

УДК 621.43.056

С.И. Сербин, С.В. Вилкул, В.В. Вилкул

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЛЬНОГО ЗАВИХРИТЕЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ И СТРУКТУРУ ПОТОКА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД

Статья посвящена вопросам численного моделирования жидкотопливных камер сгорания газотурбинных двигателей с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики (CFD) и трехмерных виртуальных моделей. Показана возможность применения численного эксперимента для проведения оптимизации структуры потока и температурного поля при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей. Полученные в ходе расчетов данные позволили определить влияние геометрических параметров радиального завихрителя и схемы подачи воздуха в жаровую трубу на распределение температуры и структуру потока в камере сгорания судового ГТД с максимальной температурой газа 1645 К.

Газотурбинный двигатель, камера сгорания, математическое моделирование, радиальный завихритель, поле температур, структура потока

Введение

Одним из главных способов повышения коэффициента полезного действия газотурбинных установок является увеличение температуры рабочего тела в цикле газотурбинного двигателя. Достижение максимально эффективной температуры рабочего цикла ограничивается допустимой температурой материалов элементов камер сгорания и лопаток турбин. Применение системы воздушного охлаждения позволяет повышать температуру рабочего тела, но требует более точного прогнозирования распределения температур возле стенок и на выходе из камеры сгорания [1-3]. Изучение структуры течения внутри камеры с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики (CFD) и трехмерных виртуальных моделей позволяет проводить многовариантные расчеты с целью оптимизации аэродинамики потока и распределения температур, концентраций основных продуктов горения и токсичных компонентов по сечениям жаровой трубы. В результате уменьшаются сроки и стоимость проектных и доводочных работ по созданию перспективных типов камер сгорания ГТД.

В статье представлены результаты численного моделирования процессов смесеобразования и сгорания жидкого топлива в камере сгорания судового ГТД с максимальной температурой цикла 1645 К. Путем изменения геометрии радиального завихрителя и схемы подачи воздуха в жаровую трубу осуществляется оптимизация процессов перемешивания компонентов и химического реагирования жидкого топлива, распыливаемого фор-

сункой, с воздухом. Выбирается рациональное распределение охлаждающего воздуха по поясам охлаждения с целью обеспечения необходимого распределения температур рабочего тела вблизи стенок жаровой трубы и на выходе из камеры сгорания. Для данной камеры сгорания исследовалась структура течения потока для трех различных вариантов соотношений углов выхода потока из внутреннего и внешнего каналов завихрителя: а) 50/55, б) 40/45, в) 45/40 градусов.

1. Математическая модель

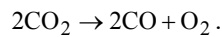
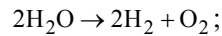
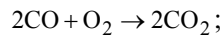
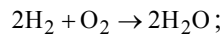
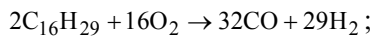
Предложенная математическая модель камеры сгорания, работающей на жидком топливе, основана на следующих уравнениях: неразрывности, сохранения количества движения, сохранения энергии, переноса химических компонентов.

Из-за сложности физико-химических процессов в таких камерах сгорания при построении математической модели были сделаны определенные допущения, которые упрощают процедуру численного решения:

- течение газа трехмерное турбулентное, установившееся во времени и дозвуковое;
- объемной вязкостью, вязким нагревом и лучистым теплообменом и теплообменом через стенки камеры сгорания пренебрегаем.

В качестве модели горения принята модель Eddy Dissipation Concept для смеси gasoil-air ($C_{16}H_{29}$ - air) программного продукта ANSYS Fluent. Топливо $C_{16}H_{29}$ выбрано как наиболее близкое по физико-химическим показателям к дизельному (рабочая масса топлива $C^P = 0,8687$,

$H^P = 0,1313$). Механизм горения $C_{16}H_{29}$ описывается пятиступенчатой реакцией горения углеводородов [4]:



Важным шагом для эффективного моделирования рабочего процесса в камере сгорания ГТД является правильный выбор модели распыливания жидкого топлива.

