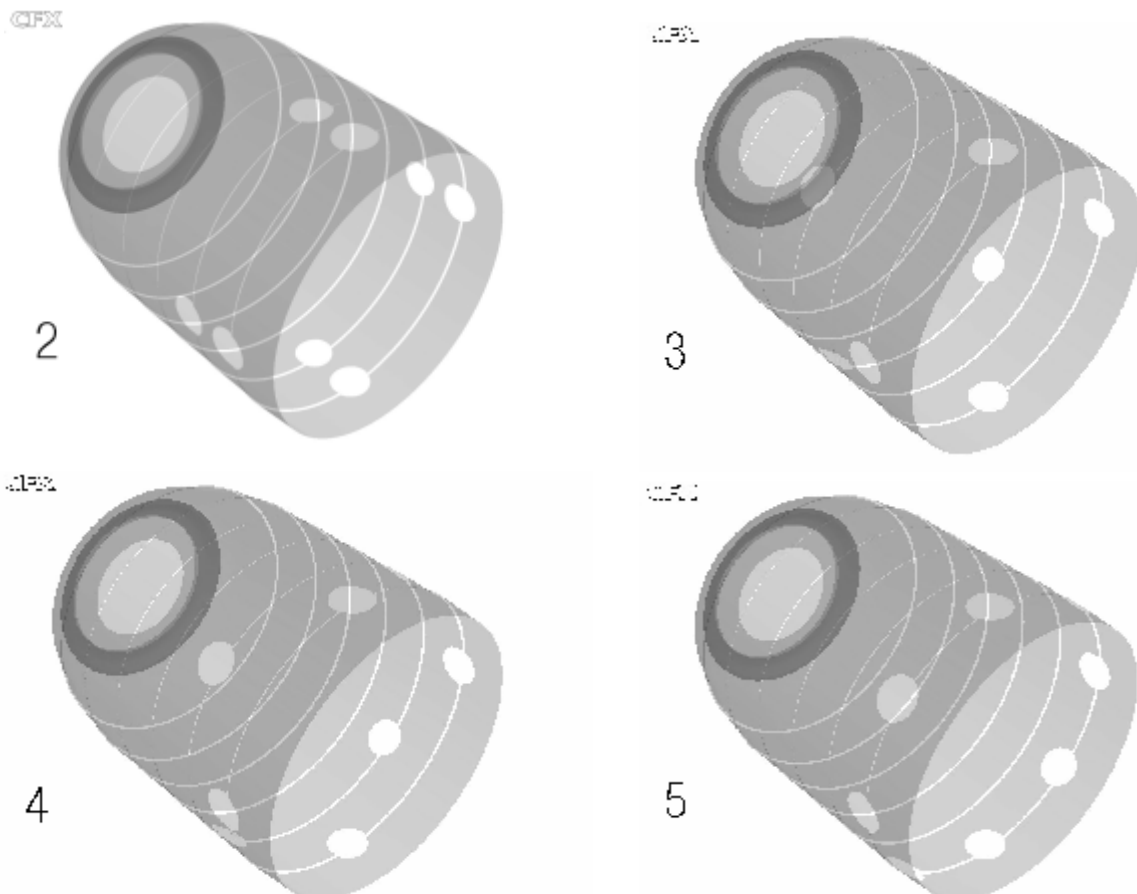


Рис. 3. Модификации жаровой трубы

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

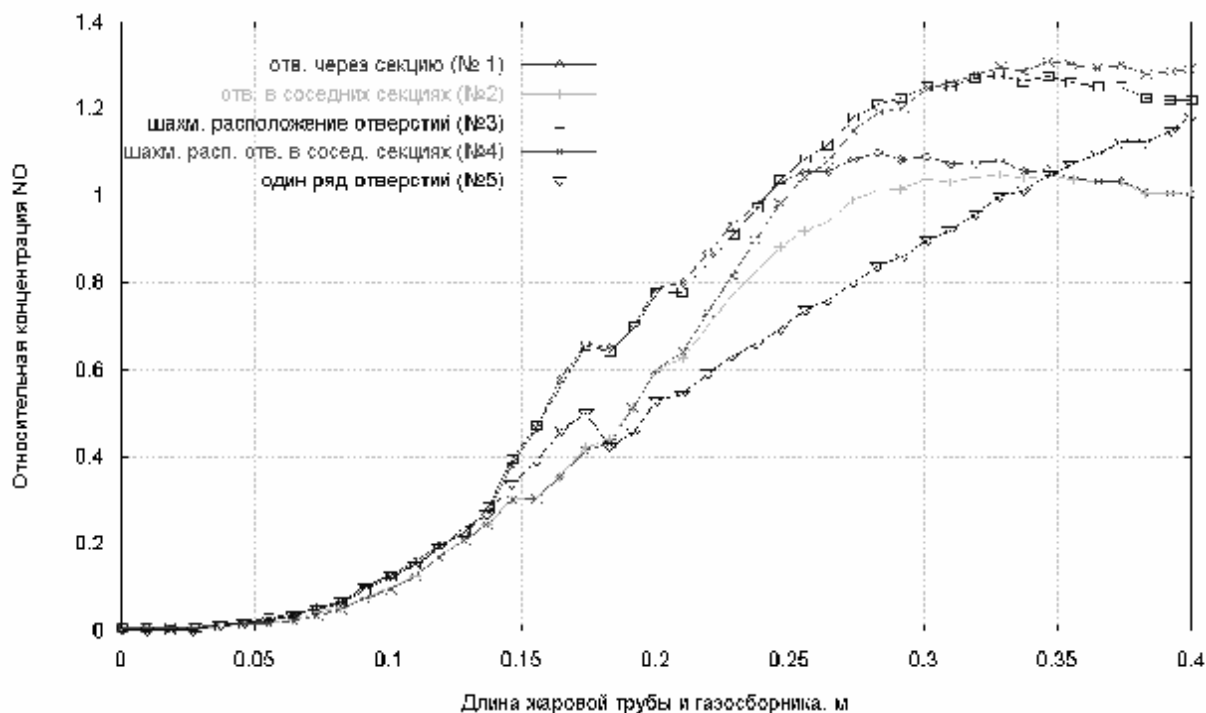


Рис. 4. Влияние расположения основных отверстий на уровень эмиссии NO



