

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДОВОДКА ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЖАРОВОЙ ТРУБЫ ГТД

© 2006 А. Ю. Юрина, Д. К. Василюк, В. В. Токарев, Ю. Н. Шмотин

ОАО “НПО “Сатурн”, г. Рыбинск

Проведен численно-параметрический анализ элементов жаровой трубы газотурбинного двигателя (ГТД). Рассмотрено влияние расположения и способа закрутки завихрителей во фронтальном устройстве на характеристики перемешивания топливовоздушной смеси в жаровой трубе. Проведено численное исследование температурной неоднородности в ближнем следе за струями вторичного воздуха и качества перемешивания в зоне смешения камеры сгорания.

### Введение

Камера сгорания (КС) является сложным и недостаточно изученным элементом газотурбинного двигателя из-за многообразия взаимосвязанных процессов, происходящих в ней. Сегодня к КС предъявляются дополнительные требования, в том числе по эмиссии вредных веществ. В настоящее время пути к улучшению характеристик может дать детальный анализ течения и процессов, происходящих внутри КС и ее элементов, при помощи современных методов математического моделирования.

### Фронтальное устройство

Одним из способов организации горения с низким уровнем эмиссии в камере сгорания ГТД является сжигание топливовоздушной смеси, подаваемой в КС через многогорелочное фронтальное устройство. Течение воздуха в первичной зоне подобной КС представляет собой течение большого числа закрученных струй воздуха, содержащих топливо. На рабочий процесс в подобной КС оказывает существенное влияние взаимодействие соседних закрученных струй. При наличии закрутки взаимодействие струй и факелов усиливается [1].

Численное исследование взаимодействия закрученных струй проводилось с помощью программного комплекса CFX-TASCflow [2]. Оценивалось влияние взаимного расположения горелок во фронтальной плите и направления закрутки струй на структуру потока для того, чтобы определить оптимальную схему многогорелочного фронтального устройства с точки зрения достижения

максимального качества перемешивания топливовоздушной 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 любой газодинамический параметр в любой точке расчетной области. Для замыкания системы уравнений использовалась SST/к- $\epsilon$  модель турбулентности.

С целью подтверждения адекватности описания данным вычислительным комплексом течений с сильной кривизной линий тока и с наличием больших сдвиговых напряжений было проведено сопоставление результатов расчета с экспериментом. Проведен расчет одного горелочного модуля, отличающегося от горелок, исследуемых в данной работе, углом установки лопаток, который равняется 30 градусам. Экспериментальные данные заимствованы из [3].

В работе представлены результаты расчета десяти вариантов горелочного модуля. Варианты конструкции отличались направлением закрутки топливовоздушных струй в соседних горелках, а также расстоянием между геометрическими осями соседних горелок. Каждый горелочный модуль состоял из четырех горелок, которые были помещены в канал прямоугольного сечения, имеющего верхнюю и нижнюю стенки; на боковых поверхностях задавалось граничное условие

типа «периодичность». Внутри каждой горелки располагалась форсунка и осевой лопаточный завихритель. Закрутка струи топлива осуществлялась заданием осевого, окружного и радиального компонентов скорости под углом 45 градусов к оси завихрителя. Направление вращения топлива и воздуха спутное. В качестве топлива применялся метан. Расчет выполнен без горения. Исследование проводилось в следующем диапазоне варьируемых параметров: расположение горелок в расчетном секторе осуществлялось в шахматном порядке и по квадрату; направление закрутки топливоздушных струй: 45 градусов и -45 градусов; относительный шаг между соседними горелками,  $t_{\text{отн}} = t/d$ , где  $d$  – диаметр сопла горелки (рис. 1): 3, 4, 5.

Для оценки качества перемешивания топлива с воздухом определено среднеквадратичное отклонение ( $S_i$ ) локальной концентрации топлива, осредненное по расходу смеси в 54-х сечениях, расположенных за горелкой; построены графики зависимости  $S_i(x)$ ; полученная зависимость была проинтегрирована вдоль оси  $x$ .

Осредненное по расходу квадратичное отклонение местной концентрации метана в топливоздушной смеси от среднемассовой концентрации в  $i$ -ом сечении равно

$$S_i = (CH4_{cp,i} - CH4_{ji, cp,i})^2,$$

где  $CH4$  – концентрация топлива, в массовых долях;  $(cp, i)$  – осреднение по расходу в  $i$ -ом сечении сектора,  $j, i$  – местное значение. Ин-

тегральная величина квадратичного отклонения

$$\Sigma = \int_0^x S_i dx.$$

График зависимости  $S_i(x)$  представлен на рис. 2, а результаты расчета в табл. 1.

