

4. Combustion Research Facility News. / Schefer R.W., Namazian M., Kelly J. // vol. 3, 4. Sandia. 1991.
5. Smoot L.D., Smith P.J. NO_x Pollutant Formation in a Turbulent Coal System. Coal Combustion and Gasification. Plenum, NY. 1985. - P. 373.

УДК 621.438:536.38

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДА АЗОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

Куценко Ю.Г., Онегин С.Ф.

ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь

1. ВВЕДЕНИЕ

Методы вычислительной газовой динамики (ВГД) находят все большее применение в авиационной промышленности для расчета камер сгорания [1]. Ранее применение этих методов для практического решения задач, связанных с процессом горения, было ограничено из-за больших затрат времени на генерацию расчетной сетки и получение решения. Экспериментальное тестирование систем двигателя, связанных с процессом горения могло завершиться быстрее, чем вычислительный эксперимент, включающий в себя построение расчетной сетки, запуск нескольких вариантов расчета и представление графиков основных параметров (потери полного давления, профиль температуры на выходе из газосборника, параметры эмиссии и т.д.). Недавние успехи в объединении в единую систему САД систем твердотельного моделирования с программами генерации расчетных сеток и развитие программ параллельного решения уравнений Навье-Стокса с использованием гибридных типов элементов позволили методам ВГД составить конкуренцию экспериментам.

2. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ КАМЕР СГОРАНИЯ

Основные этапы современной методологии параметрических численных исследований камер сгорания с использованием методов ВГД (рис. 1) кратко рассматриваются ниже:

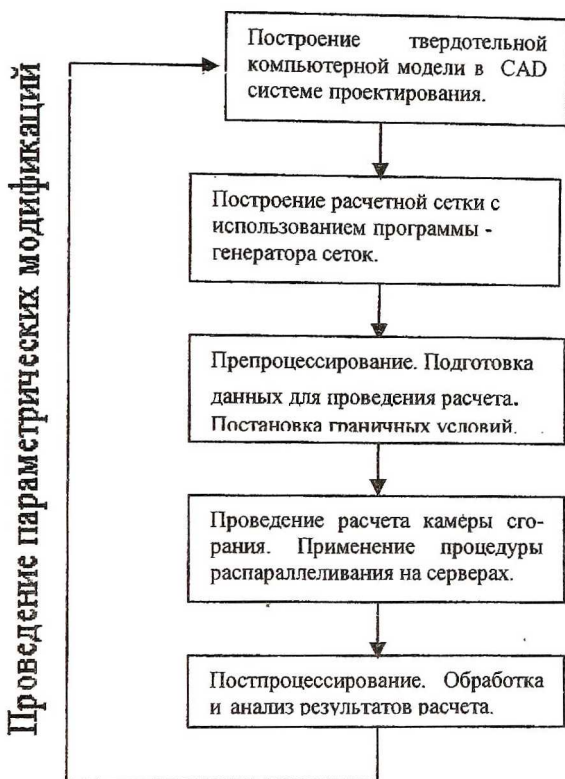


Рис. 1. Схема проведения численного эксперимента

1. Твердотельное моделирование

Твердотельное моделирование является стартовой точкой рассматриваемой методологии. Твердотельное моделирование осуществляется с использованием коммерческих программ, таких как *UNIGRAPHICS*. Инженер, занимающийся анализом физико-химических процессов в камере сгорания, может использовать твердотельную модель, построенную конструктором, после того, как из нее удалены все мелкие элементы конст-

рукции и зазоры. Модифицированные модели затем экспортируются в программы – генераторы расчетных сеток.

2. *Генерация расчетных сеток.* Построение расчетных сеток осуществляется с программ – генераторов расчетных сеток. Современные газодинамические пакеты используют расчетные сетки двух типов – неструктурированные (*CFX-5.6*, *Fluent 6.1*) и блочно-структурированные (*CFX-TASCflow*). Готовые сетки экспортируются в препроцессор.

3. *Препроцессирование.* В программе-препроцессоре производится выбор математических моделей, задание граничных условий и управляющих параметров расчета.

