

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ
ЗА СТРУЯМИ ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА И КАЧЕСТВА
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ТРЕБУЕМОМ УЧАСТКЕ ДЛИНЫ
В СМЕСИТЕЛЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД**

Юрина А.Ю., Токарев В.В., Шмотин Ю.Н.

ОАО «НПО «САТУРН», г. Рыбинск

Современные авиационные камеры сгорания можно охарактеризовать как камеры сгорания с «богатым» горением в первичной зоне. Они сконструированы таким образом, что все топливо подается в первичную зону камеры и смешивается с частью суммарного расхода воздуха для создания стабильной, «богатой» зоны горения. Оставшийся воздух подводится в зону разбавления. Смесь «богатых», обедненных по кислороду продуктов горения первичной зоны быстро реагирует с вторичным воздухом, а затем разбавляется до требуемой температуры по направлению к выходу из камеры сгорания. Если процесс смешения в этой зоне выполнен не совершенно, то структура потока в ней будет существенно неоднородной, что приведет к местному стехиометрическому горению с образованием большого количества NO_x или к появлению высокотемпературных следов в поле температур на выходе из камеры сгорания [1-8].

Целью данной работы является поиск оптимального варианта организации разбавления продуктов сгорания, поступающих из богатой первичной зоны на основании численного эксперимента с применением газодинамического пакета CFX-TASCflow. Требовалось осуществить максимально быстрое охлаждения продуктов сгорания и минимальную температурную неравномерность в выходном сечении смесителя, а в итоге минимизировать образование «горячих» областей в ближнем следе за отверстиями для подвода вторичного воздуха.

Для описания поведения турбулентного сжимаемого теплопроводного потока газа был применен метод контрольных объемов, который позволяет получить любой газодинамический параметр в любой точке расчетной области. Расчет выполнялся на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Для замыкания системы уравнений использовалась SST модель турбулентности. В работе представ-

лены результаты исследования 15-ти вариантов конструкций смесительного модуля, которые отличались формой, размером и количеством отверстий для подвода вторичного воздуха, а также длиной центрального тела. Суммарный расход газа, суммарный расход вторичного воздуха, а также суммарная площадь отверстий оставались неизменными. Для всех вариантов смесительного модуля расчет выполнялся для сектора смесителя, размером $\frac{360}{n}$ градусов, где n – количество отверстий в одном ряду. Закрутка основного потока не моделировалась. Смесь продуктов сгорания, поступающая из первичной зоны в зону разбавления, заменялась прямолинейным потоком газа при температуре 1900 К. Температура охлаждающего воздуха составляла 700 К, направление струй задавалось по нормали к поверхности смесителя в области отверстия.

Оценка вариантов конструкции производилась на основании величины безразмерной температуры, а также на основании интегрального параметра - нормализованного отклонения от безразмерной температуры. Безразмерная температура характеризует неравномерность поля температур в данном сечении, а интегральный параметр нормализованного отклонения – качество (скорость) перемешивания на требуемом участке длины.

Для определения неравномерности поля температур в ближнем следе, величина безразмерной температуры определялась по соотношению:

$$\Theta = \frac{T_i^* - T_k^*}{T_{cp}^* - T_k^*}, \quad (1)$$

где T_i^* - местная полная температура; T_k^* - полная температура за компрессором; T_{cp}^* - среднemasсовая температура газа в соответствующем сечении. Радиальное распределение осредненной в окружном направлении безразмерной температуры представлено на рис.1. Для оценки отклонения безразмерной температуры от значения $\Theta = 1$, при котором смесь является полностью перемешанной, проинтегрируем функцию $((\Theta(r) - 1)^2)^{0,5}$ вдоль радиуса смесителя:

$$\Theta_{\text{сум}} = \int_0^1 ((\Theta(r) - 1)^2)^{0,5} d(r). \quad (2)$$

Результаты интегрирования представлены в табл.1.

Качество перемешивания вторичного и первичного воздуха вдоль оси смесителя, на участке от 0,35 м до 1,01 м от входа в расчетную область (рис.2) определяется в соответствии со следующей методикой. Методика заимствована из работы [9].

