

УДК 629.735

О.В. КИСЛОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА СЛОЖНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД

Рассмотрен вопрос определения относительного расхода топлива сложного химического состава. Химический состав топлива влияет на величину условной удельной энтальпии топлива, входящую в известную формулу для вычисления относительного расхода топлива. Получена универсальная формула для расчета условной удельной энтальпии топлива при наличии примесей, характерных для низкосортных углеводородных топлив; выполнены оценка точности полученной формулы путем сопоставления результатов расчета с известными данными и анализ погрешности определения относительного расхода топлива при неучете особенностей химического состава топлива. Показано, что эта погрешность может достигать 5%.

Ключевые слова: относительный расход топлива, удельная энтальпия, условная удельная энтальпия топлива, удельная теплоемкость, условная удельная изобарная теплоемкость, массовая доля химического элемента, реакция полного окисления, камера сгорания, газотурбинный двигатель.

Введение

В связи с широким распространением ГТД и удорожанием жидкого углеводородного топлива актуален вопрос использования газообразного топлива и низкосортного жидкого углеводородного топлива, например мазута. Эти сорта топлива отличаются от авиационного керосина не только процентным содержанием углерода и водорода, но и наличием примесей в виде кислорода, азота, серы и т.д. Поэтому относительный расход топлива должен определяться с учетом его химического состава.

Существуют методы расчета относительного расхода топлива, основанные на детальном анализе химических реакций и термодинамических свойств веществ [1]. Однако, ввиду сложности таких расчетов, в инженерной практике широко используются более простые методы.

Большинство известных инженерных методов вычисления относительного расхода топлива применимо при использовании в качестве топлива авиационного керосина [2, 3, 4]. Наибольшей универсальностью обладает метод Я.Т. Ильичева [5], позволяющий определять относительный расход любого углеводородного топлива по формуле

$$q_T = \frac{i_{\text{ВГ}}^* - i_{\text{ВК}}^*}{H_u \eta_T - i_T(T_T^*) + i_T(T_{\text{СТ}})}, \quad (1)$$

где $i_{\text{ВК}}^*$ – удельная энтальпия воздуха на входе в камеру сгорания;

$i_{\text{ВГ}}^*$ – удельная энтальпия воздуха на выходе из камеры сгорания;

H_u – низшая теплотворная способность топлива;

η_T – коэффициент выделения тепла в камере сгорания;

$i_T(T_T^*)$ – условная удельная энтальпия топлива при температуре T_T^* ;

$i_T(T_{\text{СТ}})$ – условная удельная энтальпия топлива при стандартной температуре $T_{\text{СТ}} = 298$ К.

Формула (1) получена в предположении, что топливо подается в жидком виде при температуре $T_T = T_{\text{СТ}}$.

Поскольку разница между $i_{\text{ВК}}^*$ и $i_T(T_{\text{СТ}})$ мала и слабо влияет на величину относительного расхода топлива в камере сгорания, в работе [6] и в ряде других работ используется упрощенный вариант формулы (1):

$$q_T = \frac{i_{\text{ВГ}}^* - i_{\text{ВК}}^*}{H_u \eta_T - i_T(T_T^*) + i_{\text{ВК}}^*}. \quad (2)$$

Величина $i_T(T)$ зависит от химического состава топлива. В [5] приведены формулы расчета $i_T(T)$ для топлива, состоящего из углерода, водорода и кислорода. Кроме того, в табличном виде представлена зависимость $i_T(T)$ для авиационного керосина, состоящего по массе из 85% углерода и 15% водорода.

Однако в [5] не учтено наличие характерных для низкосортных топлив примесей на величину $i_T(T)$. Кроме того, для инженерных расчетов требуются зависимости $i_T(T)$ не только для авиационных керосинов, но и для углеводородных топлив

другого состава. В частности, в наземных ГТУ широко используется метан, состоящий по массе из 75% углерода и 25% водорода.

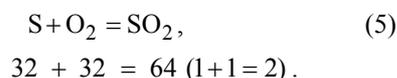
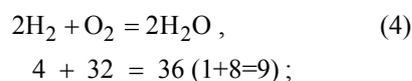
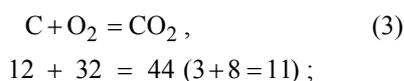
Целью данной работы является получение универсальной формулы для расчета условной удельной энтальпии топлива $i_T(T)$ при наличии примесей, характерных для низкосортных углеводородных топлив; оценка точности полученной формулы путем сопоставления результатов расчета с известными данными; анализ погрешности определения относительного расхода топлива, обусловленной погрешностью величины $i_T(T)$.