Оценивая интегральную величину квадратичного отклонения, можно заключить, что направление крутки струй не сказывается существенным образом на качестве перемешивания топлива с воздухом, а изменение расстояния между струями, напротив, приводит к значительному ухудшению перемешивания, и в итоге получаемая смесь является менее однородной. Структура закрученного потока определяется как параметром закрутки, то есть кинематическими характеристиками, так и конфигурацией области, в которую он истекает. Из результатов расчета следует, что конфузорный насадок в горелке дифрагирует поток. Это приводит к тому, что осевая зона обратных токов (ЗОТ) вытесняется из горелки и формируется уже непосредственно за соплом. Следовательно, на структуру закрученного потока и на условия формирования осевой зоны обратных токов, кроме всего прочего, влияет взаимодействие струй между собой, взаимодействие струй со стенками, а также взаимодействие с прямыми и обратными токами газа, возникающими в камере в данных условиях. В численном эксперименте наблюдалось существен-

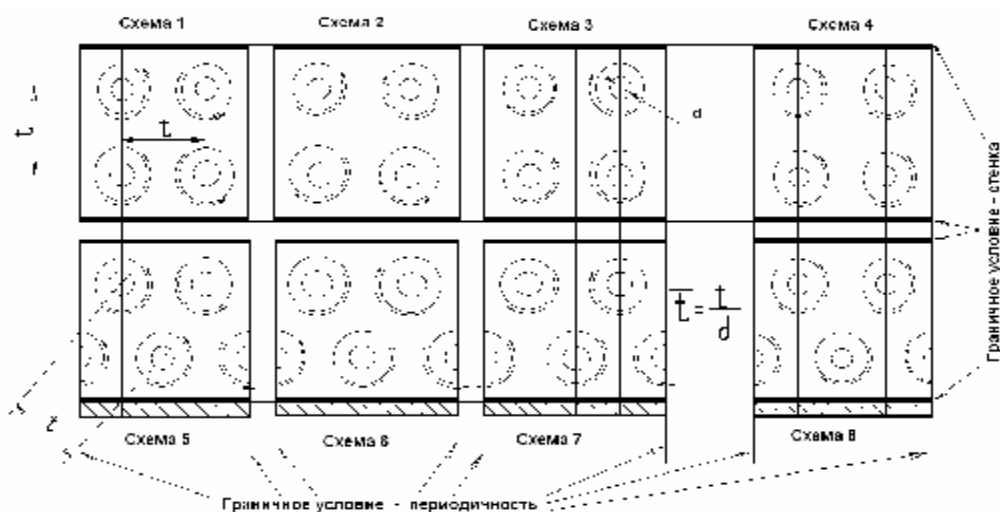


Рис. 1. Схема расположения горелок в расчетной области и направления крутки струй