Для расчетов выгорания жидкого топлива, распыливаемого форсункой, выбрана модель Discrete Phase Model. Эта модель прогнозирует траектории движения отдельных частиц. Обмен импульсом, теплотой и массой между газом и каплями топлива включаются в расчет, чередуясь с расчетом траекторий частиц и уравнений газовой фазы. Капли жидкого топлива при движении в газовой среде будут испаряться, а образовавшиеся газообразные горючие вещества будут являться источником для реакций горения. Капли топлива имеют неравномерное распределение диаметров по закону Розина-Раммлера. Максимальный размер капель 75 мкм, средний 35 мкм, минимальный 5 мкм. В расчетах принималась характеристика дисперсии капель 3,5, обеспечивающая достаточно хорошее качество распыливания жидкого топлива.

В качестве модели турбулентности принята RNG-k-ε-модель [5], которая позволяет более эффективно рассчитывать гидродинамические показатели сильно закрученных потоков в отличие от стандартной k-ε-модели.

Для численного решения системы дифференциальных уравнений, которая описывает физико-химические процессы в жидкотопливных камерах сгорания ГТД, использован метод контрольного объема, реализованный в программном комплексе ANSYS Fluent.

2. Структура течения в жаровой трубе

В данной конструкции камеры сгорания судового ГТД используется радиальный двухканальный завихритель воздуха (рис. 1), предназначенный для качественного перемешивания воздуха и основной массы топлива в головном сечении жаровой трубы, где вследствие центробежного эффекта закрученного потока и дополнительного подвода первичного воздуха имеет место интенсивное турбулентное перемешивание компонентов. Особенностью данной конструкции завихрителя является наличие внутреннего и внешнего каналов, что обеспечивает более раз-

витые рециркуляционные течения в периферийной части фронтального устройства жаровой трубы и возможность регулирования положения зон обратных токов. Так, путем взаимного изменения углов выхода потока из радиального завихрителя можно значительно варьировать размеры зон обратных токов (приосевой и периферийных) и количество воздуха, поступающего в локальные зоны головной части камеры, что существенно изменяет характер течения и выгорания жидкого топлива.

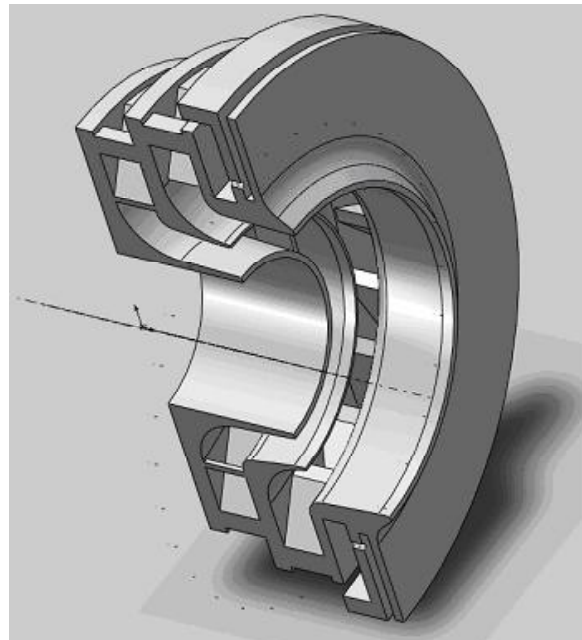


Рис. 1. Геометрическая модель радиального двухканального завихрителя

В рассматриваемых вариантах жаровых труб воздушный поток, проходя через каналы радиального завихрителя, отклоняется от первоначального направления движения и в виде кольцевых закрученных струй распространяется вдоль боковой поверхности конических и цилиндрических обечаек жаровой трубы. В образовавшуюся зону пониженного давления из кольцевой струи, а также из первичных отверстий, подсасывается часть воздуха, которая меняет направление своего движения и, пройдя к головной части жаровой трубы, опять подмешивается к прямому закрученному потоку.