Безразмерная температура:

$$\Theta_i = \frac{T_i^* - T_k^*}{T_z^* - T_k^*}, \quad (3)$$

где T_z^* - полная температура газа на входе в смеситель.

Стандартное отклонение от безразмерной температуры:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (\Theta_m - \Theta_i)^2}, \quad (4)$$

где

$$\Theta_m = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \Theta_i, \quad (5)$$

Теоретическое максимальное стандартное отклонение:

$$\sigma_{\text{max}} = \sqrt{\Theta_m \cdot (1 - \Theta_m)}, \quad (6)$$

Нормализованное отклонение характеризует скорость перемешивания первичного и вторичного потоков вдоль оси смесителя и определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{norm}} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{\text{max}}} \quad (7)$$

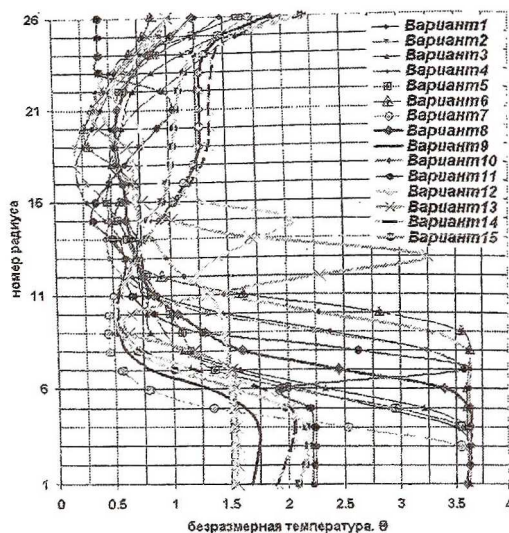
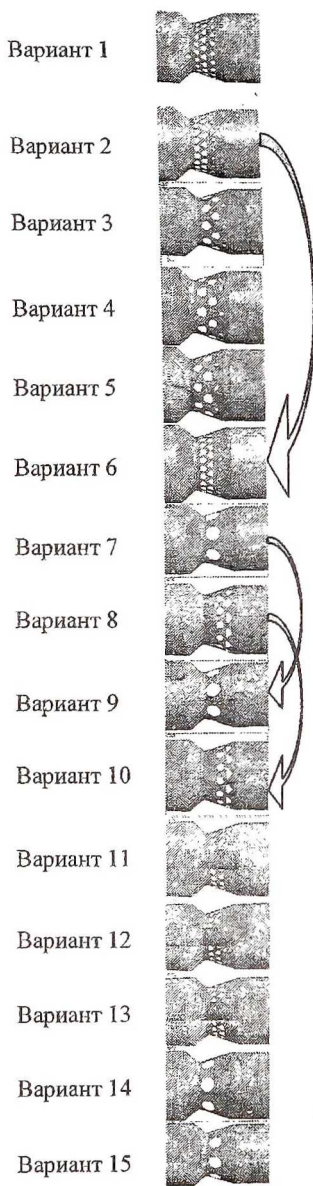


Рис. 1. Радиальная эпюра безразмерной температуры усредненной в окружном направлении на расстоянии $2d$ от последнего ряда отверстий, где d – диаметр отверстия в первом ряду

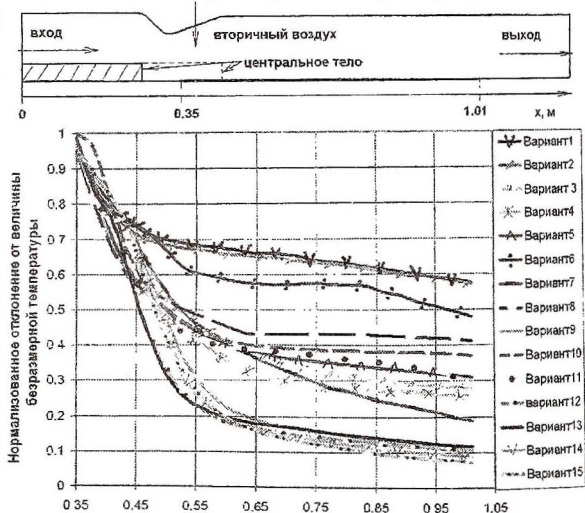


Рис. 2. Распределение нормализованного отклонения от безразмерной температуры $\sigma_{\text{ном}}$ вдоль оси смесителя

Примечание: фигурные стрелки показывают переход от исходного варианта к аналогичному варианту, но с продленным центральным телом.

