

РАСЧЕТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАБОЧЕГО ТЕЛА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ткаченко А.Ю.

Самарский университет, г. Самара, tau@ssau.ru

Ключевые слова: рабочее тело, газотурбинный двигатель, моделирование, термодинамические свойства, теплоёмкость, энтальпия, энтропия, температура, состав, рабочий процесс.

Рабочим телом газотурбинных двигателей является атмосферный воздух и продукты сгорания углеводородного топлива. При численном моделировании и исследовании рабочего процесса газотурбинных двигателей рабочее тело целесообразно рассматривать как смесь семи основных компонентов: N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 , SO_2 , Ar и He . В некоторых задачах для упрощения можно ограничиться четырьмя компонентами: N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 .

В этом случае состав рабочего тела описывается совокупностью массовых долей g_i компонентов, а также все термодинамические свойства и газодинамические функции рабочего тела рассчитываются в зависимости от свойств этих компонентов.

Базовым термодинамическим свойством i -го компонента рабочего тела в идеальном газе является зависимость удельной изобарной теплоёмкости c_{pi} от абсолютной температуры T . На практике встречаются различные способы описания данной зависимости, но наибольшее распространение получили полиномиальные функции. Общепринятым стандартом в этой области является методика расчета свойств индивидуальных веществ, описанная в отчёте [1].

В данной методике зависимость c_{pi} от T описывается двумя наборами семи коэффициентов полинома со степенями от -2 до 4 для, соответственно, двух диапазонов температур: от 200 К до 1000 К и от 1000 К до 6000 К. Газовая постоянная рассчитывается в зависимости от молярной массы компонента μ_i и универсальной газовой постоянной R_μ .

В зависимости от совокупности значений массовых долей компонентов $\Gamma = \{g_i\}$ рассчитываются молярная масса, газовая постоянная и коэффициенты полиномов в формулах расчета удельной изобарной теплоёмкости рабочего тела.

На основе функции расчёта удельной изобарной теплоёмкости в зависимости от температуры выводятся формулы для расчёта удельной энтальпии h и удельной относительной энтропии в изобарном процессе s_p в зависимости от абсолютной температуры T и состава Γ .

Термодинамическая функция $y(T, \Gamma)$, используемая при расчёте изменения давления в изоэнтропическом процессе, является производной от $s_p(T, \Gamma)$:

$$y(T, \Gamma) = \frac{s_p(T, \Gamma)}{R(\Gamma)}.$$

Термодинамическая функция $j(T, \Gamma)$ определяется по формуле:

$$j(T, \Gamma) = h(T, \Gamma) + 0.5 \left[1.0 + \frac{R(\Gamma)}{c_p(T, \Gamma) - R(\Gamma)} \right] \cdot R(\Gamma) \cdot T.$$

Данная функция используется для определения критической температуры потока T^\wedge , так как она связана с полной температурой потока T^* соотношением:

$$j(T^\wedge, \Gamma) = h(T^*, \Gamma).$$

Значение одной из термодинамических функций h , y или j однозначно определяет значение абсолютной температуры T рабочего тела заданного состава. Поскольку из выражений для расчёта данных функций невозможно в явном виде выразить T , то температура в зависимости от h , y или j вычисляется методом последовательных приближений:

$$T(h, \Gamma) = \text{iterate}[T, h(T, \Gamma) \rightarrow h];$$

$$T(y, \Gamma) = \text{iterate}[T, y(T, \Gamma) \rightarrow y];$$

$$T(j, \Gamma) = \text{iterate}[T, j(T, \Gamma) \rightarrow j].$$

Так как прямые функции $h(T, \Gamma)$, $y(T, \Gamma)$ и $j(T, \Gamma)$ являются монотонными в зависимости от T , то подбор значения температуры не представляет сложности и может выполняться любым из стандартных численных методов решения уравнения, например, методом Ньютона.

Разработанный метод численного моделирования термодинамических и газодинамических свойств рабочего тела обладает рядом преимуществ по сравнению с используемыми в настоящий момент подходами:

- позволяет создавать эффективные с точки зрения затрат времени на вычисления алгоритмы расчёта процессов, происходящих в газовых потоках;
- обеспечивает более высокую достоверность результатов моделирования за счёт того, что расчет всех параметров, в том числе газодинамических, выполняется с учетом зависимости свойств рабочего тела от температуры и состава;
- имеет широкий диапазон применения и возможность дальнейшего масштабирования при необходимости моделирования рабочего тела более сложного состава.

Список литературы:

1. Bonnie J. McBride, Michael J. Zehe, Sanford Gordon. NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species. Glenn Research Center, Cleveland, Ohio. 2002. NASA/TP 2002 211556.

Информация об авторах:

Ткаченко Андрей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов имени В.П. Лукачёва, Самарский университет. Область научных интересов: методы и автоматизированные средства концептуального проектирования газотурбинных двигателей; системы моделирования, анализа и синтеза сложных технических систем; методология оптимального проектирования; оптимальное управление; виртуальные испытания; интеллектуальные системы автоматизированного проектирования.

THERMODYNAMIC PROPERTIES CALCULATION OF A GAS TURBINE ENGINE WORKING FLUID

Tkachenko A.Yu.

Samara National Research University, Samara, Russia, tau@ssau.ru

This study is dedicated to the development of the method for thermodynamic properties calculation of a gas turbine engine working fluid. The method has a wide range of applications and may be used to create effective algorithms for gas turbine engine workflow computation.