

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 топливоздушной смеси, подаваемой в камеру сгорания через многогорелочное фронтное 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 топливоздушной 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 фронтной плите и направления закрутки струй на структуру потока для того, чтобы определить оптимальную схему многогорелочного фронтного устройства с точки зрения достижения максимального качества перемешивания топливоздушной 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/  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности [4].

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  $30^\circ$ . Экспериментальные данные заимствованы из [3].

В работе представлены результаты расчета десяти вариантов горелочного модуля. Варианты конструкции отличались направлением закрутки топливоздушных 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 плосколопаточный завихритель. Закрутка струи топлива осуществлялась заданием осевой, окружной и радиальной компоненты скорости под углом  $45^\circ$  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:  $45^\circ$  и  $-45^\circ$ ; относительный шаг между соседними горелками -  $t_{\text{отн}} = \frac{t}{d}$ , где  $d$  – диаметр сошла горелки (см. рис.1: 3, 4, 5).

Для оценки качества перемешивания топлива с воздухом было выполнено следующее:

а) определено среднеквадратичное отклонение ( $\sigma_i$ ) локальной концентрации топлива, осредненное по расходу смеси в 54-х сечениях, расположенных за горелкой;

б) построены графики зависимости  $\sigma_i(x)$ ;

в) полученная зависимость была проинтегрирована вдоль оси  $x$ .

Методика определения качества перемешивания.

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

$$\sigma_i = (CH4_{cp,i} - CH4_{j,i})^2_{cp,i}, \quad (1)$$

где  $CH4$  - концентрация топлива, в массовых долях;  $CH4_{cp,i}$  - осреднение по расходу в  $i$ -ом сечении сектора;  $j, i$  - местное значение. Интегральная величина квадратичного отклонения:

$$\Sigma = \int_0^x \sigma_i dx, \quad (2)$$

График зависимости  $\sigma_i(x)$  представлен на рис.3, а результаты расчета - в табл.1.

Таблица 1. Интегральная величина квадратичного отклонения  $\Sigma$

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

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, наоборот, приводит к значительному ухудшению перемешивания, 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 [2,5]. Из результатов расчета очевидно, что конфузорный насадок в горелке диафрагмирует поток, что приводит к тому, что осевая зона обратных токов (ЗОТ) вытесняется из горелки и формируется уже непосредственно за соплом. Это значит, что 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 существенное 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 (рис.2). С увеличением относительного шага зона обратных токов уменьшалась, а поскольку в закрученной струе выходящей из сопла не перемешанная 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 построен график зависимости интегрального параметра отклонения качества перемешивания  $\Sigma$  от величины отношения площади фронта к суммарной площади выходных сечений горелок:

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

Эта зависимость аппроксимируется выражением  $\Sigma = 0,0055 \cdot e^{0,0211 \cdot \bar{F}}$  и представлена на рис.5.

Сопоставление результатов расчета одиночной горелки с углом установки лопаток  $30^\circ$  и эксперимента представлено на рис.4. Очевидно, что данные расчета и эксперимента хорошо согласуются между собой.

Выводы:

1. В результате тестирования газодинамического пакета на примере одиночной горелки и сравнения полученных данных с экспериментом, была подтверждена адекватность

описания закрученных потоков данным вычислительным комплексом.

2. Проведено численное исследование взаимодействия закрученных струй для 10-ти вариантов конфигураций фронта горелочного отсека.
3. Выявлена зависимость качества перемешивания от расстояния между горелками: при увеличении этого расстояния качество перемешивания ухудшается.
4. Для конфигураций с относительным шагом между горелками равным 4, рассмотрены все из возможных вариантов направления крутки соседних струй (4 для случая расположения горелок по квадрату и 4 - для шахматного расположения). Направление крутки соседних струй не оказало существенного влияния на качество перемешивания (в сравнении с влиянием относительного шага).
5. На основании численных результатов получена зависимость интегрального параметра качества перемешивания от относительной площади фронта.

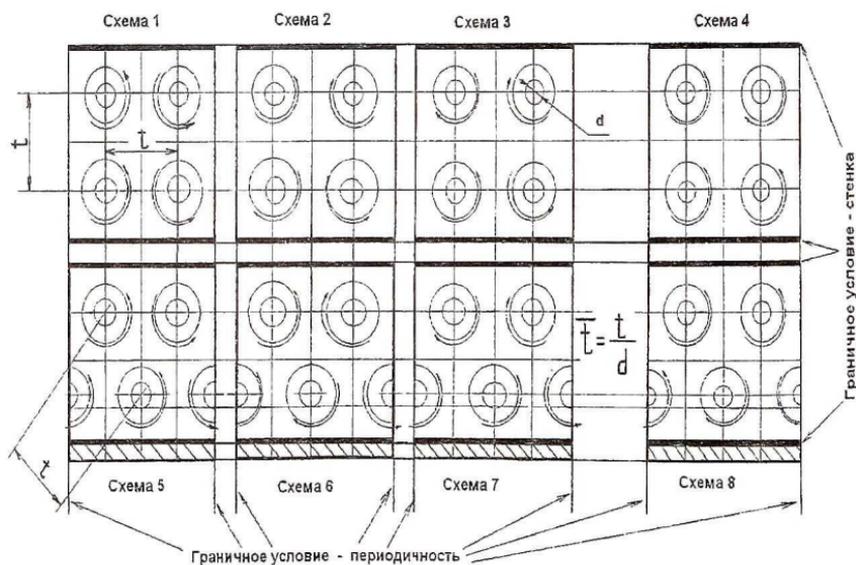


Рис. 1. Схема расположения горелок в расчетной области и направления крутки струй