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-

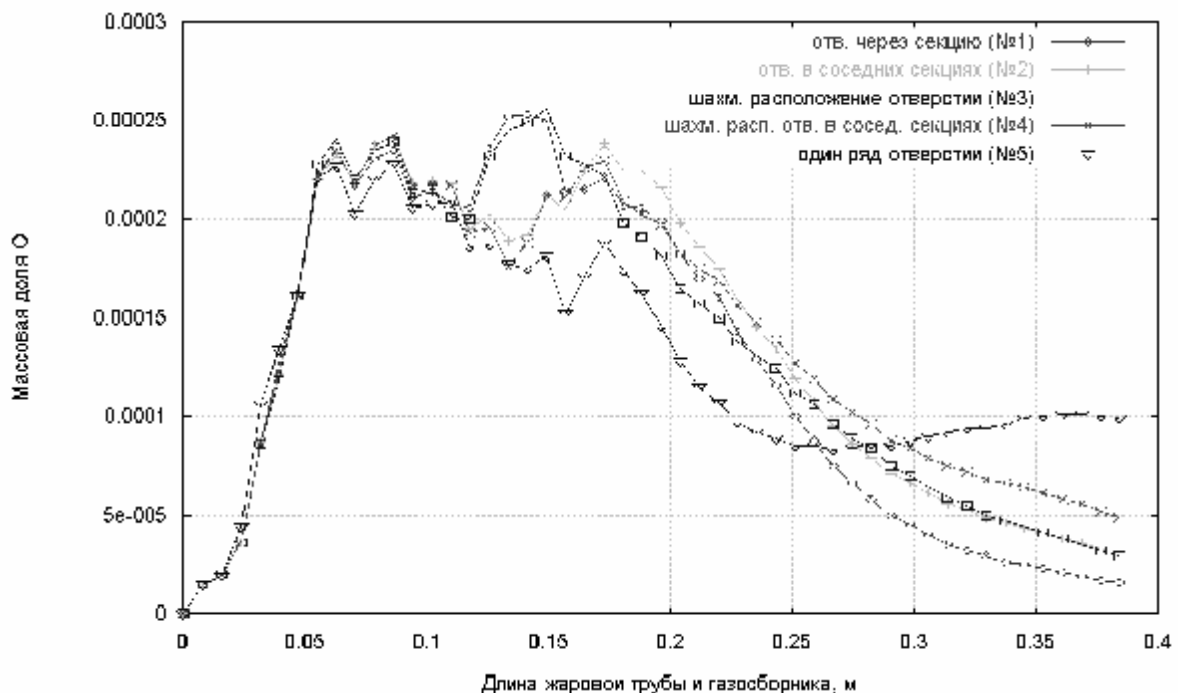


Рис. 5. Влияние расположения основных отверстий на распределение массовой доли  $O$  по длине жаровой трубы и газосборника