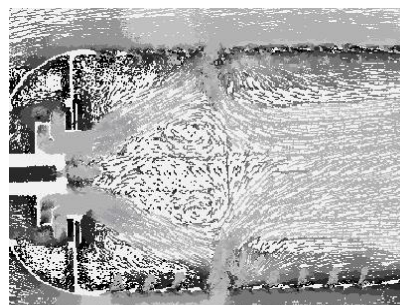
Большие углы (50/55 градусов) выхода потока из радиального завихрителя (вариант *a*) способствуют возникновению значительных центробежных сил, которые приближают зоны стабилизации к стенкам жаровой трубы, что при реализации режима горения с большой вероятностью приведет к перегреву стенок жаровой трубы. Также неравномерность потока наблюдается и за отверстиями подачи первичного воздуха.

Отметим, что уменьшение углов выхода потоков из радиального завихрителя до 40/45 градусов не привело к существенному улучшению структуры зоны обратных токов, хотя стабилизировало течение за отверстиями подачи первичного воздуха (рис. 2, б). Недостаточная протяженность первичной зоны в этом случае приводит к тому, что кольцевая струя воздуха из завихрителя ударно встречается со струями первичного воздуха, что препятствует формированию стабильной зоны обратных токов.

На четкое формирование устойчивой зоны обратных токов повлияло изменение углов выхода потоков из радиального завихрителя до 45/40 градусов и передвижение отверстий подачи первичного воздуха на две обечайки жаровой трубы вперед по потоку (рис. 2, в).



а)



б)



в)

Рис. 2. Структура потока в первичной зоне жаровой трубы при углах выхода потока внутреннего/внешнего каналов завихрителя:

а) - 50/55, б) - 40/45, в) - 45/40 градусов

Анализируя характер течений в жаровой трубе с различными вариантами углов закрутки радиального завихрителя, можно сделать вывод, что наиболее рациональным является соотношение углов выхода потока из каналов радиального завихрителя (внутренний/наружный) 45/40 градусов (вариант в).

Характер втекания струй первичного воздуха оказывает значительное влияние на аэродинамическую структуру потока в камере сгорания. Так, для увеличения глубины проникновения радиальных струй первичного воздуха в конструкции жаровой трубы предусмотрены специальные втулки. Установка втулок также способствует однородности распределения первичного воздуха по окружности жаровой трубы. Отметим, что у варианта в втулки подачи первичного воздуха наклонены по отношению к оси камеры на 75°, что улучшает формирование необходимой зоны обратных токов и увеличивает ее протяженность (рис. 2, в).

3. Неравномерность температурного поля

При впрыске капель жидкого топлива полым конусом распыливания с углом 75° происходит интенсивное тепловыделение, сопровождающееся увеличением осевой и падением тангенциальной составляющей скорости рабочего тела. При этом увеличивается радиальная составляющая скорости, изменяются размеры зоны обратных токов и количество газов, возвращающихся к корню факела. В районе отверстий подачи первичного воздуха вследствие трения и турбулентной диффузии интенсивность закрутки потока резко уменьшается, зона рециркуляции замыкается, и сечения жаровой трубы заполняются перемешивающимися потоками продуктов сгорания и охлаждающего воздуха, движущимися преимущественно в осевом направлении.

Для оценки качества процессов сгорания топлива и перемешивания продуктов сгорания с охлаждающим воздухом используется параметр степени неравномерности температурного поля на выходе из камеры сгорания, который определяется по формуле:

$$\Theta = \frac{T_{\max} - T_{\text{ср}}}{T_{\text{ср}} - T_2} \cdot 100\%,$$

где T_{\max} — максимальная температура газа в выходном сечении жаровой трубы, К;

T_2 — температура воздуха на входе в камеру сгорания, К;

$T_{\text{ср}}$ — среднемассовая температура газа на выходе из жаровой трубы, К.

