

УДК 621.54+621.431.75

## ПРОБЛЕМЫ РАСЧЁТНОГО АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ГТД, РАБОТАЮЩИХ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

© 2011 С. А. Гулина, М. Ю. Орлов, Е. Л. Михеенков

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В данной статье рассмотрены проблемы термодинамического расчёта газотурбинных двигателей, работающих на природном газе. Предлагается алгоритм термодинамического вычисления на основе  $\pi$ - $h$ - $T$  функции с точным учётом изменения теплофизических параметров рабочего тела в среде пакета программ Microsoft Office Excel.

*ГТД, расчётная модель, термодинамический анализ, EXCEL.*

В настоящее время весьма актуально создание расчётных моделей для анализа характеристик газотурбинных двигателей (ГТД), работающих в наземных условиях, например на газоперекачивающих станциях. Такие ГТД часто в качестве топлива используют природный газ, представляющий собой смесь различных углеводородов, состав которой может зависеть от целого ряда факторов, например от месторождения. Между тем известно, что состав газа в значительной степени определяет процессы горения и образования продуктов сгорания, характеристики цикла тепловой машины. Ранее авторами данной статьи было показано, что при расчёте циклов тепловых машин необходимо учитывать различие термодинамических свойств разных рабочих тел в процессах расширения и сжатия для конкретных составляющих топливного газа и продуктов его сгорания [1, 2]. При этом достоверность расчетов, как показал анализ используемых методов [3-5], может быть обеспечена только при учёте зависимости параметров веществ, участвующих в расчётных моделях, от температуры. Без этого невозможно рассчитать энтальпию, работу процессов сжатия и расширения как с использованием вспомогательных функций  $Z$  и  $Y$  [2]:

$$Z = T^{\frac{c_{p0}}{R}} e^{\frac{bT + \frac{c}{2}T^2 + \frac{d}{3}T^3}{R}};$$

$$Y = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{c_{p01}}{R}} e^{\frac{bT + \frac{c}{2}T^2 + \frac{d}{3}T^3}{R}};$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3,5} \frac{Y_2}{Y_1}; \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^{3,5},$$

так и с использованием  $\pi$ - $h$ - $T$ -функций [5]:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_0}^{T_2} c_p dT - \int_{T_0}^{T_1} c_p dT$$

и

$$p(T_1) = p(T_0) e^{\frac{S_{p1} - S_{p0}}{R}}.$$

В работе [3] приведён краткий алгоритм термодинамического расчёта авиационных ГТД с учётом зависимости свойств воздуха и продуктов сгорания от температуры.

В алгоритме расчёта с последующим использованием ЭВМ зависимость теплоёмкости от температуры авторы представляют в виде аппроксимирующего полинома  $n$ -го порядка:

$$c_p = c_p(T, q_T) = \sum_{j=0}^n a_j(q_T) (T/1000)^j, \quad (1)$$

где  $a_j(q_T)$  – коэффициенты полинома, зависящие от величин удельного расхода топлива на 1 кг воздуха  $q_T$ , а 1000 – масштабный коэффициент.

Изменение энтальпии в процессе от начальной температуры  $T_0$  до температуры  $T$  имеет вид

$$\Delta h = h(T, T_0, q_T) = \int_{T_0}^T c_p(T, q_T) dT. \quad (2)$$

Если за исходную температуру принять  $T=293$  К, то это уравнение запишется

$$h = h(T, 293K, q_T) = \int_{293}^T c_p(T, q_T) dT. \quad (3)$$

Исходный уровень температуры 293 К объясняется тем, что низшая теплотворная способность топлив даётся для этой температуры. Тогда

$$\Delta h = h(T, T_0, q_T) = 1000 \sum_{j=0}^n \frac{a_j(q_T)}{j+1} \times \left[ \left( \frac{T}{1000} \right)^{j+1} - \left( \frac{T_0}{1000} \right)^{j+1} \right]. \quad (4)$$

По уравнению (3) и известным  $T$  и  $T_0$  находится значение энтальпии. Для нахождения  $T$  по известному значению энтальпии решается обратная задача:

$$\Delta h - h(T, T_0, q_T) = 0.$$

Из уравнения адиабаты  $Rdp/p = ds$  после интегрирования можно определить отношение давлений в адиабатных процессах сжатия и расширения:

$$p/p_0 = \exp(S - S_0)/R.$$

Величину газовой постоянной следует находить с учетом  $q_T$ :

$$R = R(q_T) = 287 + \frac{1 + 1,0862q_T}{1 + q_T}.$$

Отношение давлений запишется

$$\frac{p}{p_0} = \Pi(T, T_0, q_T) = \exp \left[ \frac{a_0(q_T) \ln \frac{T}{T_0} + \sum_{j=1}^n \frac{a_j(q_T)}{j} \left[ \left( \frac{T}{1000} \right)^j - \left( \frac{T_0}{1000} \right)^j \right]}{R(q_T)} \right].$$