Для определения качества перемешивания на требуемом участке длины смесителя, нормализованное отклонение интегрируется вдоль оси смесителя:

$$\sum_{norm} = \int_{0,25} \sigma_{norm} d(x) \quad (8)$$

Определим величину относительного импульса для одного отверстия в первом ряду для каждого варианта по соотношению:

$$\bar{I}_{отв} = \frac{G_{отв} \cdot v_{отв}}{G_{отв} \cdot v_{cp}} \quad (9)$$

где $v_{отв}$ – скорость воздуха на входе в отверстие;

- v_{cp} – среднемассовая скорость основного потока перед струёй,
- $G_{отв}$ – расход воздуха через одно отверстие,
- G_{Σ} – расход газа в первичной зоне $\frac{G_{вкс}}{n}$ где n – число отверстий в данном ряду. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Проведем анализ рассмотренных вариантов по группам:

Группа А струи с малым импульсом ($\bar{I}_{отв} = 0,0642 \dots 0,095$), варианты - 1, 2, 6, 11, 12, 13: малая глубина проникновения струй. В центре смесителя остается не размешанное горячее ядро, следовательно. худший показатель по качеству перемешивания на требуемом участке длины (варианты 1, 2, 6):

- хорошее перемешивание на периферии;
- горячие следы на стенке за струями имеют небольшую протяженность.

Подача части охлаждающего воздуха через продленное центральное тело позволяет добиться хороших результатов по неравномерности поля температур и качеству перемешивания на требуемом участке длины (варианты 11, 12, 13).

Таблица 1. Качество перемешивания первичного и вторичного воздуха в смесителе Σ_{norm} , величина относительного импульса струй и интегральное значение функции $\Theta_{сум} = ((\Theta(r) - 1)^2)^{0,5}$

Обозначение варианта	Σ_{norm}	$\bar{l}_{отс}$	$\Theta_{сум}$
Вариант 1	0,443805	0,0642	29,04954
Вариант 2	0,43653	0,08973	28,41284
Вариант 3	0,28428	0,245	19,12859
Вариант 4	0,26067	0,245	18,01713
Вариант 5	0,290385	0,168	18,40306
Вариант 6	0,404655	0,076	30,92171
Вариант 7	0,27507	0,5752	15,08135
Вариант 8	0,3249	0,197	21,56969
Вариант 9	0,206505	0,503	9,564067
Вариант 10	0,314715	0,177	21,56969
Вариант 11	0,292245	0,095	17,37248
Вариант 12	0,1776	0,079	10,15749
Вариант 13	0,184125	0,079	12,79694
Вариант 14	0,19248	0,4524	12,13272
Вариант 15	0,185733	0,4524	10,21254

Группа Б - струи со средним импульсом ($\bar{l}_{отс} = 0,168 \dots 0,245$), варианты 3-5, 8, 10: плохое перемешивание на периферии (варианты 3-5) и увеличение горячих следов на стенке за отверстиями:

- недостаточная глубина проникновения, в центре смесителя остается не размешанное горячее ядро.
- неудовлетворительный показатель по качеству перемешивания на требуемом участке длины (варианты 3-5, 8, 10).

Увеличение количества отверстий в одном ряду с 10 (варианты 3-5) до 15 (варианты 8,10) улучшило перемешивание у периферии, но привело к увеличению горячего центрального ядра и снижению качества перемешивания на требуемом участке длины.

Группа В - струи с большим импульсом ($\bar{l}_{отс} = 0,4524 \dots 0,5752$), варианты 7, 9, 14, 15:

- плохое перемешивание на периферии и еще большее увеличение горячих следов на стенке за отверстиями.
- недостаточная глубина проникновения. В центре смесителя остается не размешанное горячее ядро (вариант 7).