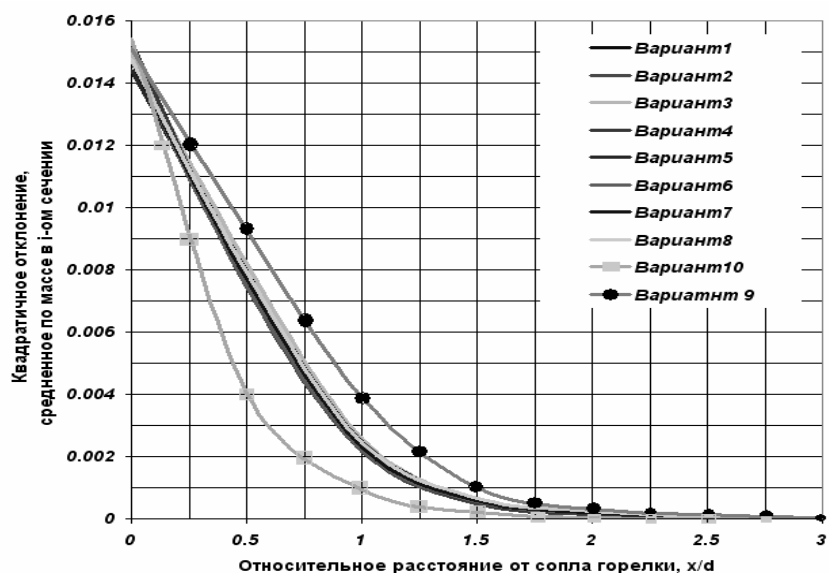


Рис. 2. Распределение квадратичного отклонения вдоль расчетной области

Таблица 1. Интегральная величина квадратичного отклонения  $\Sigma$

Вариант	Относительный шаг, $t_{отн}$	Схема расположения и закрутки	$\Sigma \cdot 10^{-3}$
1	4	1	9,3
2	4	2	8,96
3	4	3	9,55
4	4	4	9,13
5	4	5	9,28
6	4	6	8,94
7	4	7	9,15
8	4	8	9,38
9	5	1	11,13
10	3	1	6,47

ное изменение формы осевой зоны обратных токов, восстановленной по осевой скорости, осредненной на временном шаге, равном  $1 \cdot 10^{-5}$  секунд, при изменении расстояния между горелками. С увеличением относительного шага зона обратных токов уменьшалась, а поскольку в закрученной струе, выходящей из сопла, неперемешанная часть топлива находится в ядре струи, уменьшение осевой ЗОТ ухудшает перемешивание слоев топлива и воздуха внутри струи. С уменьшением относительного шага ЗОТ становилась более наполненной вблизи сопла горелки, что, очевидно, способствует перемешиванию.

На основании результатов расчета качества перемешивания для вариантов 1, 9, 10 был построен график зависимости интегрального параметра отклонения качества перемешивания  $\Sigma$  от величины отношения площади фронта к суммарной площади выходных сечений горелок:

$$\bar{F} = F_{\text{фронта}} / F_{\text{сумм.сопла}}$$

Эта зависимость аппроксимирована выражением  $\Sigma = 0,0055e^{0,0211\bar{F}}$  и представлена на рис. 3.

Сопоставление результатов расчета одиночной горелки с углом установки лопа-



Рис. 3. Зависимость интегрального параметра качества перемешивания от относительной площади фронта

ток 30 градусов и эксперимента представлено на рис. 4. Из него следует, что данные расчета и эксперимента хорошо согласуются между собой.

#### Зона смешения

Современные авиационные КС можно охарактеризовать как КС 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 возду-

хом, а затем разбавляется до требуемой температуры по направлению к выходу из КС. Если процесс смешения в этой зоне выполнен несовершенно, 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 КС.

Проведен поиск оптимального варианта организации разбавления продуктов сгорания, поступающих из богатой первичной зоны, на основании численного эксперимента с применением газодинамического пакета TASCflow. Требуется осуществить максимально быстрое охлаждения продуктов сго-

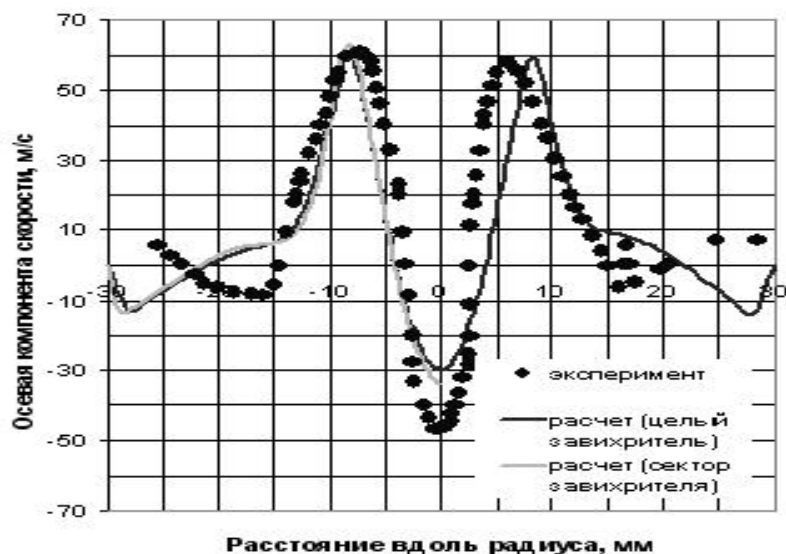


Рис. 4. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Распределение осевого компонента скорости вдоль радиуса на расстоянии 15 мм от выходного сопла горелочного модуля

рания и минимальную температурную неравномерность в выходном сечении смесителя и в итоге минимизировать образование «горячих областей» в ближнем следе за отверстиями для подвода вторичного воздуха.