Обратная задача определения температуры по известному отношению давлений решается в виде

$$\frac{p}{p_0} - \Pi(T, T_0, q_T) = 0.$$

Коэффициент избытка воздуха принимался по простой зависимости

$$a = \frac{1}{q_T L_0}.$$

Показатель адиабаты находится по определённой с помощью зависимости (1) газовой постоянной:

$$k = \frac{c_p}{c_p - R}.$$

Авторы [3] нашли поправки определения работ сжатия и расширения по моделям идеального и реального газа:

$$e = \frac{\frac{k_z}{k_z - 1} R_z \left( 1 - \frac{1}{p_\Sigma^{k_z}} \right)}{\frac{k}{k - 1} R \left( 1 - \frac{1}{p_\Sigma^k} \right)}.$$

Здесь без нижних индексов рассматриваются процессы по модели идеального газа, с нижним индексом  $z$  – процессы с учётом переменности свойств рабочего тела.

Поправка составила в зависимости от степени повышения давления:

$\pi_\Sigma$	5	10	50	100
e	1,035	1,048	1,06	1,07

Видно, что неучёт изменения свойств рабочего тела от температуры и коэффициента избытка воздуха может дать ошибку в вычислениях более 5%, что в настоящее время вряд ли может считаться приемлемым.

Алгоритм, приведённый в работе [3], для термодинамического анализа авиационных двигателей достаточно сложен. Ещё более сложной задачей является анализ циклов ГТД при их работе на природном газе с произвольным составом, зависящим от места его добычи. Для решения этой задачи требуется создание алгоритма расчёта параметров смеси произвольных газов и массива с данными термодинамических свойств компонентов топлива в широком диапазоне температур. Актуальность разработки такого алгоритма подтверждается тем фактом, что в зависимости от месторождения газа его низшая теплота сгорания может изменяться на

17%, а стехиометрический коэффициент - на 22%. Требуемый алгоритм был получен одним из авторов данной статьи - Гулиной С.А.

Разработанная ею программа имеет положительные особенности:

- она реализована в одном из самых распространённых расчётных инструментов – электронных таблицах EXCEL, входящих в пакет программ стандартного Microsoft Office;

- пользователем программы может быть любой человек – от инженера-разработчика ГТД и эксплуатационника на станциях ГПА до студента ВУЗа;

- по финансовым соображениям это самый доступный вычислительный инструмент (цена вычислительных программ типа Matcad или Matlab на порядки превышает стоимость EXCEL);

- EXCEL имеет хорошие возможности графического представления результатов расчётов;

- EXCEL позволяет легко корректировать ошибки, причём после исправления данных корректируются все результаты расчетов и их графическое представление;

- EXCEL имеет дружественное свойство (OLE) встраивания в любой файл Microsoft Office и возможности вызова при необходимости окружения EXCEL с правом последующего редактирования.

Заслуга автора программы состоит в том, что ей пришлось проявить в своей работе изрядную изобретательность, так как интерактивные методы расчёта в EXCEL не предусмотрены.

Алгоритм программы приведен на рис.1.