4. *Проведение расчета.* Для проведения расчетов обычно используется программа, основанная на решении уравнений Навье-Стокса в трехмерной постановке с использованием метода контрольных объемов. Программа расчета способна использовать гибридные сетки, включает в себя $k-\varepsilon$, $k-\omega$ модели турбулентности и их модификации, а также модели горения, распространения капель топлива и радиационного теплообмена. Применяется распараллеливание расчетов на несколько процессоров одного компьютера или на несколько рабочих станций. Распараллеливание делается “на лету”, так что программа расчета должна быть достаточно гибкой, чтобы учесть изменения в числе и типе вычислительных серверов и рабочих станций.

5. *Постпроцессирование.* Средства постпроцессирования являются неотъемлемой частью рассматриваемой цепочки. Программы постпроцессирования обеспечивают графическое представление результатов расчета и вывод количественных характеристик.

Данная методология позволяет инженеру-аналитику ускорить процесс моделирования расчетных областей с большой степенью детализации и получать результаты расчетов в сроки сравнимые со сроками проведения экспериментов. С использованием рассматриваемой методологии методы ВГД могут быть применены для улучшения характеристик камер сгорания, определения влияния конструкции фронтального устройства, распределения воздуха по жаровой трубе на структуру зоны горения и выбросы вредных веществ.

3. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ПО И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

С использованием методологии проведения параметрических численных исследований были проанализированы варианты конструкций камер сгорания, 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; от-

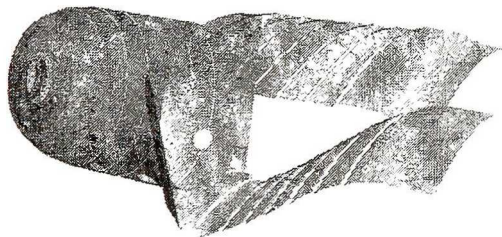


Рис. 2. Модель жаровой трубы и газосборника камеры сгорания в пакете CFX-TASCflow

верстия 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).

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* [2].

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: $P^*_к = 17,95 \text{ кгс/см}^2$, $T^*_к = 829 \text{ К}$, $G_g = 4,067 \text{ кг/с}$, $\alpha = 3,05$.

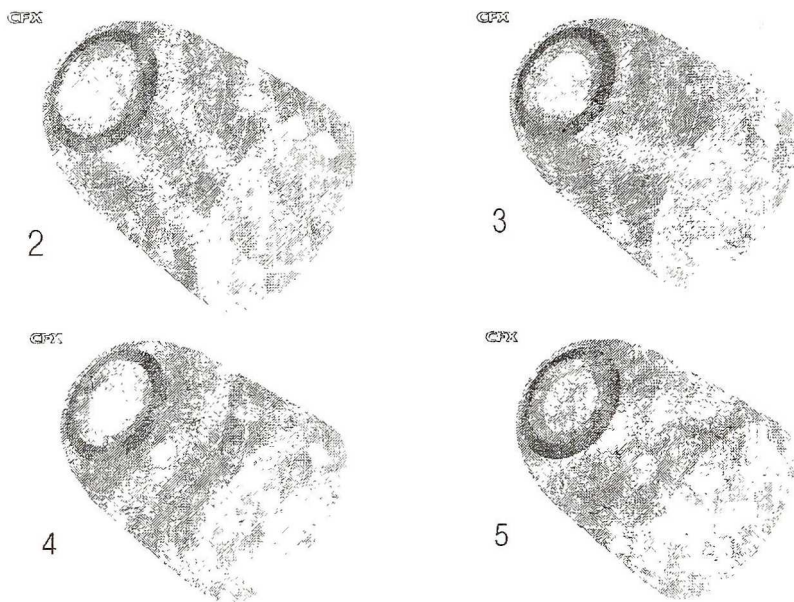


Рис. 3. Модификации жаровой трубы

При проведении расчетов производилось решение уравнений Навье-Стокса, использовалась $k-\varepsilon$ RNG модель турбулентности. Для моделирования процесса горения керосина использовалась модель тонкого фронта пламени (*Flamelet*) совместно с моделью описывающей движение и испарение каплей керосина в лагранжевой постановке. Процесс турбулентного перемешивания топлива и окислителя моделировался в рамках *Flamelet* модели горения путем решения уравнения для массовой доли восстановленного топлива Z и ее вариации. Горение керосина описывалось как процесс окисления углеводорода с химической формулой $C_{12}H_{23}$. Для расчета уровня эмиссии оксида азота использовался кинетический механизм Зельдовича. Параметры распыла задавались исходя из результатов расчета центробежной форсунки. В таблице 1 даны результаты расчетов концентрации NO на выходе из камеры сгорания.

