

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

любой газодинамический параметр в любой точке расчетной области. Для замыкания системы уравнений использовалась SST/ k - ϵ 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° . 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° 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° и -45° ; 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 (σ_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 Σ

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 Σ 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° 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.

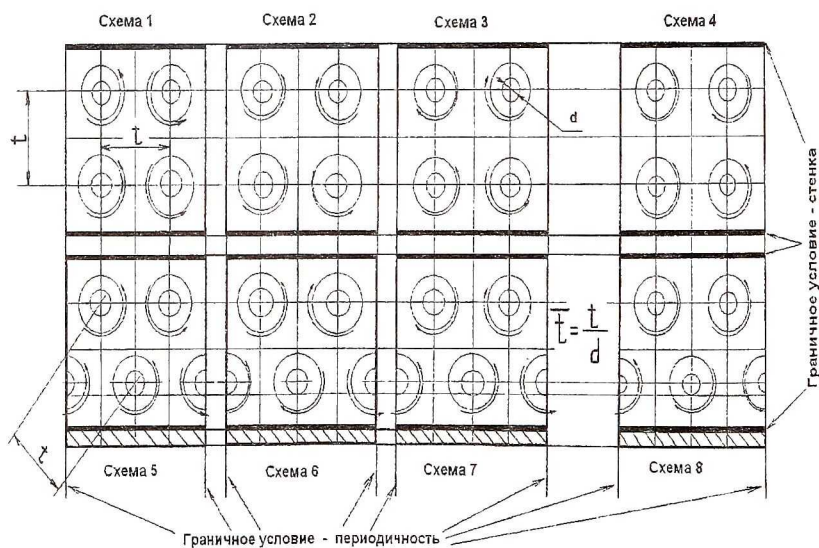


Рис. 1. Схема расположения горелок в расчетной области и направления крутки струй

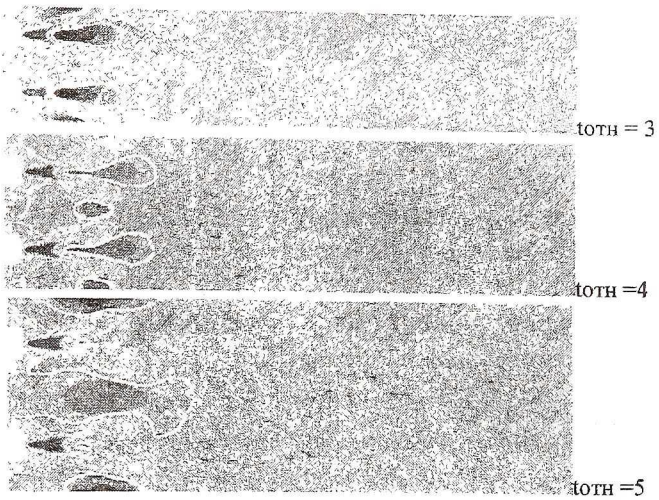


Рис. 2. Распределение осевой скорости и изолиния нулевой осевой скорости

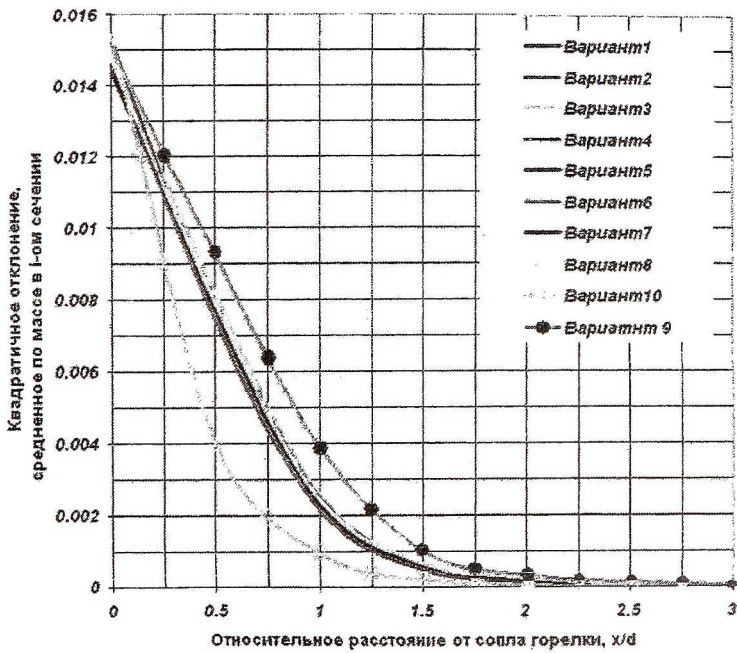


Рис. 3. Распределение квадратичного отклонения вдоль расчетной области

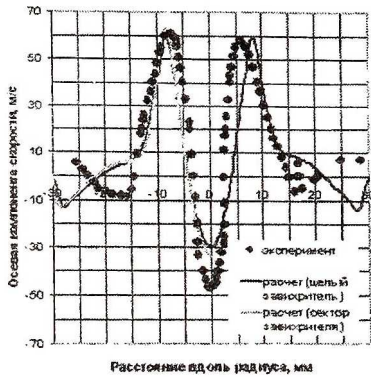


Рис. 4. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Распределение осевой компоненты скорости вдоль радиуса на расстоянии 15 мм от выходного сопла горелочного модуля

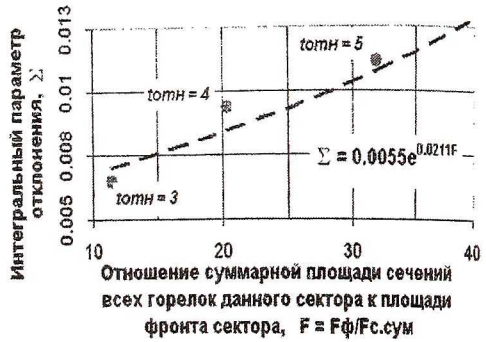


Рис. 5. Зависимость интегрального параметра качества перемешивания от относительной площади фронта

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.