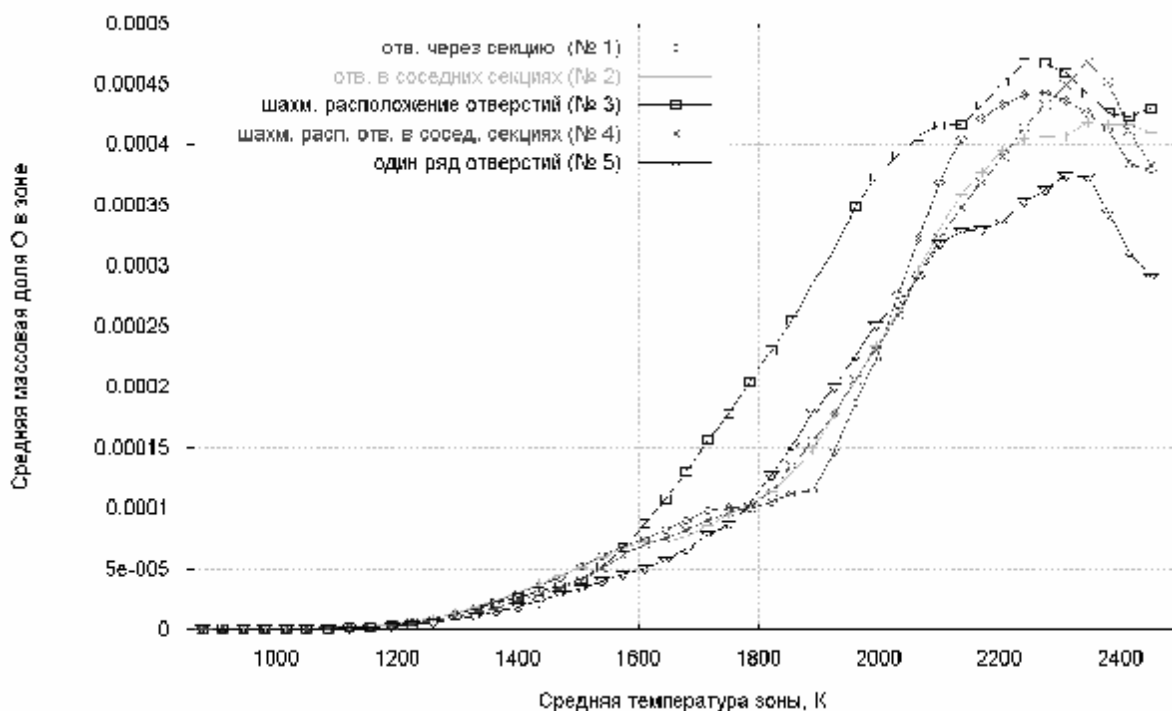


Рис. 6. Средняя массовая доля  $O_2$  в высокотемпературных зонах

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).