Таблица 1. Результаты расчетов концентрации NO .

№ варианта	Модификация жаровой трубы	Изменение уровня эмиссии NO по отношению к варианту № 1, %
1	основные отверстия расположены через секцию	–
2	основные отверстия 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 длинам 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):

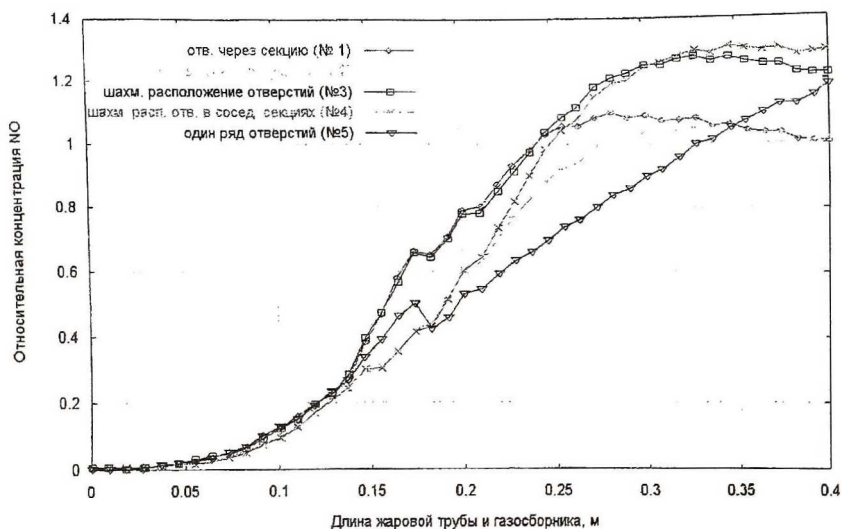


Рис. 4. Влияние расположения основных отверстий на уровень эмиссии NO

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

варианты с шахматным расположением 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 данные необходимо отметить следующее: варианты камер сгорания, 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 камер сгорания, 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.

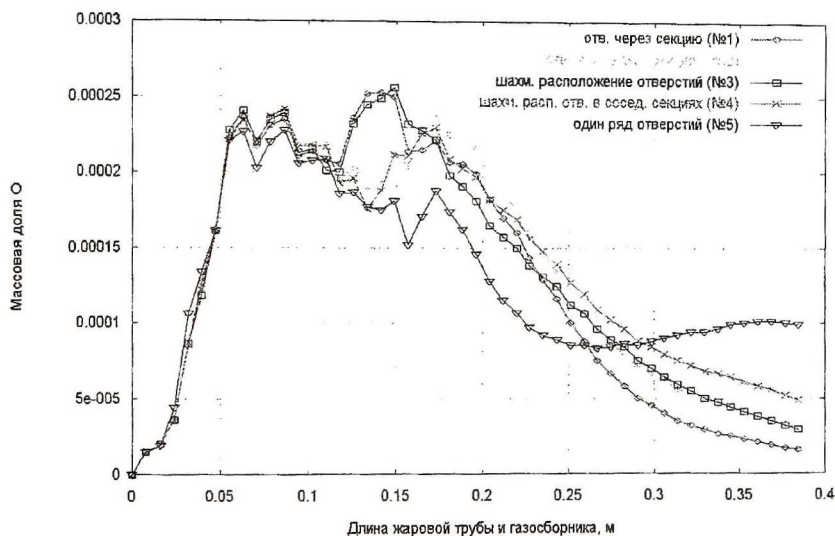


Рис. 5. Влияние расположения основных отверстий на распределение массовой доли O по длине жаровой трубы и газосборника

Из представленных данных видно, что в целом подтверждается зависимость увеличения концентрации NO на выходе из камеры сгорания от повышенного содержания в продуктах сгорания атомарного кислорода. Исключение 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 газосборнике оказывает определяющее влияние на уровень эмиссии оксида азота.