Исследовались 15 вариантов конструкций смесительного модуля (рис. 5), 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 в  $360/n$  градусов, где  $n$  – количество отверстий

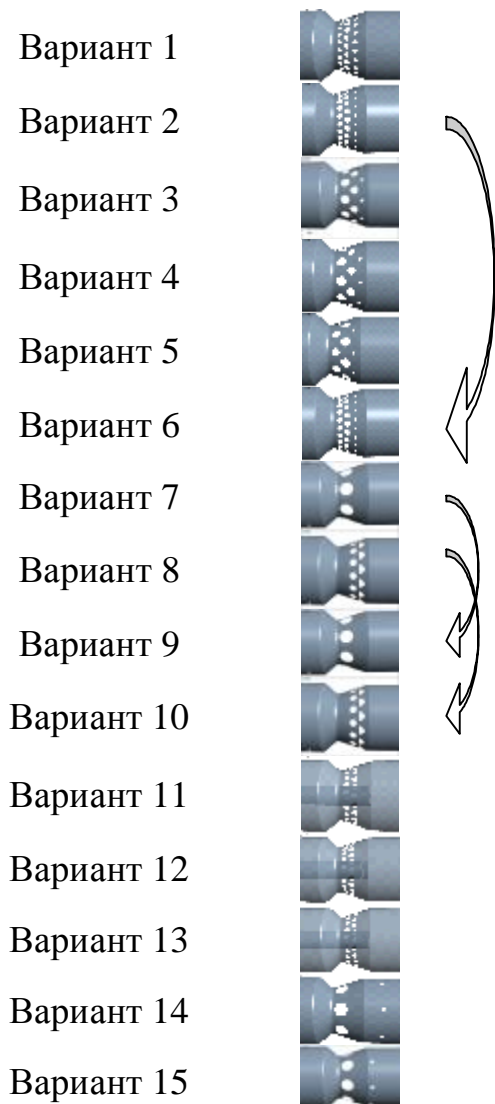


Рис. 5. Варианты расчета. Фигурные стрелки показывают переход от исходного варианта к аналогичному варианту, но с продленным центральным телом

в одном ряду. Закрутка основного потока не моделировалась. Смесь продуктов сгорания, поступающих 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 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

$$\Theta = \frac{T_i^* - T_k^*}{T_{cp}^* - T_k^*},$$

где  $T_i^*$ , К - местная полная температура,

$T_k^*$ , К - полная температура за компрессором,

$T_{cp}^*$ , К - среднemasсовая температура газа в соответствующем сечении. Радиальное распределение осредненной в окружном направлении безразмерной температуры представлено на рис. 6. Для оценки отклонения безразмерной температуры от значения  $\Theta=1$ , при котором смесь является полностью перемешанной, функция  $((\Theta(r) - 1)^2)^{0.5}$  интегрируется вдоль радиуса смесителя:

$$\Theta_{сум} = \int_0^r ((\Theta(r) - 1)^2)^{0.5} d(r).$$

Результаты интегрирования представлены в табл. 2.

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. 7) определяется в соответствии со следующей методикой [4].

