

УДК 62-631.2:665.65

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБИННЫХ ПРИВОДОВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

© 2014 В.К. Тян, С.А. Гулина, Г.М. Орлова

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 14.02.2014

В статье рассмотрены проблемы термодинамического расчёта приводных газотурбинных двигателей, работающих на природном газе. Предложен алгоритм термодинамического вычисления на основе π - h - T функций с точным учётом изменения теплофизических параметров рабочего тела для любого состава топливного газа.

Ключевые слова: газотурбинный привод, газоперекачивающий агрегат, природный газ, расчётная модель, теплофизические параметры

Термодинамический расчет является обязательным первоначальным этапом проектирования любого газотурбинного двигателя (ГТД). На момент проектирования достаточно просто расчет тепловых двигателей производить с использованием математических моделей процессов цикла, исходя из постоянства термодинамических свойств рабочего тела. Для точного определения параметров цикла невозможно использовать модели процессов на основе молекулярно-кинетической теории идеальных газов. Достоверность расчетов, как показал анализ используемых методов [3, 5, 6], может быть обеспечена только при учёте зависимости параметров веществ, участвующих в расчётных моделях, от температуры. Характер изменения теплофизических параметров рабочего тела ГТД имеет достаточно сложную зависимость от температуры, не поддающуюся линейной аппроксимации. Рассчитать энтальпию, работу процессов сжатия и расширения можно 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 π - h - T -функций [5]:

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

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

В работе [5] приведен краткий алгоритм термодинамического расчёта авиационных ГТД с учётом зависимости свойств воздуха и продуктов сгорания авиационного топлива стандартного состава (керосина Т-1, Т-2) от температуры. Алгоритмы, приведенные в работах [1, 5] для термодинамического анализа газотурбинных двигателей достаточно сложны. Ещё более сложной задачей является анализ циклов ГТД при их работе на природном газе с произвольным составом, зависящим от места его добычи. Для газотурбинного двигателя наземного применения в качестве привода газоперекачивающего агрегата, топливом является транспортируемый по газопроводу природный газ. Используемое топливо не имеет постоянного химического состава, содержание метана CH_4 различно в зависимости от месторождения (до 99%), остальную часть представляют предельные углеводороды (этан, пропан, бутан, пентан) и примеси азота, серы, углекислого газа, иногда сероводорода, водорода. Этот факт, в первую очередь, влияет на состав смеси продуктов сгорания, на коэффициент избытка воздуха α в газозооушной смеси и на показатели эффективности привода. Особенность состава рабочего тела ГТД – существенное влияние на его термодинамические свойства коэффициента избытка воздуха α и переменности теплоемкости воздуха и продуктов сгорания в диапазоне рабочих значений

Тян Владимир Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Трубопроводный транспорт». E-mail: v_k_tyan@mail.ru
Гулина Светлана Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Трубопроводный транспорт». E-mail: kr_oeg@mail.ru
Орлова Гульсина Махматовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Трубопроводный транспорт». E-mail: g.m.orlova@yandex.ru

давлений и температур. Используя химико-физические данные компонентов газовой смеси по ГОСТ 31369-2008, в таблице 1 приведены рассчитанные теплофизические показатели

низшей теплоты сгорания топлива H_u^{nc} и стехиометрического коэффициента L_0 .

Таблица 1. Теплофизические показатели газового топлива

Газовое топливо (месторождение)	CH ₄	Др. угле- ле- вод.	CO	CO ₂	N ₂	H ₂ S	H ₂ O	H ₂	O ₂	H_u^{nc} МДж/кг	L_0 , м ³ /м ³
водород 100%										111,667	2,380
метан 100%										46,602	9,520
Ямбург	8,2	1,12			0,67				0,01	46,183	9,523
Вуктылское	81,8	12,84		0,30	5,06					43,432	10,325
Оренбургское	84,6	5,05		1,30	9,05					41,638	9,080
Покровское	65,3	8,4		0,30	26,0					34,101	8,002
Сухой отбенз. газ	92,7	4,7		0,8	1,7				0,1	45,245	9,868
био газ	71,7	-		24,1	4,1	0,1				33,428	6,833
попутный нефтяной газ	40	50	5,0	1	4					32,072	11,353
доменный газ	0,1	-	30,1	10	55,1		2,3	2,2		5,335	0,778