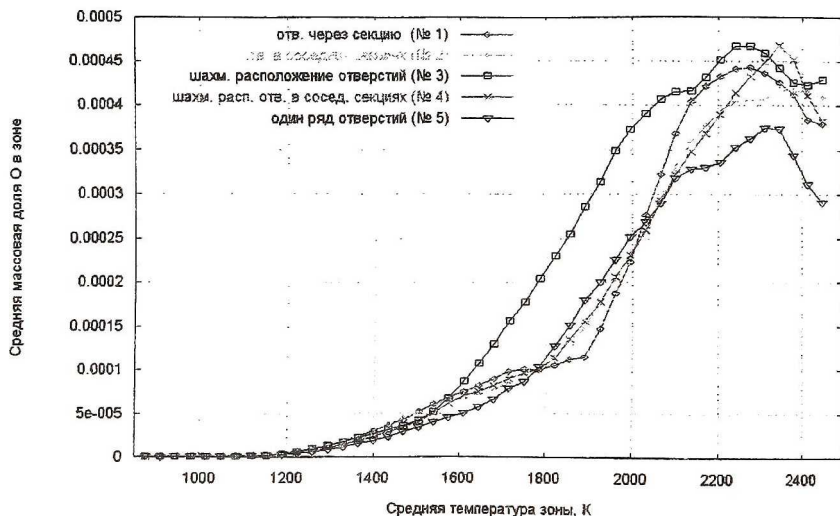


Рис. 6. Средняя массовая доля O в высокотемпературных зонах

Информация об относительных объемах ($V_{отн} = \frac{V_{зоны}}{V_{жар. трубы} + V_{газосб}}$),

занимаемых высокотемпературными зонами в жаровой трубе камеры сгорания и в газосборнике, приведена на рис. 7. Вариант № 3 имеет обширные высокотемпературные 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 камеры сгорания (рис. 8).

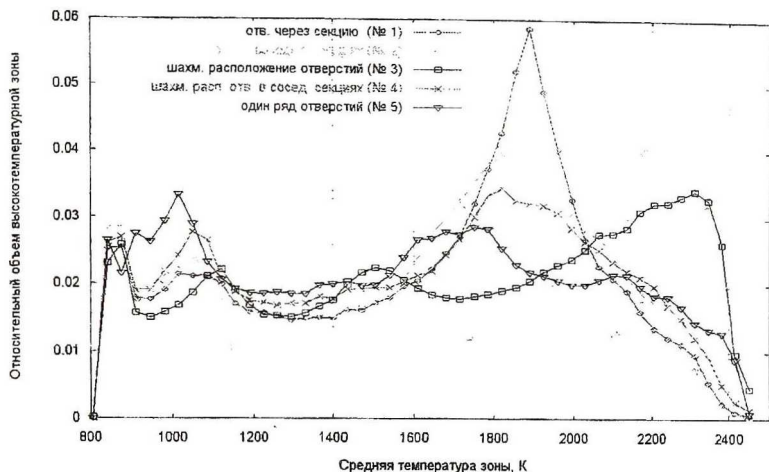


Рис. 7. Относительный объем высокотемпературных зон в жаровой трубе и газосборнике

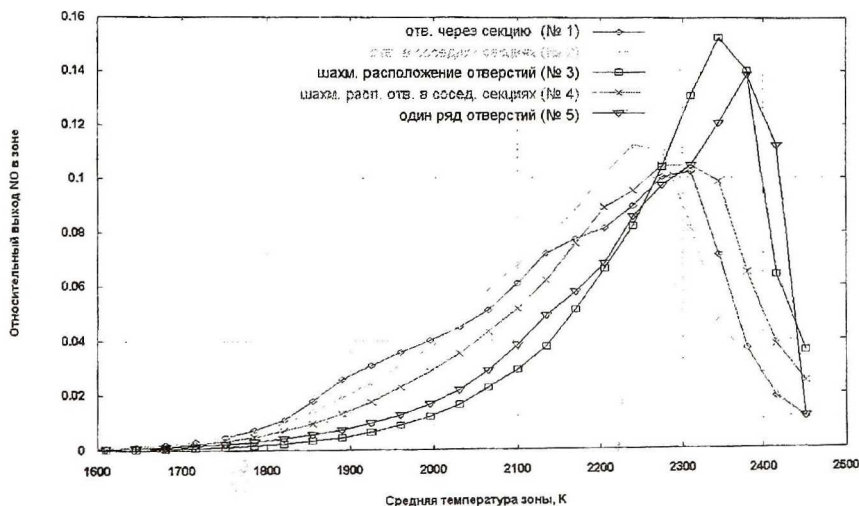


Рис. 8. Относительный выход NO в высокотемпературных зонах жаровой трубы и газосборника

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 рас-

положенные в шахматном порядке в соседних рядах (№ 4), не могут разбить ядро первичной зоны вблизи оси жаровой трубы, что приводит к выходу высокотемпературного закрученного потока в газосборник (рис. 9).

