

УДК 621.43.056

С.И. СЕРБИН, С.В. ВИЛКУЛ

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СТенок ЖАРОВОЙ ТРУБЫ ЖИДКОТОПЛИВНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ИНСТРУМЕНТАМИ CFD И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Статья посвящена вопросам определения теплового состояния стенок жаровых труб жидкотопливных камер сгорания газотурбинных двигателей с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики (CFD) и известных полуэмпирических зависимостей. Показана возможность применения численного эксперимента для определения структуры течений и температурного поля потока при сгорании жидкого топлива в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Полученные в ходе моделирования данные позволили определить тепловое состояние жаровой трубы в наиболее теплонапряженных сечениях с помощью полуэмпирических зависимостей с учетом конвективного и лучистого теплообмена между факелом и жаровой трубой.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, математическое моделирование, теплообмен, температура стенки.

Введение

Реализация новых газотурбинных агрегатов, являющихся сложными тепловыми двигателями, в которых используются последние достижения науки и техники, связана с решением задач интенсификации рабочего процесса в камерах сгорания, прежде всего с исследованием и внедрением в конструкции новых, более эффективных способов охлаждения элементов, ограничивающих зону горения, с созданием научно-обоснованных методов расчета их температурного состояния. Особую актуальность эти задачи приобретают в связи с растущей тенденцией постоянного роста начальных параметров рабочего тела в цикле турбин, что, в свою очередь, приводит к ухудшению условий работы камер сгорания, так как повышение удельного тепловыделения в огневой зоне камеры сопровождается ослаблением свойств поступающего в камеру воздуха, используемого для охлаждения металла огневых элементов камеры сгорания [1 – 4]. Для обеспечения надежной работы камеры необходимо поддерживать температурный уровень металла в заданных (по минимуму и максимуму) пределах. Следовательно, на стадиях проектирования и доводки камер сгорания необходимо правильно выбрать оптимальную систему охлаждения и оценить степень ее совершенства.

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 и концентраций основных продуктов горения по сечениям жаровой трубы. Полученные в результате моделирования данные возможно использовать для определения температурного состояния элементов камер сгорания с помощью известных полуэмпирических зависимостей. В результате уменьшаются сроки и стоимость проектных и доводочных работ по созданию перспективных типов камер сгорания ГТД [5, 6].

В статье представлены результаты численного моделирования процессов смесеобразования и сгорания жидкого топлива в камере сгорания судового ГТД с максимальной температурой цикла 1457 К, а также применение полученных данных для определения температурного состояния стенок жаровой трубы в наиболее теплонапряженных сечениях. Путем разбиения объема жаровой трубы на сечения после проведенных трехмерных CFD-расчетов вычисляется расход рабочего тела и охлаждающего воздуха, среднemasсовая температура потока, а также полнота выгорания топлива в каждом сечении. Полученные значения используются для определения температуры стенки жаровой трубы с помощью известных полуэмпирических зависимостей, представленных в [2, 4].

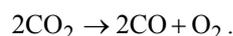
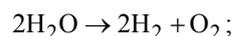
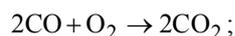
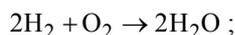
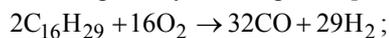
1. Математическая модель

Предложенная математическая модель камеры сгорания, работающей на жидком топливе, основана на следующих уравнениях: неразрывности, сохра-

нения 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: 1) течение газа трехмерное турбулентное, установившееся во времени и дозвуковое; 2) 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 [7, 8]:



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 расчёт, чередуясь с расчётом 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 [9], 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.

Локальное значение температуры жаровой трубы может быть найдено решением уравнения теплового баланса, составленного для элемента жаровой трубы (рис. 1) в установившемся режиме работы:

$$R_1 + C_1 = R_2 + C_2, \quad (1)$$

где $R_{1(2)}$ – лучевой поток к (от) стенке жаровой трубы; $C_{1(2)}$ – конвективный поток к (от) стенке жаровой трубы.