В зависимости от месторождения природного газа за счёт различного содержания примесей и тяжелых углеводородов изменяются значения параметров H_u^{nc} и L_0 . Так, для газа из месторождения Вуктылское по отношению к метану CH₄=100% происходит снижение H_u^{nc} , и рост L_0 , а для газа из месторождения Покровское снижаются значения и H_u^{nc} и L_0 . Эти показатели определяют значение коэффициента избытка воздуха α для термодинамического цикла ГТД (при равных параметрах цикла: температуры перед турбиной T_T^* и степени повышения давления в компрессоре π_Σ^*). Необходимость учета переменности свойств воздуха и продуктов сгорания в процессе термодинамических расчетов циклов очевидна, отсутствие учёта изменения свойств рабочего тела от температуры и коэффициента избытка воздуха дает ошибку в вычислениях от 5% и более [3].

Для проведения инженерных термодинамических расчетов ГТД оказалось необходимым и целесообразным создание алгоритма определения теплофизических свойств рабочего тела, используя теплофизические свойства компонентов газовой смеси: воздуха и продуктов сгорания газообразного топлива. Для этого потребовалось создание массивов с данными параметров смеси произвольных составов газов:

1) термодинамических свойств компонентов газового топлива (C_mH_n; H₂S; CO₂; O₂; CO; H₂; H₂O; N₂), имеющего конкретный объемный состав в зависимости от месторождения;

2) продуктов сгорания газообразного топлива (N₂, CO₂, O₂, H₂O), объемный состав которого рассчитывается;

3) воздуха.

Для использования точных данных по теплофизическим свойствам рабочего тела и применения их в инженерных термодинамических расчетах по рекомендациям [1, 2] теплофизические параметры определяют в виде аппроксимирующего полинома шестого порядка в зависимости от температуры рабочего тела с интервалом в 1°C в диапазоне для воздуха от -60°C до 1850°C, для продуктов сгорания от 650°C до 1850°C:

$$\mu c_p = \sum_{n=-1}^{n=7} a_n^c \left(\frac{T}{1000} \right)^n,$$

$$\mu h = \sum_{n=0}^{n=8} a_n^h \left(\frac{T}{1000} \right)^n + b_h \ln \frac{T}{1000},$$

$$\mu s^0 = \sum_{n=-1}^{n=7} a_n^s \left(\frac{T}{1000} \right)^n + b_s \ln \frac{T}{1000}$$

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

Достоверная точность разработанного алгоритма обеспечена при учете зависимости теплофизических параметров рабочего тела от температуры в цикле и конкретного состава природного газа. Оценивая теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1м³ газа, по данным [1],

$$L_0 = \frac{1}{21} \left[0,5H_2 - O_2 + 0,5CO + \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 1,5H_2S \right],$$

рассчитываются теплофизические параметры компонентов смеси продуктов сгорания газового топлива, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$:

$$\mu h_{\alpha=1} = \mu h(CO_2) \cdot r(CO_2) + \mu h(N_2) \cdot r(N_2) + \mu h(H_2O) \cdot r(H_2O), \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}};$$

$$(lg\pi_0)_{\alpha=1} = lg\pi_0(CO_2) \cdot r(CO_2) + lg\pi_0(H_2O) \cdot r(H_2O) + lg\pi_0(N_2) \cdot r(N_2).$$

Дополнительно рассчитываются теплоемкость $c_p(T)$, показатель изоэнтропы $k(T)$, газовая постоянная $R(T)$ и вместе со значениями энтальпии μh и логарифма относительного давления $lg\pi_0$ для продуктов сгорания, при $\alpha=1$ и для воздуха при $\alpha=\infty$, табулируются в функции температуры в среде пакета «Microsoft Excel» с шагом в 1°C . Для остальных значений коэффициента избытка воздуха α определяется объемная доля воздуха r_g в продуктах сгорания, которую принимаем в качестве параметра, определяющего теплофизические свойства рабочего тела ГТД с учетом влажности воздуха на входе в двигатель:

$$r_g = \left[1 - \frac{V^0}{V^0 + \left(L_0 + \frac{0,124L_0 d_g}{100} \right) (\alpha - 1)} \right] 100\%.$$

где: V^0 – суммарный объем продуктов сгорания, d_g – влагосодержание.