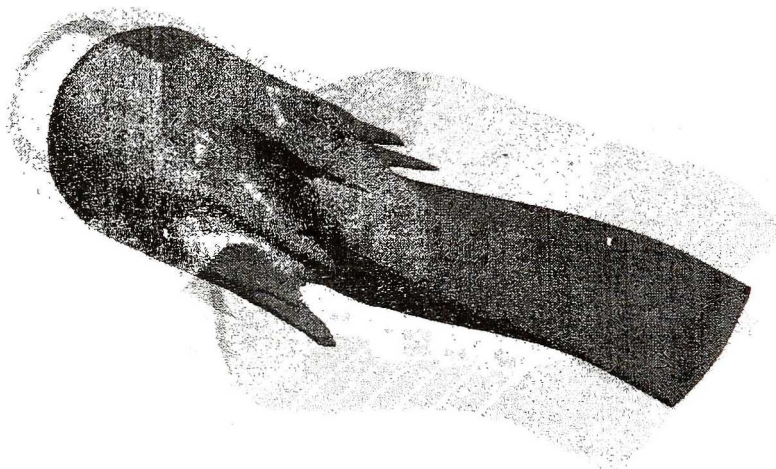


Рис. 9. Исоповерхность температуры 1950 К. Вариант жаровой трубы с одним рядом отверстий (№ 5)

Следовательно, в качестве критерия, определяющего уровень эмиссии оксида азота для данных камер сгорания, можно использовать среднее время пребывания продуктов сгорания в высокотемпературной зоне. Данные, представленные на рис. 10 подтверждают правильность выбора данного критерия.

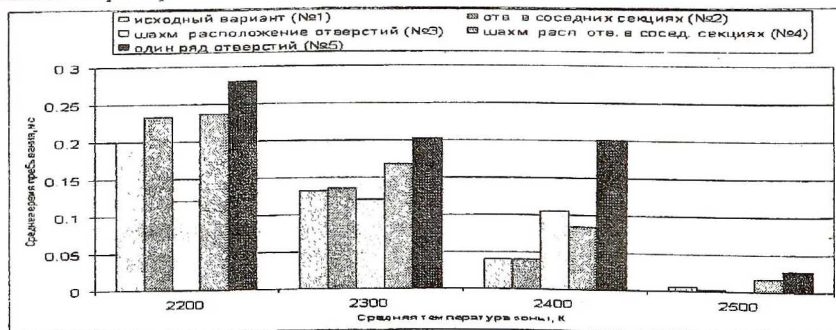


Рис. 10. Среднее время пребывания продуктов сгорания в высокотемпературных зонах

Варианты конструкций камер сгорания 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. Куценко Ю.Г., Онегин С.Ф. Применение методов вычислительной газовой динамики для моделирования процессов течения многокомпонентного потока газа, горения и теплообмена в камере сгорания газотурбинного двигателя. Вестник СГАУ, Вып. 2. 2002. -С. 60-64.
2. CFX- TASCflow Theory Documentation, AEA Technology. 2002.

УДК 621.452.32

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПАУ ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ

Лукачев С.В., Матвеев С.Г., Чечет И.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет

Продукты сгорания углеводородных топлив обладают канцерогенной и мутагенной активностью, т.е. способны вызывать раковые заболевания у живых организмов и мутацию клеток, благодаря содержанию в них ПАУ (полициклические ароматические углеводороды). Для выявления путей образования ПАУ создаются модели, состоящие из детальных кинетических схем окисления углеводородных топлив, включающих сотни химических реакций и реагирующих веществ [1,2,3,4].

В связи с многочисленностью кинетических и термодинамических данных, а также разнообразностью форматов их представления, важной