1. Расчетные соотношения

Формула для вычисления относительного расхода топлива (1) получена на основе закона сохранения энергии путем рассмотрения процесса горения в виде процесса подвода теплоты к воздуху и топливу. При этом реальный химический состав продуктов сгорания представляется в виде не реагирующей смеси воздуха и топлива. Энтальпия такой смеси равна энтальпии продуктов сгорания. Разница между энтальпией смеси и энтальпией чистого воздуха приписывается топливу и называется условной энтальпией топлива. При таком подходе задача определения относительного расхода топлива сводится к задаче нахождения удельной условной энтальпии топлива $i_T(T)$.

В состав жидких углеводородных топлив (авиационные керосины, дизельные и моторные топлива, мазуты, дистилляты), природных и искусственных газов помимо углерода и водорода входят примеси серы, кислорода, азота и зола [7]. При горении топлива горючие химические элементы топлива при соединении с кислородом воздуха образуют оксиды, другие элементы не вступают в химические реакции и находятся в молекулярном виде. Для определения условной удельной энтальпии топлива необходимо вычесть из энтальпии оксидов энтальпию входящего в них кислорода, как учтенную в составе чистого воздуха.

Если считать, что горючими элементами являются углерод, водород и сера, то реакции их полного окисления с указанием молекулярных масс исходных и конечных продуктов имеют вид:



Из уравнений (3)...(5) следует, что на единицу массы углерода приходится 11/3 единиц массы углекислого газа и 8/3 единиц массы кислорода; на единицу массы водорода приходится 9 единиц массы воды и 8 единиц массы кислорода; на единицу массы серы приходится 2 единицы массы двуокиси серы и 1 единица массы кислорода. Эти соотношения позволяют по известным массовым долям горючих элементов топлива и удельным энтальпиям оксидов определить условную удельную энтальпию горючих элементов топлива.

Удобно представить, что в реакции окисления участвует кислород, имеющийся в воздухе, а кислород топлива не вступает в реакцию и находится в продуктах сгорания в молекулярном виде. Тогда условная удельная энтальпия топлива определяется как сумма условных удельных энтальпий горючих элементов и удельных энтальпий негорючих элементов. Для рассматриваемого случая

$$\begin{aligned} i_{\delta}(T) &= \frac{1}{3} (11 \cdot i_{CO_2} - 8 \cdot i_{O_2}) C_{\delta} + \\ &+ (9 \cdot i_{H_2O} - 8 \cdot i_{O_2}) H_{\delta} + (2 \cdot i_{SO_2} - i_{O_2}) S_{\delta} + \\ &+ i_{O_2} O_{\delta} + i_{N_2} N_{\delta}, \end{aligned} \quad (6)$$

где C_T – массовая доля углерода в топливе;

H_T – массовая доля водорода в топливе;

S_T – массовая доля серы в топливе;

O_T – массовая доля кислорода в топливе;

N_T – массовая доля азота в топливе.

Формулу (6) можно записать в общем виде для произвольного состава топлива, состоящего из n горючих элементов и m негорючих элементов:

$$i_T(T) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{a_k} (c_k \cdot i_{G_{x_k} O_{y_k}} - b_k \cdot i_{O_2}) G_k + \sum_{j=1}^m i_{P_j} \cdot P_j, \quad (7)$$

где k – номер горючего элемента топлива;

G_k – массовая доля k -го горючего элемента;

a_k – молекулярная масса k -го горючего элемента в уравнении его окисления;

b_k – молекулярная масса кислорода в уравнении окисления k -го горючего элемента;

c_k – молекулярная масса оксида $G_{x_k} O_{y_k}$ k -го горючего элемента в уравнении окисления;

j – номер негорючего элемента топлива;

P_j – массовая доля j -го негорючего элемента топлива.