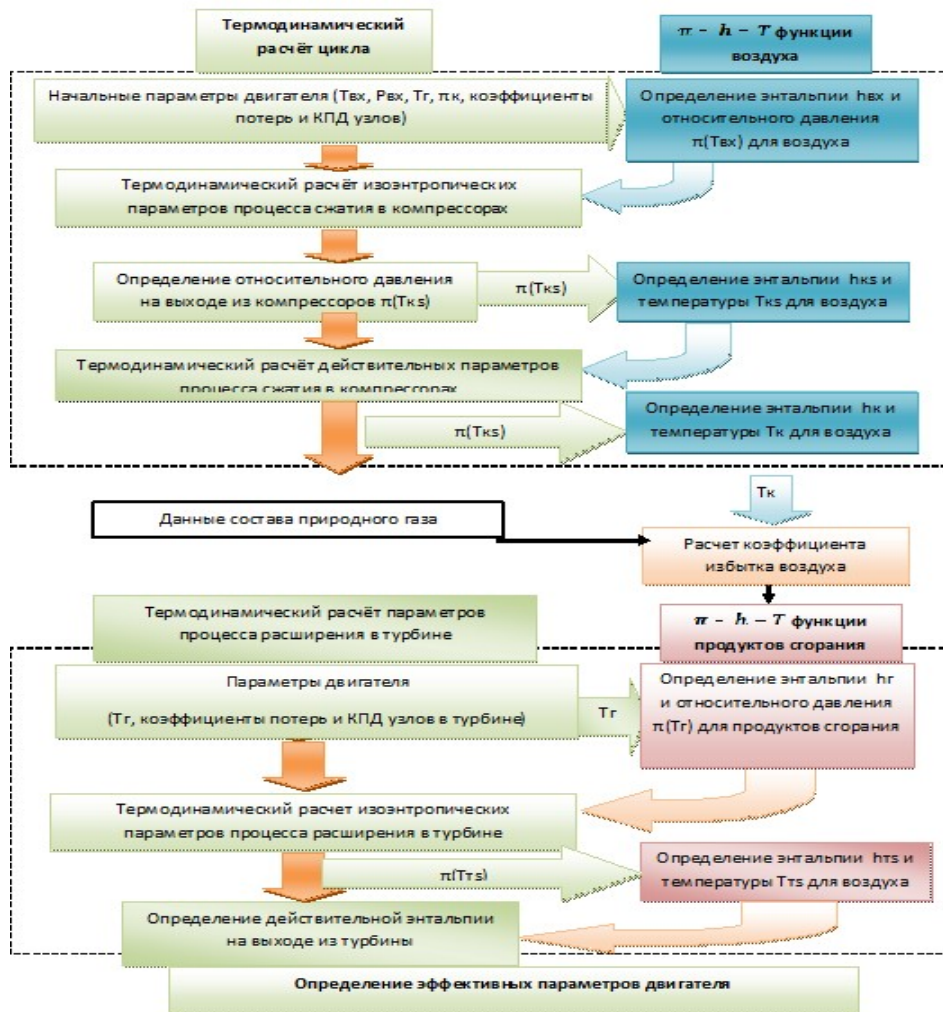


Рис.1. Алгоритм программы термодинамического расчёта ГТД

В настоящее время программа доведена до конечного вида и готова к использованию, с её помощью выполнены расчёты реальных двигателей и оценка сходимости результатов теоретических расчётов с экспериментальными исследованиями.

В ходе выполнения многочисленных вариантных расчётов известных ГТД (НК-12СТ, НК-14СТ, НК-16СТ, НК-38СТ, АЛ-31СТ и др.) было получено хорошее совпадение результатов расчётов по разработанной методике и паспортных данных натурных испытаний ГТД.

Программа может быть использована в учебном процессе для обучения студентов энергетических факультетов.

### Библиографический список

1. Проведение термодинамических расчётов с учётом переменности свойств рабочего тела [Текст] / Е.Л. Михеенков, В.В. Бирюк, М.Ю. Орлов [и др.] // Изв.

Самарского научного центра Российской Академии наук. Специальный выпуск, - 2008. - С.59-66.

2. Гулина, С.А. Упрощение термодинамических расчётов тепловых машин путём использования модели идеальных газов [Текст] / С.А. Гулина, М.Ю. Орлов // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. - 2009.- №3 (ч.3). - С.28-34.

3. Акимов, В. М. Теория и расчёт воздушно-реактивных двигателей [Текст] / В. М. Акимов, В. И. Бакулев, Р. И. Курзинер. - М.: Машиностроение. - 1987. - 568 с.

4. Жаров, Г. Г. Судовые высокотемпературные газотурбинные установки [Текст] / Г. Г. Жаров, Л. С. Венцюлис. - Л.: Судостроение, 1973. - 359 с.

5. Дорофеев, В. М. Термогазодинамический расчёт газотурбинных силовых установок [Текст] / В. М. Дорофеев, В. Г. Маслов, Н. В. Первышин. - М.: Машиностроение, 1973. - 144 с.

## PROBLEMS OF DESIGN ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF A GAS TURBINE ENGINE WORKING ON NATURAL GAS

© 2011 S. A. Gulina, E. L. Mikheyenkov, M. Y. Orlov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper deals with the problems of calculating the characteristics of gas turbine engines working on natural gas. The algorithm of thermodynamic calculation on the basis of  $\pi$ -h-T functions with the exact account of changing the thermophysical parameters of a working body in the environment of software package Microsoft Office Excel is proposed.

*GTD, calculation model, thermodynamics analysis, EXCEL.*

### Информация об авторах

**Гулина Светлана Анатольевна**, аспирантка кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: газотурбинный двигатель, проектирование, оптимизация, процессы теплообмена и диффузии, CALS-технологии.

**Орлов Михаил Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [adler65@mail.ru](mailto:adler65@mail.ru). Область научных интересов: процессы горения, двигатели внутреннего сгорания, процессы тепломассообмена и диффузии, CALS-технологии.

**Михеенков Евгений Леонтьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: процессы горения, двигатели внутреннего сгорания, процессы тепломассообмена и диффузии, CALS-технологии.

**Svetlana A. Gulina**, postgraduate of “Heat Engineering and Heat Engines” department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru). Area of research: gas turbine engine, designing, optimization, processes of heat exchange and diffusion, CALS- methods.

**Mikhail Y. Orlov**, candidate of engineering science – associate professor of “Heat Engineering and Heat Engines” department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [adler65@mail.ru](mailto:adler65@mail.ru). Area of research: burning processes, internal combustion engines, processes of heat exchange and diffusion, CALS- methods.

**Evgeniy L. Mikheyenkov**, candidate of engineering science – associate professor of “Heat Engineering and Heat Engines” department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru). Area of research: burning Processes, internal combustion engines, processes of heat exchange and diffusion, CALS- methods.