

С.В. Веретенников, С.М. Хасанов, М.М. Шумаков

ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинская государственная авиационная
технологическая академия им. П.А.Соловьева, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА ЗА ГОРЕЛОЧНЫМ МОДУЛЕМ В ПЕРВИЧНОЙ ЗОНЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты физического и численного моделирования однофазного и двухфазного потоков, сформированных форсуночно-горелочным модулем кольцевой камеры сгорания. Проведено сравнение физического эксперимента с численным по значениям компонент скорости и потерям полного давления.

1. ВВЕДЕНИЕ

При разработке современных ГТД возникает проблема создания камер сгорания (КС), удовлетворяющих требованиям по полноте сгорания и эмиссионным характеристикам с низким содержанием таких примесей как CO_x , NO_x , CH_x и др. При этом необходимо обеспечить минимальный уровень дымления, высокую надежность, заданный ресурс работы, хорошие пусковые характеристики, устойчивое горение, небольшую массу и малые габариты КС. Многие из этих требований зачастую противоречивы, а получаемые на практике рабочие характеристики реальных КС являются результатом того или иного технического компромисса. Перечисленные выше параметры оказывают существенное влияние на организацию смещения и частичного испарения топливовоздушной смеси с генерацией стабилизирующих возвратных течений. Исследованиями установлено [1], что изменение угла наклона стенок переходного конуса фронтального устройства и угла установки лопаток регистра оказывает влияние на структуру потока в зоне горения, что может обеспечивать стабилизацию фронта пламени. В значительной части объема КС средние скорости движения потока намного больше, чем турбулентная скорость распространения фронта пламени, следовательно, для удержания факела в определенной зоне необходимо проведение специальных мероприятий – стабилизации. Чаще всего стабилизация фронта пламени достигается установкой лопаточных завихрителей. Возникающая в процессе интенсивной закрутки зона обратных токов (ЗОТ) с пониженным статическим давлением на оси камеры, обусловленная эжекцией газа кольцевой струей, вытекающей из лопаточного завихрителя в расширяющийся канал, и центробежным эффектом, стабилизирует положение фронта пламени и обеспечивает воспламенение всей топливовоздушной смеси во всем объеме КС. В работе сделана попытка экспериментального и численного исследования влияния основных факторов и параметров, определяющих рабочий процесс форсуночно-горелочного модуля, на структуру потока, размеры и положения

зоны обратных токов совместно с работой форсунки и фронтального устройства.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования являются пневмомеханическая форсунка (рис. 1) и двухрядный завихритель (рис. 2) фронтального устройства с противоположной закруткой потока. Матмодель геометрии фронтального устройства выполнена на программном пакете Unigraphics. Сеточная модель фронтального устройства (рис. 3) построена на программном пакете ICEM CFD (Hexa). Использована структурированная сетка с числом ячеек 3,5 млн.

Численный расчет выполнен на программном пакете TASCflow. Исходная система уравнений состоит из уравнения состояния, уравнения неразрывности, уравнения Навье–Стокса, уравнения энергии. Для замыкания использована $k-w$, RSM LRR – IP модель турбулентности, дополненная граничными условиями в виде адиабатных стенок, на которых выполняется условие прилипания. На входе задается полное давление $p^* = 108600$ Па и полная температура $T^* = 303$ К, на выходе статическое давление $p = 100600$ Па.

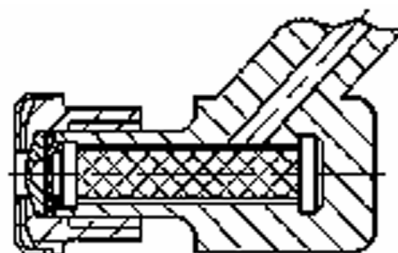


Рис. 1. Форсунка

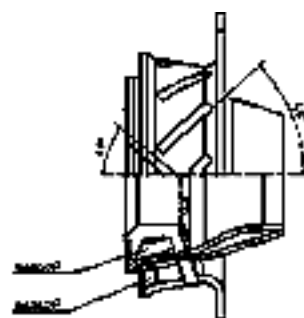


Рис. 2. Исследуемый завихритель



Рис. 3. Сеточная модель жаровой трубы с завихрителем

Динамическим методом с использованием пятиканального цилиндрического датчика проведены опытные исследования полей скоростей в потоке за завихрителем. При этом использована методика постановки опытов и их обработки, описанная в работе [2]. Калибровочные зависимости датчика определены экспериментально в однородном потоке воздуха, генерируемого аэродинамической трубой. Замеры проводились в 7 сечениях, первое – на расстоянии 5 мм от сопла завихрителя, остальные – на расстоянии 10 мм друг от друга.