2. Анализ полученных результатов

Достоверность вычисления удельной условной энтальпии топлива $i_T(T)$ подтверждена сравнением с данными Я.Т. Ильичева [5] для авиационного ке-

росина, состоящего по массе из 85% углерода и 15% водорода. Соответствующие зависимости представлены на рис. 1. Расхождение результатов составляет менее одного процента и может быть объяснено разной точностью задания исходных данных. На этом же рисунке представлены результаты расчета удельных условных энтальпий метана (75% углерода и 25% водорода по массе) и сернистого дистиллята, состоящего из 86% углерода, 11,35% водорода, 2,4% серы, 0,15% азота, 0,1% кислорода по массе [7]. Отличие от удельной условной энтальпии авиационного керосина в диапазоне от 500 °С до 1400 °С для метана составляет 36...44%, а для сернистого дистиллята 13...15%.

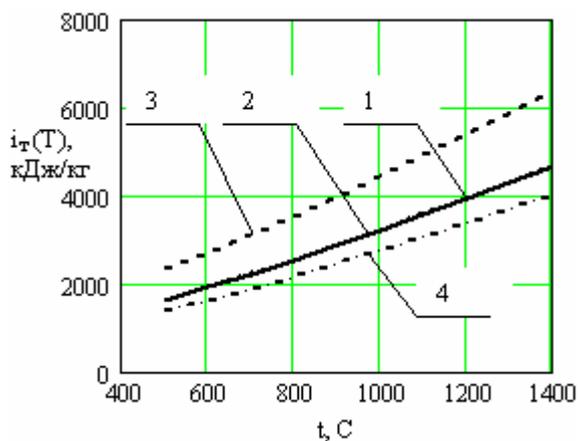


Рис. 1. Зависимость удельной условной энтальпии топлива от температуры:

- 1 – по данным Я.Т. Ильичева [5] для авиационного керосина (85% углерода, 15% водорода по массе);
- 2 – расчет по формуле (6) для авиационного керосина (85% углерода, 15% водорода по массе);
- 3 – расчет по формуле (6) для метана (75% углерода, 25% водорода по массе);
- 4 – расчет по формуле (6) для дистиллята сернистого (86% углерода, 11,35% водорода, 2,4% серы, 0,15% азота, 0,1% кислорода по массе)

Неучет таких отличий $i_T(T)$ при расчете по формуле (2) приводит к занижению вычисленного значения относительного расхода метана и завышению вычисленного значения относительного расхода сернистого дистиллята при температуре 500 °С на выходе из камеры сгорания на 1,44% и 0,62% соответственно, а при температуре 1400 °С – на 3,77% и 1,75% (рис. 2).

Поскольку удельная энтальпия представляет собой произведение удельной изобарной теплоемкости и абсолютной температуры $i = c_p T$, формулы (6) и (7) можно трансформировать в формулы для расчета удельной условной изобарной теплоемкости топлива $c_{pT}(T)$. В частности, из формулы (6) полу-

чается:

$$c_{pT}(T) = \frac{1}{3} (11 \cdot c_{pCO_2} - 8 \cdot c_{pO_2}) C_T + (9 \cdot c_{pH_2O} - 8 \cdot c_{pO_2}) H_T + (2 \cdot c_{pSO_2} - c_{pO_2}) S_T + c_{pO_2} O_T + c_{pN_2} N_T. \quad (8)$$

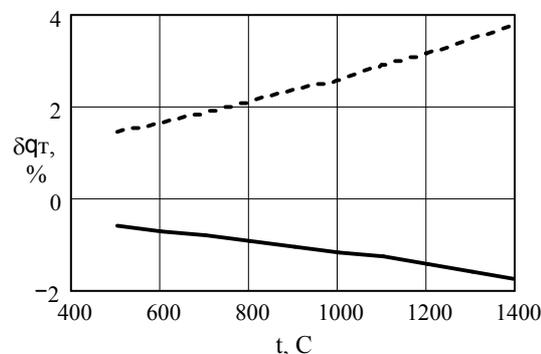


Рис. 2. Зависимость погрешности определения относительного расхода топлива от температуры при использовании удельной условной энтальпии авиационного керосина

- для метана;
- для сернистого дистиллята

Преимущество формулы (8) объясняется наличием большого объема справочных данных по теплоемкости различных веществ. Однако при расчете удельной условной энтальпии топлива через $c_{pT}(T)$ необходимо учитывать, в каком виде представлена удельная изобарная теплоемкость. Чаще всего в справочниках приводится средняя удельная изобарная теплоемкость c_{pT} для диапазона температур от 0 °С до t . Для правильного расчета удельной энтальпии требуется средняя удельная изобарная теплоемкость c_{pT} для диапазона температур от 0 К до $T = t + 273$. Пересчет средней удельной изобарной теплоемкости осуществляется по формуле

$$c_{pT} = \frac{i_{T=273,15} + c_{pT} t}{T}, \quad (9)$$

где $i_{T=273,15} = c_{pT=273,15} \cdot 273,15$ – удельная энтальпия при $t = 0$ °С.