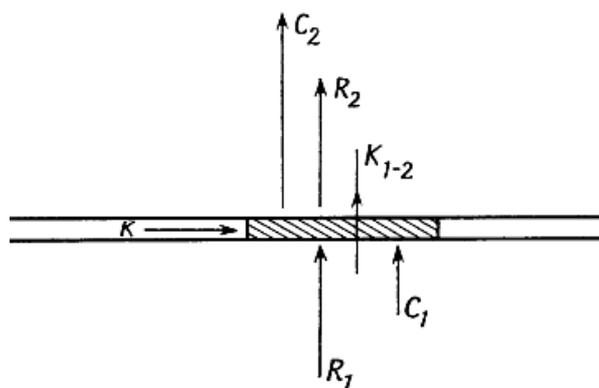


Рис. 1. Схема процесса теплопередачи для стенки жаровой трубы:

K_{1-2} – кондуктивный поток поперек стенки;
 K – кондуктивный поток вдоль стенки

Физическая модель, изображенная на рис. 1, учитывает только продольное изменение всех определяющих теплопередачу параметров, так как кондуктивный поток вдоль стенки K пренебрежимо малый.

Составляющие у уравнении (1) имеют следующий вид:

$$R_1 = \sigma \varepsilon_{ст.эф} \varepsilon_{ф} (T_{ф.эф}^4 - T_{ж.т}^4); \quad (2)$$

$$C_1 = \alpha_{1K} (T_{ж.т} - T_m); \quad (3)$$

$$C_2 = \alpha_{2K} \varphi (T_{ж.т} - T_2); \quad (4)$$

$$R_2 = \sigma \varepsilon_{пр} (T_{ж.т}^4 - T_{кр}^4), \quad (5)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана;

α_{1K} – коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны жаровой трубы;

α_{2K} – коэффициент теплоотдачи с наружной стороны жаровой трубы;

$\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты в системе теплообмена между наружной поверхностью жаровой трубы и внутренней поверхностью корпуса;

$\varepsilon_{ст.эф}$ – эффективная степень черноты внутренней (обращенной к пламени) поверхности жаровой трубы;

$\varepsilon_{\text{ф}}$ – степень черноты факела;

T_2 – температура воздуха в кольцевом канале (межтрубном пространстве);

$T_{\text{ж.т}}$ – температура жаровой трубы в рассматриваемом сечении;

$T_{\text{ф.эф}}$ – эффективная температура излучения факела (пламени);

$T_{\text{м}}$ – температура потока на внешней границе пристенного пограничного слоя;

$T_{\text{кр}}$ – температура внутренней поверхности корпуса.

В уравнении (1) не учтены перетечки теплоты вдоль стенки за счет теплопроводности, а температура внутренней и наружной поверхностей жаровой трубы принята одинаковой. Вследствие малой толщины стенки (1,5 – 2,5 мм) оба допущения не вносят заметных погрешностей в выполняемый расчет. Содержащиеся в уравнении тепловые потоки и коэффициенты теплоотдачи отнесены к внутренней поверхности жаровой трубы, обращенной к факелу. Поскольку в камере сгорания имеет место осевая симметрия: аэродинамической, температурной и концентрационной структуры потоков, то входящие в уравнение (1) величины относятся к фиксированному поперечному сечению камеры сгорания.

Уравнение (1), составленное для каждого из поперечных сечений, на которые разбивают камеру сгорания, решается относительно $T_{\text{ж.т}}$. Выбор поперечных сечений производится в соответствии с принятой конструкцией камеры и с результатами проведенных имитационных CFD-расчетов. Вероятные места максимальной и минимальной температуры металла подвергаются расчету.

2. Температурного состояния стенок жаровой трубы

Определение температуры стенок жаровой трубы камеры сгорания следует за аэродинамическим расчетом и определением полноты сгорания топлива по ходу факела. Следует отметить, что аэродинамический расчет камеры сгорания является сложной задачей из-за сложной и разветвленной схемы подачи воздуха в жаровую трубу.

В результате проведения имитационных трехмерных CFD-расчетов камеры сгорания было получено поле температур вблизи внутренней стенки жаровой трубы (рис. 2). Также, появилась возможность определения любых физических свойств и характеристик рабочего тела в любом сечении камеры сгорания.

При оценке температурного режима металла в первую очередь интересует максимальная темпера-

тура пламенной трубы. Местоположение и значение этой температуры определяются характером ее распределения по длине камеры и тепловыми потоками. Наибольшая температура металла характеризует надежность работы жаровой трубы с точки зрения возможности ее прогорания. На вопрос о наличии резкого градиента температуры по длине жаровой трубы и участков с низкой температурой, где возможны отложения углерода, может дать ответ лишь точное знание распределения температуры металла по всей длине камеры. Средняя на поверхности жаровой трубы температура не может характеризовать температурный режим жаровой трубы. Таким образом, необходимо определять температуру стенки по всей длине жаровой трубы.