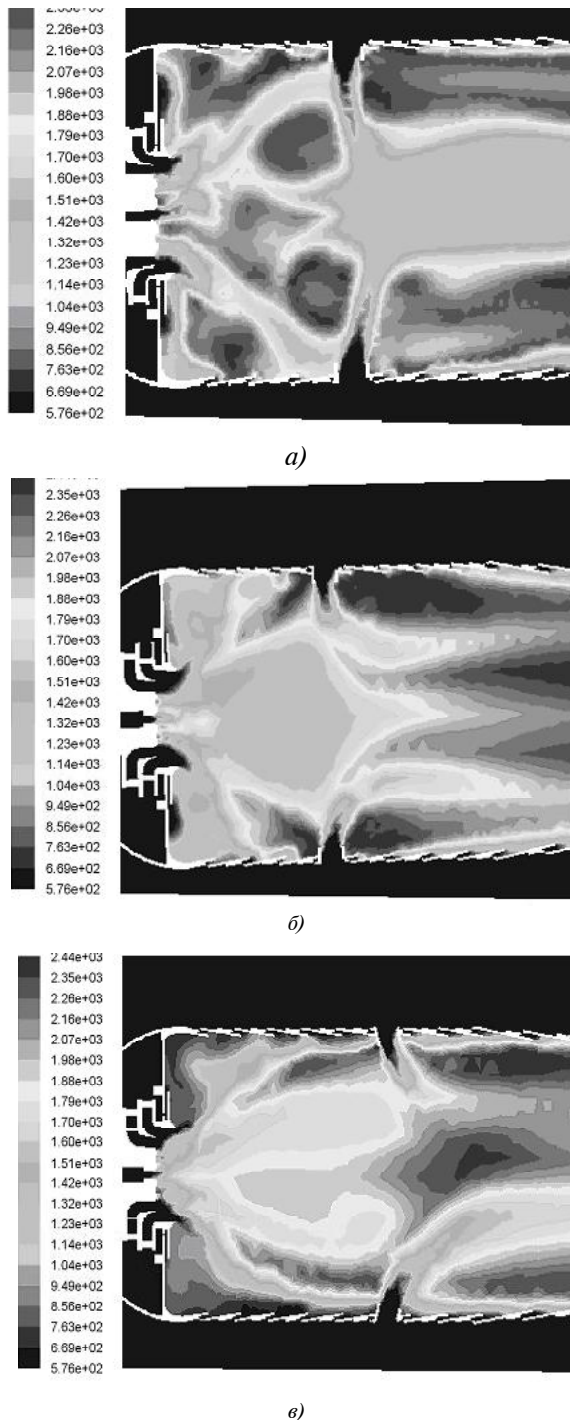


Рис. 3. Распределение температур в первичной зоне жаровой трубы при углах выхода потока внутреннего/внешнего каналов завихрителя: а) - 50/55, б) - 40/45, в) - 45/40 градусов

Вариант *a* (рис. 3, *a*) с соотношением углов выхода потоков из внутреннего и внешнего каналов завихрителя 50/55 градусов обеспечивает значительные рециркуляционные течения в первичной зоне жаровой трубы, устойчивые зоны стабилизации пламени, примыкающие к стенкам жаровой трубы, но не обеспечивает необхо-

димую протяженность зоны обратных токов. Это приводит к возникновению очагов горения непосредственно у стенок жаровой трубы до и после отверстий подачи первичного воздуха, куда также подается охлаждающий стенки воздух. Все это вызывает догорание оксидов углерода и молекулярного водорода далеко за отверстиями подачи вторичного воздуха в районе смесителя жаровой трубы. Поэтому максимальные температуры в выходном сечении жаровой трубы достигают 2122 К, а общая неравномерность поля температур 38,1%.

Вариант *б* (рис. 3, *б*) с измененными соотношениями углов выхода потоков из внутреннего и внешнего каналов завихрителя (40/45 градусов) изменяет общую структуру течения топливовоздушной смеси в первичной зоне жаровой трубы. Значительно меньшее количество очагов горения находится в районе стенок камеры, ядро пламени вытягивается в осевом направлении. Но неравномерное распределение количества первичного и охлаждающего воздуха, а также недостаточная протяженность зоны обратных токов (из-за относительно близкого расположения отверстий подачи первичного воздуха к радиальному завихрителю) приводят к резкому увеличению максимальной температуры газа до 2356 К и неравномерности поля температур на выходе из жаровой трубы до 65,4%.