Представленные на рис. 1 и 2 результаты получены с использованием формул (8) и (9) на основе справочных данных по удельной изобарной теплоемкости веществ, приведенных в [8], и справочных данных по $i_{T=273,15}$ [9].

Заключение

В работе получена универсальная формула для расчета условной удельной энтальпии топлива сложного химического состава $i_T(T)$, необходимая для

расчета относительного расхода топлива по методу Я.Т. Ильичева. Достоверность полученной формулы подтверждена сравнением и известными данными. Получены зависимости условной удельной энтальпии топлива от температуры для метана и сернистого диоксида. Показано, что неучет особенностей химического состава приводит к погрешности определения относительного расхода топлива 1...5%. В связи с наличием большого объема справочных данных по теплоемкостям веществ, представлена формула для расчета условной удельной изобарной теплоемкости топлива, позволяющая вычислить условную удельную энтальпию топлива при известной температуре.

Литература

1. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания : справочник в 10 томах / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалли, А.П. Тишин и др.; под ред. В. П. Глушко. – М.: АН СССР, 1971-1980. – 520 с.
2. Нечаев Ю.Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Часть 2 / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1978. – 336 с.
3. Масленников М.М. Авиационные газотур-

бинные двигатели / М.М. Масленников, Ю.И. Шальман. – М.: Машиностроение, 1975. – 576 с.

4. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей / В.П. Деменченков, Л.Н. Дружинин, А.Л. Пархомов и др.; под ред. С.М. Шляхтенко, В.А. Сосунова. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

5. Ильичев Я.Т. Термодинамический расчет воздушно-реактивных двигателей / Я.Т. Ильичев. – М.: Центральный институт авиационного моторостроения. – 1975. – 126 с.

6. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / В.М. Акимов, В.И. Бакулев, Р.И. Курзинер и др.; под ред. С.М. Шляхтенко; 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с.

7. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей / Ю.М. Пчелкин; 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

8. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М.: Высш. шк., 1969. – 560 с.

9. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 708 с.

Поступила в редакцию 16.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры теории авиационных двигателей В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСНИХ ВИТРАТ ПАЛИВА СКЛАДНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ В КАМЕРІ ЗГОРАННЯ ГТД

О.В. Кіслюв

Розглянуте питання визначення відносних витрат палива складного хімічного складу. Хімічний склад палива впливає на величину умовної ентальпії палива, що входить до відомої формули для розрахунку відносних витрат палива. Одержана універсальна формула для розрахунку умовної питомої ентальпії палива за наявності домішок, що характерні для низькосортних вуглеводневих палив; виконані оцінка точності одержаної формули шляхом співставлення результатів розрахунку з відомими даними та аналіз похибки визначення відносних витрат палива при неврахуванні особливостей хімічного складу палива. Показано, що ця похибка може досягати 5%.

Ключові слова: відносні витрати палива, питома ентальпія, умовна питома ентальпія палива, питома теплоємність, умовна питома ізобарна теплоємність, масова доля хімічного елемента, реакція повного окиснення, камера згорання, газотурбінний двигун.

FINDING THE RELATIVE CONSUMPTION OF COMPLEX CHEMICAL COMPOSITION FUEL IN COMBUSTION CHAMBER GAS TURBINE ENGINE

O. V. Kislov

The problem of finding the value of relative fuel consumption is considered. The fuel has a complex chemical composition. The chemical composition of the fuel affects the value of conditional specific fuel enthalpy. This value is needed to calculate relative fuel consumption. The general formula for finding the conditional specific fuel enthalpy is obtained. The correctness of this formula was verified by comparison with known data. It was shown, that error of finding relative fuel consumption may reach 5%, if chemical fuel composition is not taken into account.

Key words: relative fuel consumption, specific enthalpy, conditional specific fuel enthalpy, specific heat, conditional specific isobaric heat, mass fraction of chemical element, full oxidation reaction, combustion chamber, gas turbine engine.

Кислюв Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теории авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: OVKislov@mail.ru.