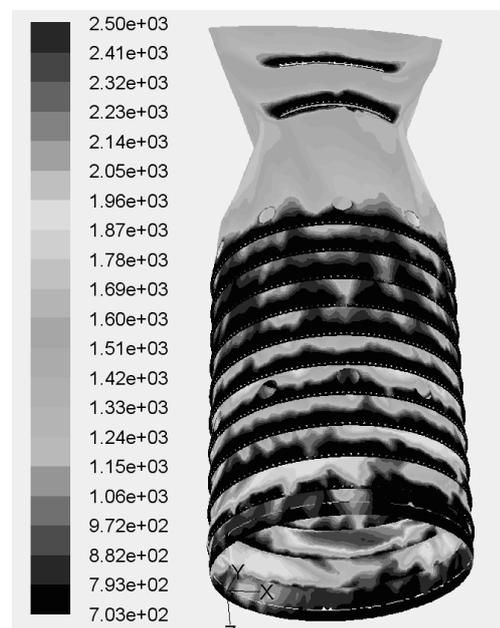


Рис. 2. Температура потока вблизи внутренней стенки жаровой трубы

Однако, температура потока вблизи внутренней стенки и по сечениям жаровой трубы не дает представление о температуре самого металла, так как не учитывается конвективный и лучистый теплообмен между факелом и жаровой трубой. Поэтому для более точного определения температуры стенки необходимо решение уравнений (1) – (5).

Также, для решения вышеуказанных уравнений необходимы данные о расходах рабочего тела и охлаждающего воздуха, среднemasсовая температура потока, коэффициент полноты сгорания топлива в интересующих сечениях, а также свойства материала жаровой трубы.

Для определения этих данных были выбраны сечения жаровой трубы, соответствующие схеме препарировки при проведении экспериментальных работ (рис. 3).

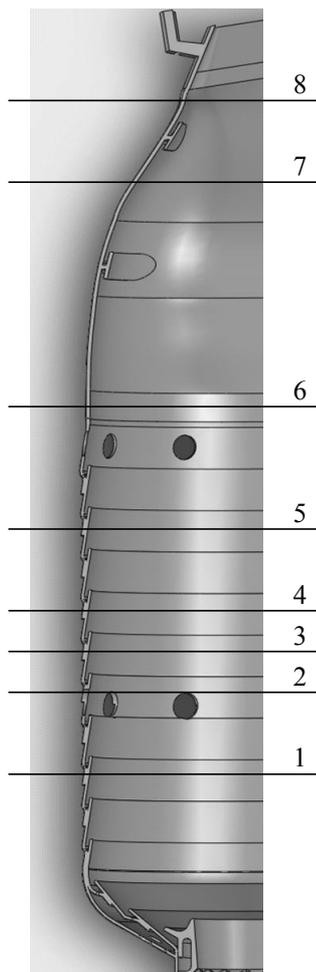


Рис. 3. Схема расчетных сечений жаровой трубы

Результаты расчета среднемассовой температуры потока и температуры стенки с учетом подачи охлаждающего воздуха, а также результаты экспериментальных замеров температуры стенки, представлены на рис. 4.

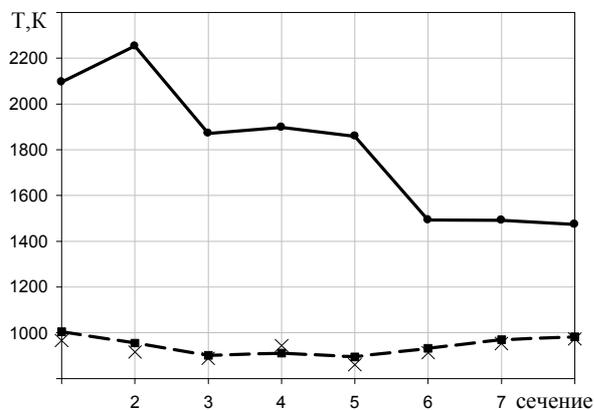


Рис. 4. Значения по сечениям жаровой трубы:
 ———— — температуры рабочего тела;
 - - - - - расчетной температуры стенки;
 × — экспериментальные значения температуры стенки

Как видно на рис. 4, температура рабочего тела в жаровой трубе существенно отличается от температуры металла и имеет другой характер изменения по длине жаровой трубы. Это связано с неравномерной подачей воздуха в жаровую трубу вследствие разности площадей отверстий подачи охлаждающего воздуха по обечайкам, а также подводом существенного количества первичного и вторичного воздуха.