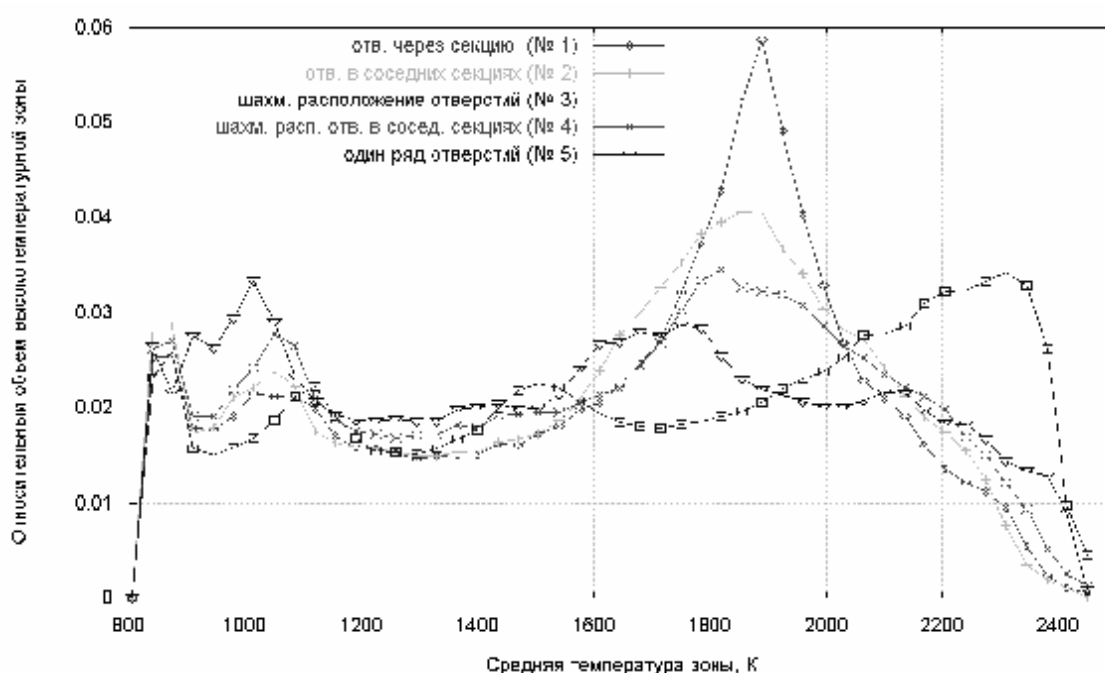


Рис. 7. Относительный объем высокотемпературных зон в жаровой трубе и газосборнике

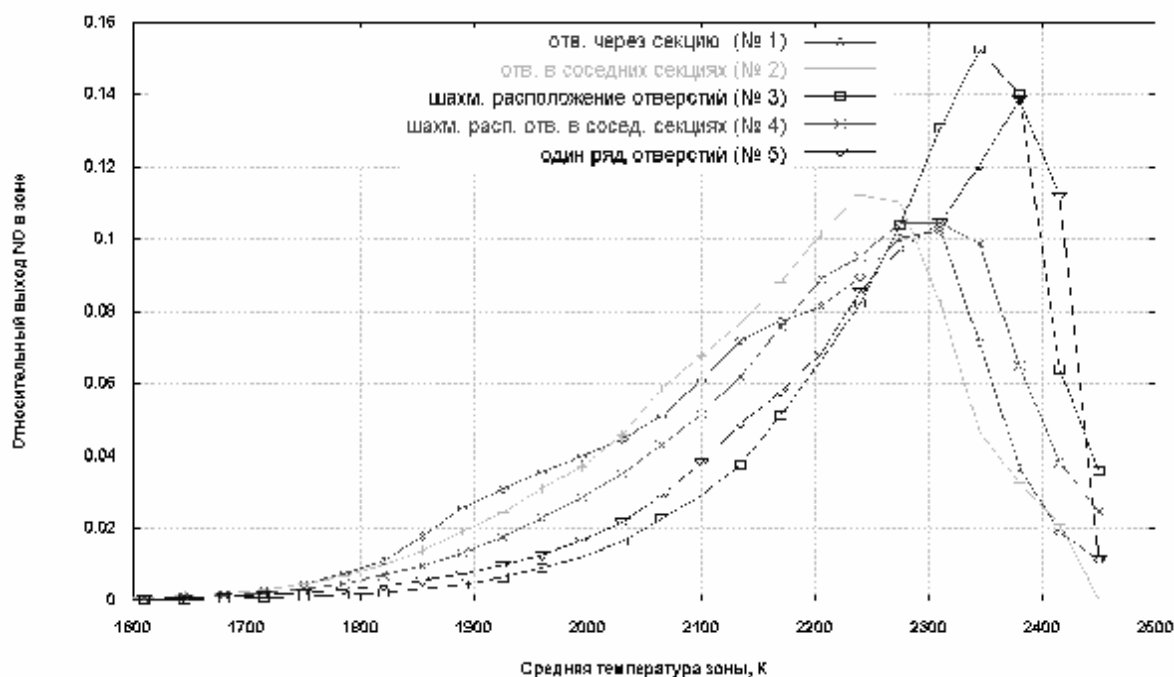


Рис. 8. Относительный выход NO в высокотемпературных зонах жаровой трубы и газосборника