Экспериментальные исследования дисперсных характеристик форсунки и топливоздушной смеси за завихрителем проводились методом малоуглового рассеяния света, позволяющим определять размеры частиц дискретной фазы как в потоках, так и в неподвижных системах (взвесах). В основе метода лежит экспериментальное определение индикатрисы рассеяния света (зависимости интенсивности света от угла рассеяния), содержащей информацию о дисперсном составе частиц, на которых оно происходит. Экспериментальная установка позволяла снимать зависимость интенсивности рассеянного света от угла рассеяния, т.е. определять индикатрису рассеяния $I(\beta)$ и устанавливать вид функции распределения частиц по размерам $f(r)$. Обработка экспериментальных данных производилась на ЭВМ с помощью разработанной программы SPECTR.FOR. Инструментальное обеспечение и методика позволили определить угол корневого факела распыла, расходные характеристики форсунки, функции распределения частиц по размерам, а также заутеровский радиус частиц.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты эксперимента и численного моделирования представлены на рис. 4–7 в виде графиков. Вдоль оси абсцисс отложено отношение координаты Y , отсчитываемой от оси завихрителя, к наружному диаметру завихрителя $d = 19.5$ мм, а по оси ординат отложены значения компонент скорости и давления.

Непосредственно за завихрителем происходит существенное расширение потока, сопровождающееся снижением скорости (рис. 4). На оси наблюдается зона обратных токов, значение осевой скорости в которой составляет 5–10 м/с. Максимальное значение осевой скорости (132 м/с) достигается в проходном сечении завихрителя за счет поджатия потока. В остальных областях течения значение скорости изменяется в диапазоне 0–20 м/с. На рас-

стоянии 10 мм от среза сопла образуется тороидальный вихрь, а в углах короба возникают застойные зоны, вращение которых противоположно вращению тороидального вихря. Завихритель генерирует два противоположно закрученных потока, которые, взаимодействуя между собой, раскручивают друг друга, что приводит к снижению закрутки потока в целом с образованием интенсивной турбулентной структуры течения, и это обуславливает уменьшение поперечных размеров приосевой зоны возвратного течения и возрастание размера угловых вихрей.



