

УДК 621.438

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ТРЕУГОЛЬНОЙ ПРИЗМЫ ПРИ ПОМОЩИ КОММЕРЧЕСКОГО ПАКЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ CFX-TASCFLOW

Степанова О. П., Василюк Д. К.

ОАО «НПО «САТУРН», г. Рыбинск

При проектировании камеры сгорания газотурбинного двигателя должны быть приняты меры, гарантирующие, что горение в камере будет поддерживаться во всем диапазоне эксплуатационных режимов. Эффективное горение должно обеспечиваться в сильно турбулизованных воздушных потоках, скорости которых значительно превосходят нормальную скорость распространения пламени в топливовоздушной смеси. Назначение стабилизатора пламени состоит, следовательно, в том, чтобы создать в высокоскоростном газовом потоке область со скоростью, меньшей, чем скорость распространения пламени в топливовоздушной смеси. Для решения этой задачи обычно в головной части жаровой трубы камеры сгорания формируется зона с низкой скоростью течения, в которой скорость распространения пламени существенно увеличена благодаря высокой интенсивности турбулентности, генерированной струями первичного воздуха, и организуется циркуляция горячих продуктов горения и их смешение с воздухом и топливом, поступающими в указанную зону [1-2]. Среди всех устройств, применяемых для стабилизации пламени в потоке газа, плохо обтекаемые тела имеют наибольшее значение.

Целью данной работы является получение адекватной картины течения при обтекании треугольной призмы в плоском канале при изотермических условиях, и моделирование процессов горения гомогенной, предварительно перемешанной смеси для оценки стабилизации пламени за плохо обтекаемым телом на основании численного эксперимента с применением газодинамического пакета CFX-TASCflow. Расчет выполнялся на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Для замыкания системы уравнений использовались $k-\epsilon$ и SST модели турбулентности.

Рассматривается картина течения за треугольной призмой в изотермической постановке. С помощью CAD/CAM системы Unigraphics V17.0.2 (UG) была построена модель треугольной призмы. Данные из UG использовались в программе CFX-HEXA для построения расчетной области. Свойства газа принимались постоянными: показатель адиабаты $\kappa=1,4$, газовая постоянная $R=287,7 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Граничные условия для расчета представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Граничные условия на входе перед треугольной призмой

Параметр	Значение
P^* , Па	$1,02225 \cdot 10^5$
T^* , К	700

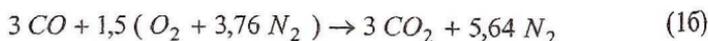
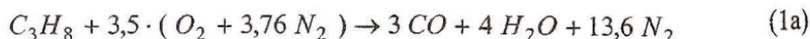
Таблица 2. Граничные условия на выходе

Параметр	Значение
P^* , Па	$1,02225 \cdot 10^5$

Для проверки адекватности моделей горения, используемых в CFX-TASCflow, были проведены численные исследования в соответствии с имеющимися данными по эксперименту.

Расчетная область камеры сгорания представляла собой прямоугольный канал со стабилизатором пламени, геометрические размеры и граничные условия были взяты из литературных источников [3].

Процесс горения описывался следующими реакциями:



Соответствующие кинетические уравнения для скорости химических реакций (1a) и (1б), описанные выражением Аррениуса (2a,3a), уравнения скорости для модели EDM, описанной выражением Магнусса (2б,3б), и константы, необходимые для этих уравнений, были заимствованы из [3] и выглядят следующим образом:

а) для первой реакции

$$R_{1,A} = A_1 \cdot \rho^{1,5} \cdot Y_{C_3H_8}^{0,5} \cdot Y_{O_2} \cdot e^{\frac{E_1}{R_u \cdot T}} \quad (2a)$$

$$R_{1,M} = C_{R,1} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot \min(Y_{C_3H_8}, Y_{O_2/S1}) \quad (26)$$

где значения констант равны $A_1 = 3.3 \cdot 10^{14}$; $\frac{E_1}{R_u} = 27000$; $C_{R,1} = 9$.

б) для второй реакции

$$R_{2,A} = A_2 \cdot \rho^{2,0} \cdot Y_{CO} \cdot Y_{O_2} \cdot e^{\frac{-E_2}{R_u T}} \quad (3a)$$

$$R_{2,M} = C_{R,2} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot \min(Y_{CO}, Y_{O_2/S2}) \quad (36)$$

где значения констант равны $A_2 = 6.0 \cdot 10^8$; $\frac{E_2}{R_u} = 12500$; $C_{R,2} = 48$.