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-

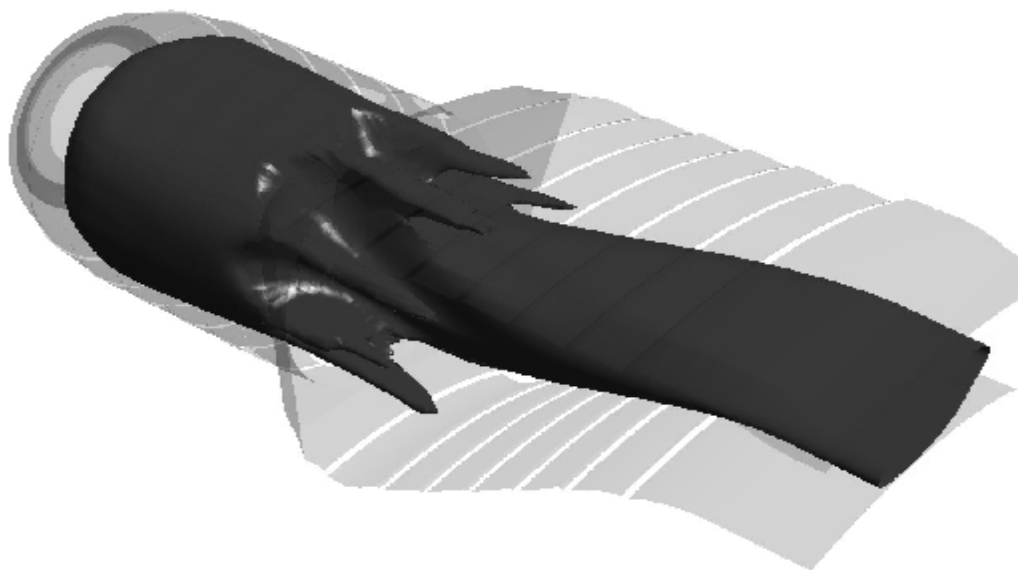


Рис. 9. Изоповерхность температуры 1950 К. Вариант жаровой трубы с одним рядом отверстий (№ 5)

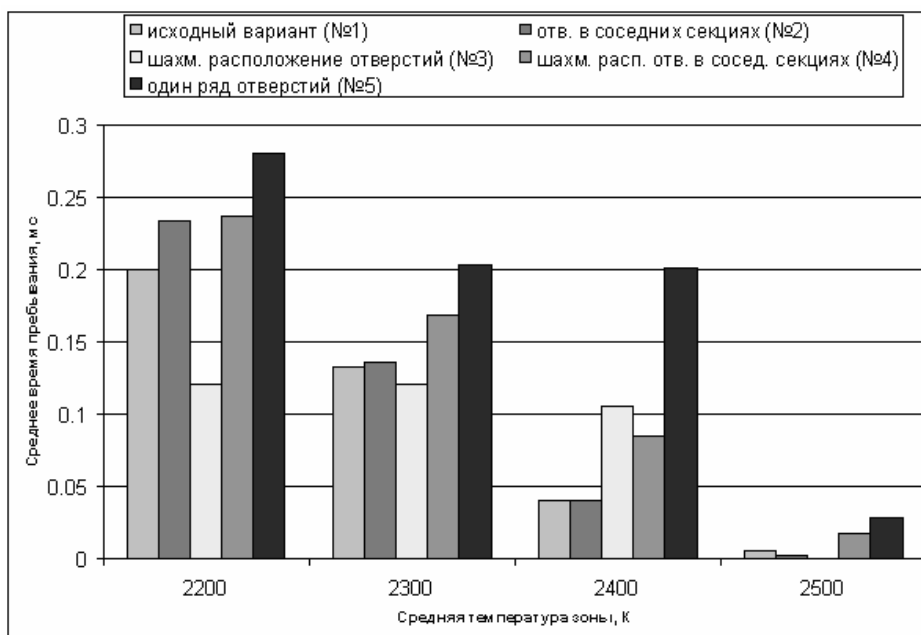


Рис. 10. Среднее время пребывания продуктов сгорания в высокотемпературных зонах

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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> Pollutant Formation in a Turbulent Coal System. Coal Combustion and Gasification, p. 373, Plenum, NY, 1985.

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

### APPLICATION OF GAS DYNAMICS NUMERICAL METHODS FOR THE ANALYSIS OF NITROGEN OXIDE FORMATION PROCESS AND CHOOSING LOW EMISSION COMBUSTOR DESIGN

© 2006 Yu. G. Kutsenko, S. F. Onegin

JSC «Aviadvigatel», Perm

The paper deals with the problems of mathematical modeling of physical and chemical processes in gas-turbine engine combustors. Multicomponent reacting gas flow in a combustor is calculated. Using the results of a series of combustor parametrical calculations a liner design is selected with a minimum level of nitrogen oxide emission.