В проведенных расчетах скорость воздуха в кольцевом канале предполагалась равномерной, но в тех местах, где местная скорость меньше средней ее величины, истинная температура стенки может оказаться выше расчетной. Любые изменения в потоке воздуха вокруг жаровой трубы отражаются на значениях температуры стенки. Тем не менее, расчетная температура стенок жаровой трубы, полученная в предположении равномерности потока, является хорошей мерой в определении необходимых расходов воздуха для охлаждения стенок, а также количества обечайек жаровой трубы.

Кроме того, с помощью расчетной температуры можно определить качественное влияние режимных параметров на температуру стенки и найти, на каких режимах достигается максимальная температура стенки.

Следует отметить, что отличие полученных расчетных данных о температуре стенки жаровой трубы не отличается от экспериментальных более чем на 5%.

Заключение

С помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики (CFD) и трехмерной виртуальной модели камеры сгорания проведены расчеты процесса горения жидкого топлива и получены данные по расходам рабочего тела и охлаждающего воздуха, а также полноты выгорания топлива по сечениям жаровой трубы. По этим данным произведен расчет температуры стенки жаровой трубы в наиболее теплонапряженных сечениях. Полученные значения не отличаются от экспериментальных данных более чем на 5%.

Таким образом, представлена возможность с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики (CFD) и известных полуэмпирических зависимостей проводить расчеты температуры металла жаровых труб на стадиях проектирования и доводки жидкотопливных камер сгорания газотурбинных двигателей. Это приведет к уменьшению сроков и стоимости проектных и доводочных работ по созданию перспективных типов камер сгорания ГТД.

Литература

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. Процеси в камерах згорання 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. Сударев А.В. Камеры сгорания газотурбинных установок: Теплообмен / А.В. Сударев, В.И. Антоновский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 280 с.
5. Сербин С.И. Исследование структуры течения во фронтном устройстве камеры сгорания га-

зотурбинного двигателя мощностью 25 МВт / С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, В.В. Вилкул // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ, 2005. – № 8 (24). – С. 146-149.

6. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – Пермь: ОАО "Авиадвигатель", 2006. – 1204 с.

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

8. 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.

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

Поступила в редакцию 20.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой турбин Г.Ф. Романовский, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ СТІНОК ЖАРОВОЇ ТРУБИ РІДКОПАЛИВНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ІНСТРУМЕНТАМИ CFD І МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

С.І. Сербін, С.В. Вилкул

Стаття присвячена питанням визначення теплового стану стінок жарових труб рідкопаливних камер згорання газотурбінних двигунів за допомогою сучасних інструментів обчислювальної гідродинаміки (CFD) і відомих напівемпіричних залежностей. Показано можливість застосування чисельного експерименту для визначення структури течії і температурного поля потоку при згорянні рідкого палива в камерах згорання газотурбінних двигунів. Отримані в ході моделювання дані дозволили визначити тепловий стан жарової труби в найбільше теплонавантажених перетинах за допомогою напівемпіричних залежностей з урахуванням конвективного і променистого теплообміну між факелом і жаровою трубою.

Ключові слова: газотурбінний двигун, камера згорання, математичне моделювання, теплообмін, температура стінки.

RESEARCH THE THERMAL CONDITION OF THE FLAME TUBES WALLS FOR LIQUID-FUEL COMBUSTION CHAMBER BY THE INSTRUMENTALITY OF CFD AND MATHEMATICAL MODELING

S.I. Serbin, S.V. Vilkul

The article is devoted to the questions of the thermal condition of the flame tubes walls for liquid-fuel combustion chambers of gas turbine engines by the instrumentality of the modern tools of computational fluid dynamics (CFD) and known semiempirical dependences. The opportunity of application of numerical experiment is shown for definition of the flow's structure and stream's temperature field at liquid fuel combustion in combustion chambers of gas turbine engines. The data obtained during modelling allowed to determine thermal condition of the flame tube in the most heat-stressed cross-sections by semiempirical dependences taking into account the convective and radiant heat exchange between a torch and the flame tube.

Key words: gas turbine engine, combustion chamber, computer flow modelling, heat exchange, temperature of the wall.

Сербин Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., директор Машиностроительного института Национального университета кораблестроения, Николаев, Украина, e-mail: siserbin@yandex.ru.

Вилкул Сергей Владимирович – аспирант кафедры турбин Национального университета кораблестроения, Николаев, Украина, e-mail: svvilkul@yandex.ru.