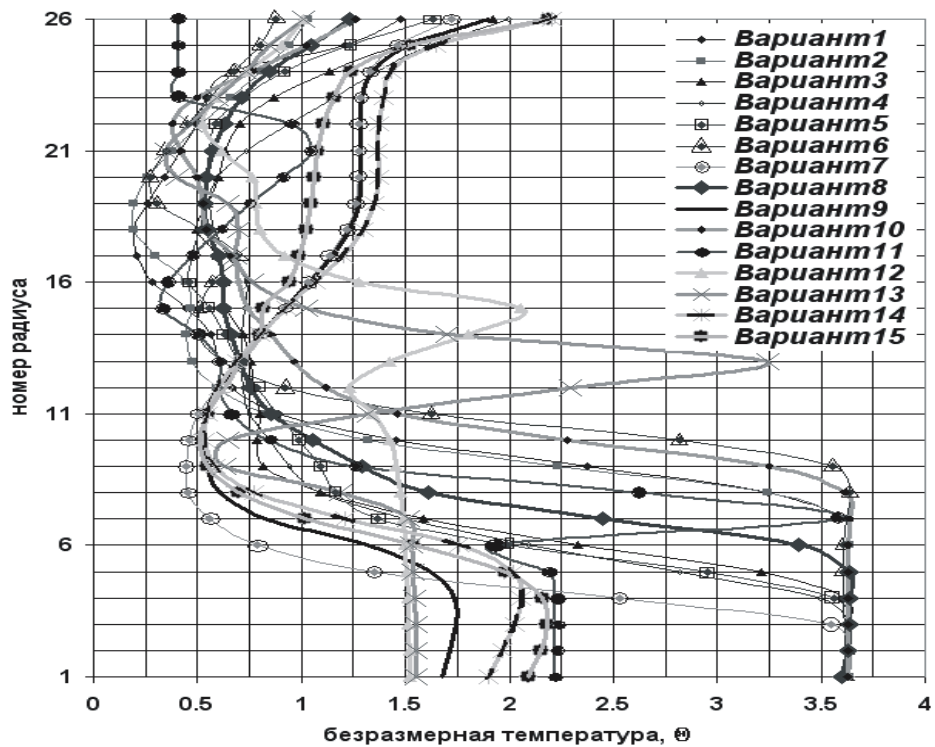


Рис. 6. Радиальная эюра безразмерной температуры, осредненной в окружном направлении на расстоянии  $2d$  от последнего ряда отверстий,  $d$  – диаметр отверстия в первом ряду

Таблица 2. Качество перемешивания первичного и вторичного воздуха в смесителе  $\Sigma_{norm}$ , величина относительного импульса струй и интегральное значение функции  $\Theta_{сум}$

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

Безразмерная температура:

$$\Theta_i = \frac{T_i^* - T_K^*}{T_2^* - T_K^*},$$

где  $T_2^*$ ,  $K$  - полная температура газа на входе в смеситель.

Стандартное отклонение от безразмерной температуры:

$$s_m = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Theta_m - \Theta_i)^2},$$