Добавление отверстий второго ряда в вариант 9 существенным образом не отразилось на размере горячих следов (варианты 14, 15), но несколько улучшило качество перемешивания (табл. 3).

Улучшение качества перемешивания на требуемом участке длины, поскольку продлением центрального тела удастся размещать центральное горячее ядро, получить существенно меньшую неравномерность поля температур в ближнем следе и значительно улучшить качество перемешивания на требуемом участке длины (варианты 9, 14, 15).

Выводы. Проведено численное исследование влияния формы и расположения отверстий на характеристики смещения струй воздуха со сносящим потоком в канале сложной формы. Результаты показали:

- по качеству перемешивания на требуемом участке длины наилучшими являются варианты 9, 12, 13, 14, 15;
- по неравномерности поля температур в ближнем следе – варианты 9, 12, 15;
- недостатком варианта 15 является наличие больших горячих следов за отверстиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев В. А. Распределение параметров в поперечных сечениях струй, распространяющихся в сносящем потоке.
2. Keffer J. F., Baines W.D. Круглая турбулентная струя в сносящем поперечном потоке, J. Fluid Mech. 1963. №1. – С.15-24.
3. Безменов В.Я., Онищик И.И. Исследование влияния конструктивных параметров зоны смешения кольцевой камеры сгорания ГТД на неравномерность полей температур в выходном сечении (на моделях). Сборник трудов ЦИАМ. Москва, 1971. № 488.
4. Злобин В.В. Исследование перемешивания системы струй с поперечным потоком в канале. ИФЖ. Т.ХХIII. 1972, №3, сентябрь. – С.87-90.
5. Кавсаоглу М.С., Шец Дж.А. Истечение струй в сносящий поток: влияние закрутки и турбулентных пульсаций // Аэрокосмическая техника. 1990. №1, январь. – С.54-60.
6. Исследование круглой турбулентной струи в сносящем потоке. / Вязовский Ю.П., Голубев В.А., Климкин В.Ф. // ИФЖ. Т.ХХХIV. 1978. №4, апрель. – С.78-90.
7. Траектория одиночных струй различной плотности, распространяющихся в сносящем потоке воздуха. / Голубев В.А., Климкин В.Ф., Макаров И.С. // ИФЖ, Т.ХХХIV. 1978. №4, апрель. – С.23-56.

8. Кузнецов Н.Д., Токарев В.В. Многогорелочные камеры сгорания – одно из перспективных направлений развития двигателей. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1995. №2. – С.87-95.
9. Secondary air mixing in a typical combustor flowfield / Blomeyer M., Krautkremer B., Haag O., Hennecke D.K. // ISABE 99-7189, a99-34190.

УДК 621.438

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ

Юрина А.Ю., Токарев В.В., Шмотин Ю.Н.

ОАО «НПО «САТУРН», г. Рыбинск

Одним из способов организации низкоэмиссионного горения в камере сгорания ГТД является сжигание бедной топливоздушнoй смеси, подаваемой в камеру сгорания через многогорелочное фронтoвое устройство. Течение воздуха в первичной зоне подобной камеры сгорания представляет собой течение большого числа закрученных струй воздуха, содержащих топливо [1]. На рабочий процесс в подобной камере сгорания оказывает существенное влияние взаимодействие соседних закрученных струй, кроме того, наличие неоднородностей в бедной топливоздушнoй смеси приводит к неустойчивому горению. При наличии закрутки взаимодействие струй и факелов усиливается [2].

Целью данной работы являлось исследование взаимодействия закрученных струй на основе численного моделирования. Численный эксперимент проводился с помощью коммерческого газодинамического пакета CFX-TASCflow. Оценивалось влияние взаимного расположения горелок во фронтoвой плите и направления закрутки струй на структуру потока для того, чтобы определить оптимальную схему многогорелочного фронтoвого устройства с точки зрения достижения максимального качества перемешивания топливоздушнoй смеси на кратчайшем расстоянии от сопла завихрителя. Расчет выполнялся на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Для описания поведения турбулентного сжимаемого теплопроводного потока газа был применен метод контрольных объемов, который позволяет получить