УДК 621.45.022.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ СВЕРХЗВУКОВОГО ПРЯМОТОЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**И. А. Вихрова, А.И. Лаптинский**

*E-mail:* [*ir-vikhr@yandex.ru*](mailto:ir-vikhr@yandex.ru)

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова*

Прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД) относится к классу двигателей, в которых тяга создается за счёт реактивной струи, истекающей из сопла. В ПВРД для сжигания горючего используется кислород, который содержится в атмосферном воздухе. Данный вид двигателей привлекает конструкторов простотой своего устройства, но главное - способностью работать на сверхзвуковых скоростях и в наиболее разреженных слоях атмосферы, то есть в таких условиях, в которых ВРД других типов работать не могут или оказываются малоэффективными.

Одной из главных проблем конструирования ПВРД является организация сгорания топлива при сверхзвуковых скоростях потока. В данных условиях время пребывание горючего в камере сгорания резко сокращается, что делает проблематичным эффективное смешения горючего с окислителем (кислородом). Иногда для того, чтобы топливо успело среагировать, требуется значительное увеличение длины камеры сгорания двигателя, что, соответственно, ведет к увеличению габаритов. Для того чтобы химическая реакция прошла в полном объеме и горючее успело полностью сгореть за такой малый промежуток времени, необходимо подготовить топливную смесь перед воспламенением, поэтому особый интерес представляет исследование зоны смешения компонентов топливной смеси.

В работе с помощью численного моделирования решена трехмерная задача о смешении и горении топливной смеси (керосин – воздух) в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя. В основе моделирования – уравнения Навье-Стокса осредненные по Рейнольдсу, которые представлены в системе (1) и состоят из уравнений сохранения массы, импульса и энергии. Так же решается уравнение состояния (2).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |
|  | (2) |

В данных уравнениях обозначено: – вектор скорости осредненного течения смеси газов; – плотность; , – давление, – энергия турбулентных пульсаций; – полная энергия потока, – удельная внутренняя энергия, – кинетическая энергия, – вектор теплового потока, – вектор межфазного теплообмена, – вектор диффузионного потока.

Моделирование горения керосина в воздухе произведено с применением модели Non-Premixed и 4-х разных моделей турбулентности, а именно:

1) SST (Shear Stress Transport) model;

2) Standart model;

3) Realizable model;

4) RNG (Re-Normalisation Group) model.

Геометрия с характерными размерами представлена на рисунке 1. Поток воздуха (состоящий из 78 % азота, 23 % кислорода) при температуре 350 К с массовым расходом 1,2 кг/с поступает в камеру сгорания ПВРД через входное сечение, где смешивается с керосином, который впрыскивается в камеру через форсунки при температуре 450 К с массовым расходом 0,15 кг/с. Далее происходит смешение горючего с окислителем и последующее горение этой смеси. Продукты сгорания выходят через выходное отверстие. На рисунке 2 представлена расчетная сетка, состоящая из 800 тысяч ячеек.

|  |
| --- |
| https://pp.userapi.com/c844416/v844416490/1e308e/mX8EYVbObvQ.jpg |
| Рисунок 1 – Геометрия с характерными размерами |

|  |
| --- |
| https://pp.userapi.com/c844720/v844720013/1d8c73/qVtUXQ0p22k.jpg |
| Рисунок 2 – Расчетная сетка |

На рисунке 3 приведены картины распределения температуры по длине камеры сгорания с применением разных моделей турбулентности.

|  |  |
| --- | --- |
| SST_T_01.jpg | Standart_T_01.jpg |
| Real_T_01.jpg | RNG_T_01.jpg |
| Рисунок 3 – Картины распределения температуры по камере сгорания с применением разных моделей | |

Анализируя данные картины можно сказать, что происходит смешивание керосина с воздухом и последующее горение этой смеси с выделением тепла. Максимальная температура равна 2200 К.

По картине распределения температуры с использованием модели RNG, заметно, что горение происходит неравномерно. Так же можно увидеть, что при применении модели Realizable интенсивность горения и температура на выходе меньше, чем при применении других моделей. С использованием модели SST происходит равномерное горение. На всех рисунках можно заметить влияние стенки на поток.

На рисунке 4 показаны графики распределения концентраций различных компонентов по линии, проходящей посередине камеры сгорания. По данным графикам видно, что в ходе реакции горения керосина в воздухе образуются различные вещества, такие, как CO2 и H2O.

|  |  |
| --- | --- |
| SST_Mass Fraction_0.35.png | Standart_Mass Fraction_0.35.png |
| SST | Standart |
| SST_Mass Fraction_0.15.png | |
| Real_Mass Fraction_0.35.png | RNG_Mass Fraction_0.35.png |
| Realizable | RNG |
|  |  |
| Рисунок 4 - Графики распределения концентраций компонентов с применением разных моделей | |

Проанализировав некоторые работы в этой научной области, был сделан вывод, что наиболее часто для решения данного круга задач применяется модель SST, так как она объединяет преимущества и моделей турбулентности и дает хороший результат. Исследование, проведенное в данной работе, показывает, что наиболее отличные от остальных результаты дает модель Realizable, а результаты других моделей похожи. Следовательно, можно сделать вывод, что для решения задач горения и смешивания подойдут те модели, которые дают похожий на модель SST результат, а именно Standart и Realizable