Рис. 4. Распределение осевой компоненты скорости в первом сечении

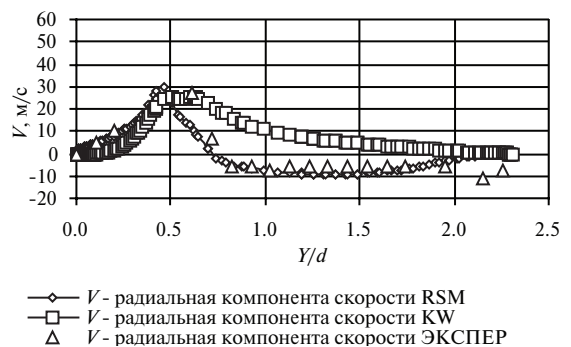


Рис. 5. Распределение радиальной компоненты скорости в первом сечении

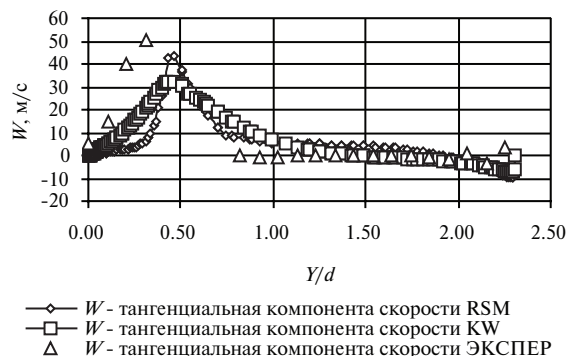


Рис. 6. Распределение тангенциальной компоненты скорости в первом сечении

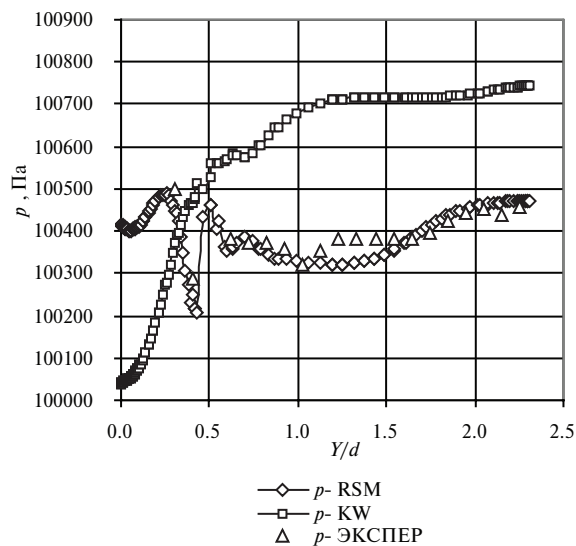


Рис. 7. Распределение давления в первом сечении

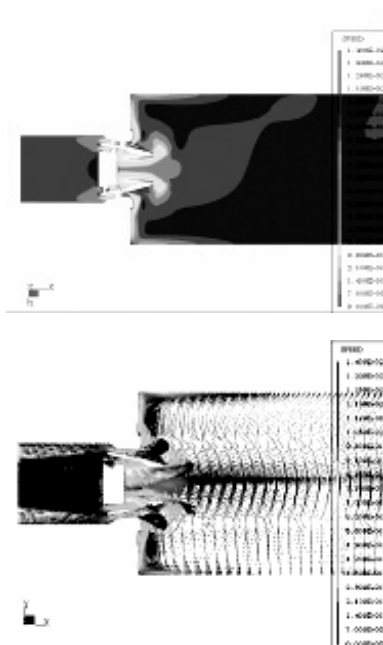


Рис. 8. Распределение векторов и полей скоростей в сечении, перпендикулярном оси Y (модель турбулентности k- ω)

Анализ эпюр радиальной и тангенциальной компонент скорости показывает, что наиболее близко с данными эксперимента согласуются результаты расчета, полученные с использованием RSM модели турбулентности (рис. 5, 6). Расчет осевой компоненты скорости для k- ω модели турбулентности согласуется с экспериментом лучше, чем для RSM модели (рис. 4). Из распределения статического давления видно, что на осевой линии за завихрителем расположена зона разряжения (рис. 7). Значение разряжения постепенно уменьшается с удалением от сопла завихрителя (наилучшим образом это предсказывает RSM модель турбулентности).

По результатам полученных данных можно говорить о том, что для замыкания математической модели численного расчета целесообразно применять RSM модель турбулентности. Это связано с ее способностью хорошо предсказывать развитие течений с высоким уровнем турбулентности, что имеет место в рассматриваемом случае. В результате эксперимента и численного моделирования определены размеры зоны обратных токов, длина которой составила 2 калибра, а её максимальная ширина равна 1 калибру.

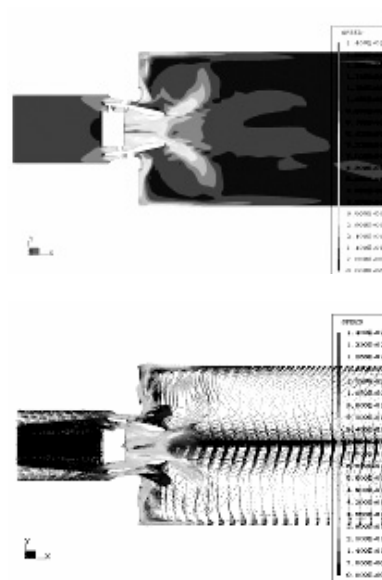


Рис. 9. Распределение векторов и полей скоростей в сечении, перпендикулярном оси Y (модель турбулентности RSM)

Экспериментальное исследование форсунки позволило опытным путем установить её расходную характеристику (рис. 10) и получить необходимые данные по качеству распыла как самой форсунки, так и в случае ее совместной работы с фронтным закручивающим устройством.