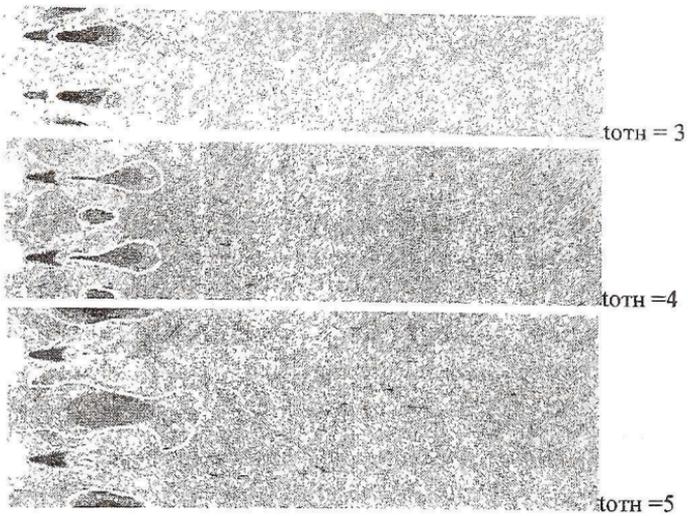


Рис. 2. Распределение осевой скорости и изолиния нулевой осевой скорости

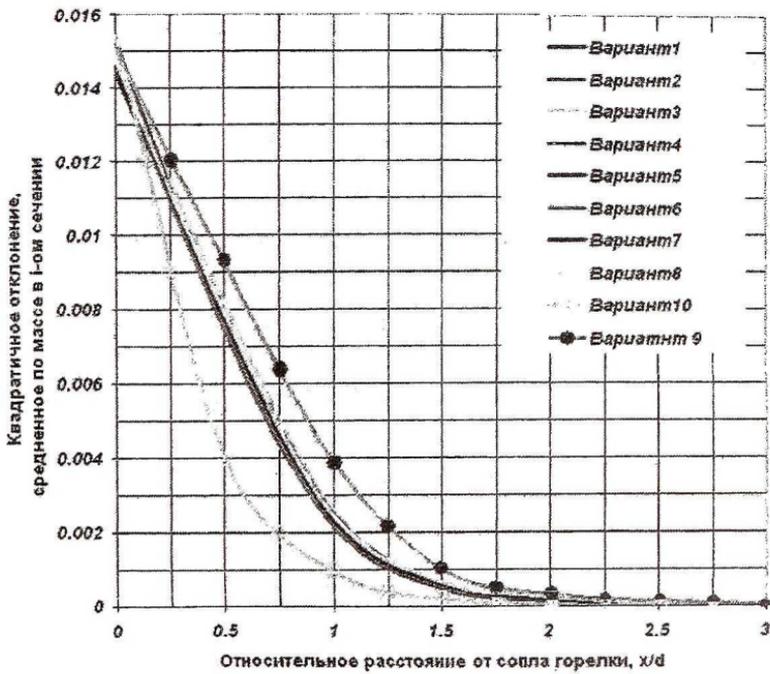


Рис. 3. Распределение квадратичного отклонения вдоль расчетной области

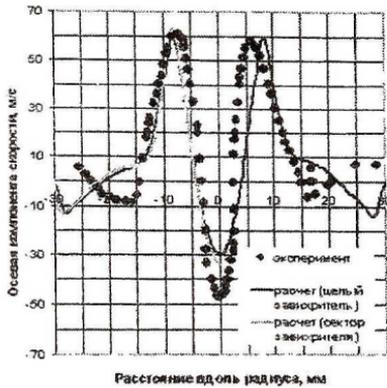


Рис. 4. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Распределение осевой компоненты скорости вдоль радиуса на расстоянии 15 мм от выходного сопла горелочного модуля



Рис. 5. Зависимость интегрального параметра качества перемешивания от относительной площади фронта

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Н.Д., Токарев В.В. Многогорелочные камеры сгорания – одно из перспективных направлений развития двигателей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1995. № 2. – С.25-35.
2. Гупта А.И. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588с.
3. Исследование распыла топлива и смесеобразования в головной части камеры сгорания двигателей типа «НК». / Васильев А.Ю., Майорова А.И., Свириденков А.А., Третьяков В.В., Ягодкин В.И. // Вестник СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей., 2002. № 2 (2). – С.74-86.
4. Сийержич М., Менгер Ф. Измельчение расчетной сетки при моделировании закрученного двухфазного течения // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т.10. №2. – С.45-76.