где

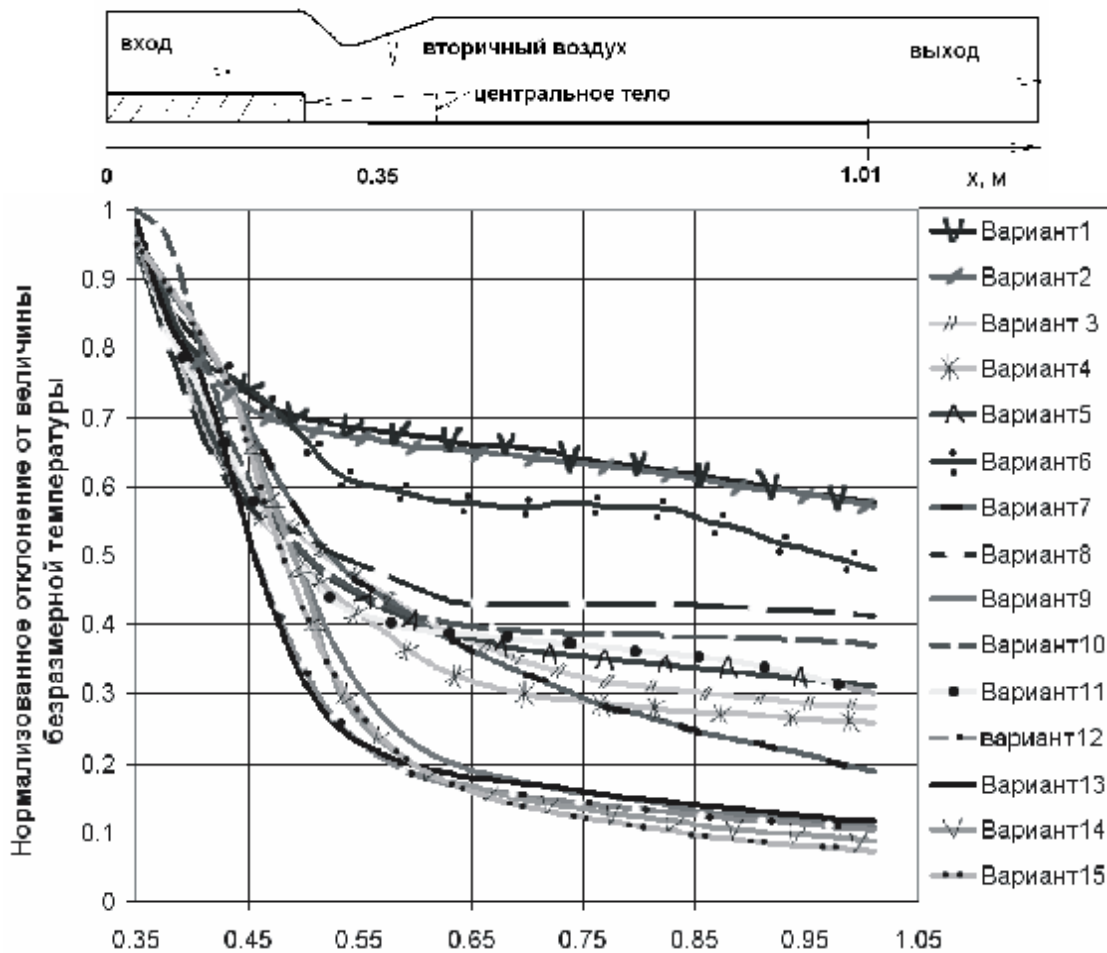


Рис. 7. Распределение нормализованного отклонения от безразмерной температуры вдоль оси смесителя

$$\Theta_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Theta_i.$$

Теоретическое максимальное стандартное отклонение:

$$s_{max} = \sqrt{\Theta_m (1 - \Theta_m)}.$$

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

$$s_{norm} = \frac{s_m}{s_{max}}.$$

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

$$\Sigma_{norm} = \int_{0,25}^l s_{norm} d(x).$$

Величина относительного импульса для одного отверстия в первом ряду для каждого варианта определяется по соотношению

$$\bar{I}_{омв} = \frac{G_{омв} v_{омв}}{G_{\Sigma} v_{cp}},$$

где  $v_{омв}$  – скорость воздуха на входе в отверстие,  $v_{cp}$  – среднемассовая скорость основного потока перед струей,  $G_{омв}$  – расход воздуха через одно отверстие,  $G_{\Sigma}$  – расход газа в первичной зоне  $G_{вкс}/n$ ,  $n$  – число отверстий в данном ряду. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Проведем анализ рассмотренных вариантов по группам.

Группа А - струи с малым импульсом ( $\bar{I}_{омв} = 0,0642 \dots 0,095$ ), варианты 1, 2, 6, 11, 12, 13. Малая глубина проникновения струй, в центре смесителя остается неразмешанное горячее ядро. Поэтому худший показатель по качеству перемешивания на требуемом участ-

тке 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).

Группа Б - струи со средним импульсом ( $\bar{I}_{ome} = 0,168 \dots 0,245$ ), 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 неразмешанное 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) улучшает перемешивание у периферии, но приводит к увеличению горячего центрального ядра и снижению качества перемешивания на требуемом участке длины.

Группа В - струи с большим импульсом ( $\bar{I}_{ome} = 0,4524 \dots 0,5752$ ), 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 отражается на размере горячих следов (варианты 14, 15), но несколько улучшает качество перемешивания (табл. 2). Улучшение качества перемешивания на требуемом участке длины, поскольку продлением центрального тела

удается размешать 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

В результате выполненной работы проведен параметрический анализ таких элементов жаровой трубы, как фронтное устройство и зона смешения.

Проведенное численное исследование взаимодействия закрученных струй для 10 вариантов конфигураций фронта горелочного отсека показало, что при увеличении расстояния между горелками качество перемешивания ухудшается, а направление крутки соседних струй не оказывает существенного влияния на качество перемешивания.

Проведенное численное исследование влияния формы и расположения отверстий на характеристики смешения струй воздуха со сносным потоком в канале сложной формы позволило определить наилучшие варианты конструкций жаровых труб.

### Список литературы

1. Гупта А. Лилли Д. и др. Закрученные потоки / Пер с англ. - М.: Мир, 1987.
2. CFX-TASCflow, v.2.12. User Documentation.
3. Васильев А. Ю., Майорова А. И., Свириденков А. А., Третьяков В. В., Ягодкин В. И. Исследование распыла топлива и смесеобразования в головной части камеры сгорания двигателей типа «НК». - Вестник СГАУ, № 2 (2), 2002 г.
4. M. Blomeyer, B. Krautkremer, O. Haag, D. K. Hennecke, Secondary air mixing in a typical combustor flowfield, ISABE 99-7189, a99-34190.