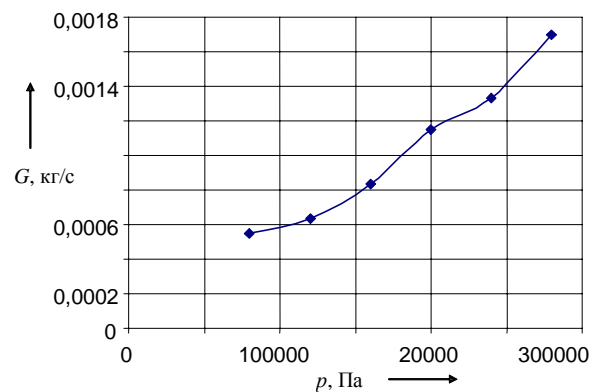


Рис. 10. Расходная характеристика форсунки

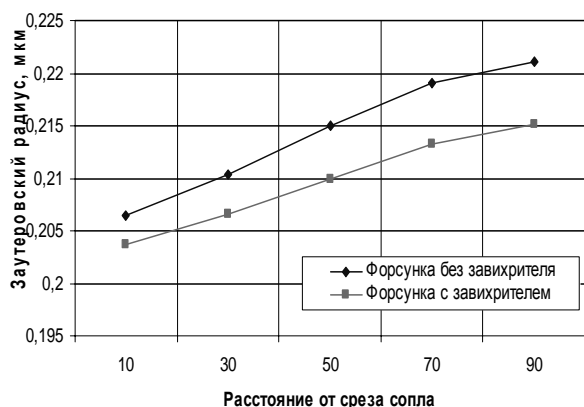


Рис. 11. Значение заутеровского радиуса на различном расстоянии от среза сопла завихрителя

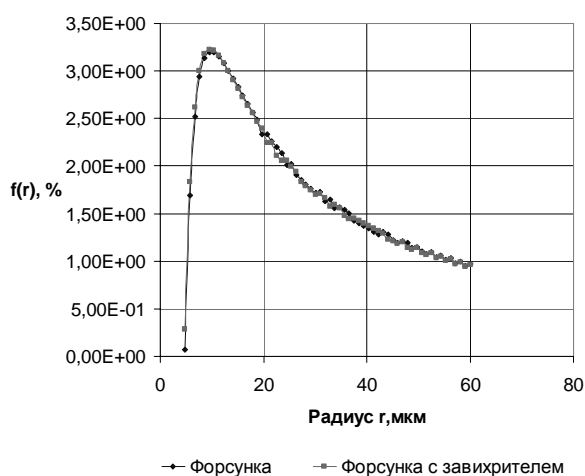


Рис. 12. Сравнение функции распределения частиц по размерам с завихрителем и без завихрителя (расстояние от форсунки 90 мм)

Функции распределения частиц по радиусам показывают, что преобладающая доля дисперсных частиц имеет радиусы в диапазоне от 10 до 20 мкм. Заутеровский радиус частиц в факеле распыла форсунки составил 20,95 мкм, а в закрученной топливовоздушной смеси – 20,9 мкм. Размеры капель соответствуют необходимому условию для надежного воспламенения топливовоздушной смеси и низкой эмиссии вредных веществ. Полученные данные

позволяют сделать вывод о том, что взаимодействие закрученной воздушной струи и факела распыла форсунки не вызывает существенного изменения дисперсных характеристик топливовоздушной смеси, однако приводит к увеличению угла раскрытия факела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными позволяет сделать вывод о возможности применения математического моделирования закрученного потока при проектировании форсуночно-горелочных модулей камер сгорания. Расчет с использованием для замыкания RSM модели турбулентности дает более адекватное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Анализ данных о взаимодействии закрученной воздушной струи и факела распыла форсунки говорит о несущественном изменении дисперсных характеристик форсунки при работе совместно с завихрителем. За исключением заметного увеличения угла раскрытия факела распыла.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- k – кинетическая энергия турбулентности, $\text{м}^2/\text{с}^2$;
- ω – скорость диссипации $\text{м}^2/\text{с}^3$;
- u – осевая скорость, $\text{м}/\text{с}$;
- v – радиальная скорость, $\text{м}/\text{с}$;
- w – тангенциальная скорость, $\text{м}/\text{с}$;
- β – угол рассеяния, рад;
- λ – длина волны, м ;
- r – радиус, м ;
- ξ – угол факела распыла, град;
- p – давление, Па;
- p^* – полное давление, Па;
- T^* – полная температура, К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки: Пер с англ. М.: Мир, 1987. 588 с.
2. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. М.: Машиностроение, 1966. 480с.
3. Бородин В.А., Дитякин Ю.Ф. и др. Распыливание жидкости. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.