Расчеты проводились с использованием к-ε, SST моделей турбулентности и модели горения EDM с учетом кинетики.

В результате изотермического расчета (рис. 1) течение в области за

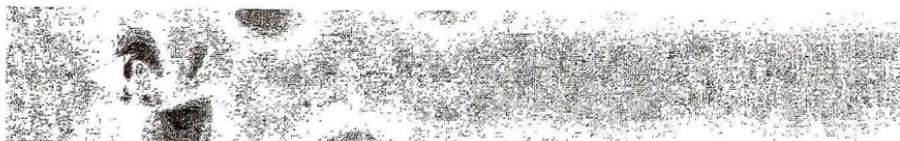


Рис. 1. Распределение скорости



Рис. 2. Распределение скорости

телом представляло собой нестационарные периодические (около 250 Гц) крупные вихревые структуры, похожие на дорожку Кармана. Стабильное решение со стационарным вихрем было получено в симметричной постановке (т. е. считалась только половина расчетной области; рис. 2), из-за невозможности получения в такой постановке

несимметричных вихревых структур. При осреднении по времени параметров нестационарного решения (рис. 4) видно, что осредненное



Рис. 3. Распределение числа Маха

решение схоже с симметричным (рис. 3). Исключение составляет зона вихреобразования за призмой.

При расчетах с горением было проведено сопоставление осредненных по времени профилей осевой скорости в различных

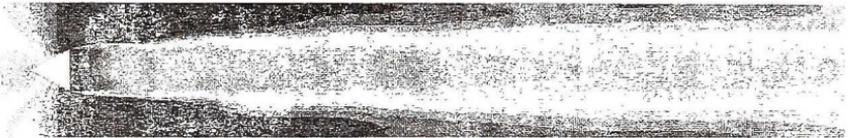


Рис. 4. Распределение числа Маха осредненного по времени

сечениях за плохообтекаемым телом, полученных экспериментальным и численным методами. Результаты, полученные на SST и к-ε моделях турбулентности, подобны. На расстоянии от 0 до 38 мм наблюдается хорошее совпадение с экспериментом (отличие осевых скоростей составляет 10 м/с). На значительном удалении от стабилизатора отклонение от экспериментальной скорости до 40 м/с. Расхождение с экспериментом наблюдается преимущественно в областях, где происходит процесс горения. Поэтому можно предположить, что отклонение в предсказании скорости происходит из-за неадекватного описания процессов горения.

Из осредненных по времени профилей температур видно, что на расстоянии $x=150$ мм наблюдается хорошее совпадение расчетных данных с экспериментальными для к-ε и SST моделей турбулентности. На расстояниях $x=350$ мм и $x=550$ мм уровень максимальной температуры, предсказанной SST моделью, хорошо согласуется с измеренными значениями температуры. Рассчитанный и измеренный профили температуры имеют значительное отличие, так как угол раскрытия конуса турбулентного пламени в численном исследовании (рис.5) имеет меньшее значение из-за занижения стандартными

моделями интенсивности турбулентности. Это показал расчет на LES модели [4], где наблюдается хорошее совпадение с экспериментом.



Рис. 5. Распределение статической температуры в зоне за стабилизатором

Выводы. В результате обобщения данных расчетов установлено, что течение в следе за треугольником в полной постановке задачи характеризуется наличием нестационарных периодических вихревых структур, похожих на дорожку Кармана, а в симметричной постановке задачи – они отсутствуют. Расчет с учетом горения показал следующее:

1. при расчете аэродинамических параметров обе модели турбулентности ($k-\epsilon$ и SST) показали хорошее согласование расчетных данных с экспериментальными;

2. при удалении от стабилизатора вниз по потоку обе модели турбулентности завышают максимальную температуру на 5,5 % (SST), и 12,7 % ($k-\epsilon$). Конус турбулентного пламени за стабилизатором имеет меньший угол раскрытия, чем в эксперименте. Из-за этого факта на расстоянии $x=350$ мм в эксперименте топливо является полностью сгоревшим, что не наблюдается в расчете. Данное явление объясняется низким уровнем интенсивности турбулентности при моделировании с помощью $k-\epsilon$ модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986.-566с.
2. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1984.–280с.
3. Validation rig – a tool for flame studies, International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE). / Sjunnesson A., Olovsson S., Sjoblom B. Nottingham. // England. 1991.
4. Large eddy simulation of bluff body stabilized turbulent premixed flames. / Rudyen R., Eriksson L., Olovsson S. // 38th ASME conference. 93 GT-157.