В варианте *в* (рис. 3, *в*) увеличена на 70% подача воздуха через отверстия пленочного охлаждения на четырех обечайках перед отверстиями подачи первичного воздуха и на 30% - на остальных обечайках. Выбранное распределение охлаждающего воздуха по поясам охлаждения позволило обеспечить рациональное распределение температур рабочего тела вблизи стенок жаровой трубы. Также из-за стабильной структуры зоны обратных токов из головной части жаровой трубы исчезли очаги горения, а фронт пламени более равномерно распределился по всему объему жаровой трубы. При этом максимальные температуры в выходном сечении снизились до 1812 К, а общая неравномерность поля температур - до 13,1%.

Выводы

С помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики (CFD) и трехмерной виртуальной модели камеры сгорания путем изменения геометрии радиального завихрителя и схемы подачи воздуха в жаровую трубу проведены оптимизационные расчеты процессов смесеобразования и сгорания жидкого топлива в камере сгорания судового ГТД с максимальной температурой цикла 1645 К.

Показано, что наиболее рациональным является соотношение углов выхода потока из кана-

лов радиального завихрителя (внутренний/наружный) 45/40 градусов. Для увеличения глубины проникновения струй первичного воздуха и его однородности распределения по окружности жаровой трубы целесообразно использовать специальные втулки.

Оптимизация распределения охлаждающего воздуха по поясам охлаждения жаровой трубы и подачи первичного воздуха позволила обеспечить рациональное распределение температур рабочего тела вблизи стенок жаровой трубы и на выходе из камеры сгорания.

Перечень ссылок

1. Романовський Г.Ф. Камери згорання суднових газотурбінних двигунів : Навчальний посібник / Г.Ф. Романовський, С.І. Сербін. – Миколаїв : УДМТУ, 2000. – 259 с.

2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД: пер. с англ. / А. Лефевр. – М. : Мир, 1986. – 566 с.

3. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей / Ю.М. Пчелкин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

4. Karl V. Meredith Automated Global Mechanism Generation for use in CFD Simulations / Karl V. Meredith, David L. Black // 44-th AIAA-Paper. - Reno, Nevada, 2006. – P.1-13.

5. Launder B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B.E. Launder., D.B. Spalding, – London: Academic Press, 1972. – 310 p.

6. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания / Н.Ф. Дубовкин. - М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 288 с.

7. Fenimore C.P. Studies of fuel-nitrogen in rich flame gases / C.P. Fenimore // 17th Symp. (Intl.) Comb., The Combustion Institute, Pittsburg, 1979.

8. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – ОАО “Авиадвигатель”, Пермь, 2006. – 1204 с.

Поступила в редакцию 01.06.2010 г.

S.I. Serbin, S.V. Vilkul, V.V. Vilkul

RESEARCH THE INFLUENCE OF RADIAL SWIRLER PARAMETERS ON THE TEMPERATURE FIELD AND THE FLOW PATTERN IN THE GTE COMBUSTION CHAMBER

Стаття присвячена питанням числового моделювання рідкопаливних камер згорання газотурбінних двигунів за допомогою сучасних інструментів обчислювальної гідродинаміки (CFD) і тривимірних віртуальних моделей камер згорання. Показано можливість застосування числового експерименту для проведення оптимізації структури потоку і температурного поля при проектуванні камер згорання газотурбінних двигунів. Отримані в ході розрахунків дані дозволили визначити вплив параметрів радіального завихрювача і схеми подачі повітря в жарову трубу на розподіл температури і структуру потоку в камері згорання суднового ГТД із максимальною температурою газу 1645 К.

Газотурбінний двигун, камера згорання, математичне моделювання, радіальний завихрювач, поле температур, структура потоку

The article is devoted to the questions of numerical simulation of liquid-fuel combustion chambers of gas turbine engines by the instrumentality of modern tools of computational fluid dynamics (CFD) and three-dimensional virtual models of combustion chambers. The opportunity of application of numerical experiment is shown for carrying out of optimization of flow pattern and a field of the temperature at designing combustion chambers of gas turbine engines. The data received during the calculations have allowed to determine influence of key parameters of the radial swirler and the air input scheme on the temperature distribution and flow pattern in the combustion chamber of the marine GTE with maximum cycle temperature 1645K.

Gas turbine engine, combustion chamber, computer flow modelling, radial swirler, a field of the temperatures, flow pattern