Зависимость объемной доли воздуха r_g от коэффициента избытка воздуха при ($\alpha=1 \dots \infty$) для природного газа месторождения Ямбург приведена на рис. 1.

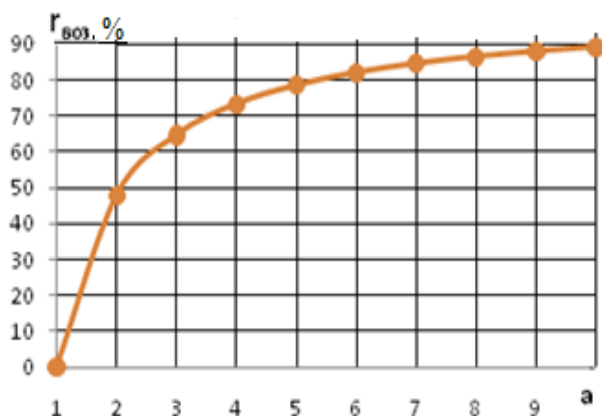


Рис. 1. Зависимость объемной доли воздуха r_g от коэффициента избытка воздуха α (для природного газа месторождения Ямбург)

В соответствии с рекомендациями [6] молекулярная масса продуктов сгорания для любого содержания воздуха в продуктах сгорания табулируется с помощью линейной интерполяции, значения энтальпии и логарифма относительного давления данной смеси определяется также линейной интерполяцией между значениями при $\alpha=1$ и $\alpha=\infty$, что соответствует $r_g=0$ и $r_g=100\%$:

$$\mu h_{1\text{см}} = \mu h_g + (\mu h_{\alpha=1} - \mu h_g)(1 - r_g),$$

$$\pi_{0\text{см}} = \pi_{0g} + (\pi_{0\alpha=1} - \pi_{0g})(1 - r_g).$$

Используемая модель процесса и разработанная программа расчета теплофизических параметров рабочего тела позволили получить графические зависимости, приведенные на рис. 2, азовой постоянной для водорода, природного газа и попутного нефтяного газа при температуре перед турбиной $T_T^* = 1350 \text{ K}$. Увеличение работоспособности рабочего тела определяется газовой постоянной R . Расчеты показали, что изменение R при переходе с водорода на попутный нефтяной газ при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$ составляет 12%, а для смеси с $\alpha=2-5$ составляет в среднем 5%.

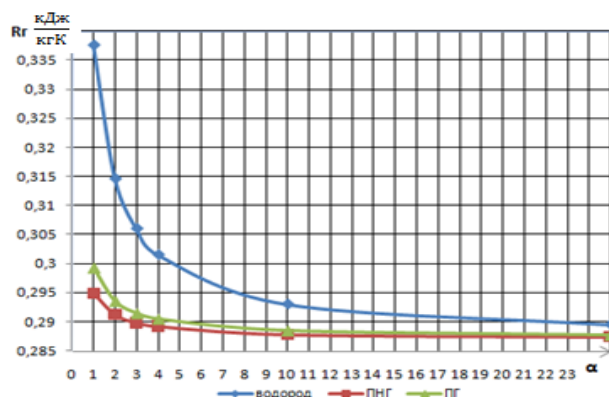


Рис. 2. Зависимость R для водорода, природного газа (ПГ) и попутного нефтяного газа (ПНГ) при температуре перед турбиной 1350 К

Для различных составов природного газа с содержанием метана в диапазоне от 98% до 84% при $\alpha=1$ изменение газовой постоянной достигает 7%, а для более бедных смесей снижается до 2%. Результаты расчетов показали, что изменение показателя адиабаты k для продуктов сгорания различных типов газообразного топлива не превышает 1,5%. На рис. 3 приведены зависимости относительного давления π_i и удельной энтальпии h от температуры. Данные параметры используются для термодинамического расчета ГТД наземного применения. В качестве топлива принят состав природного газа по ГОСТ 23194-83.

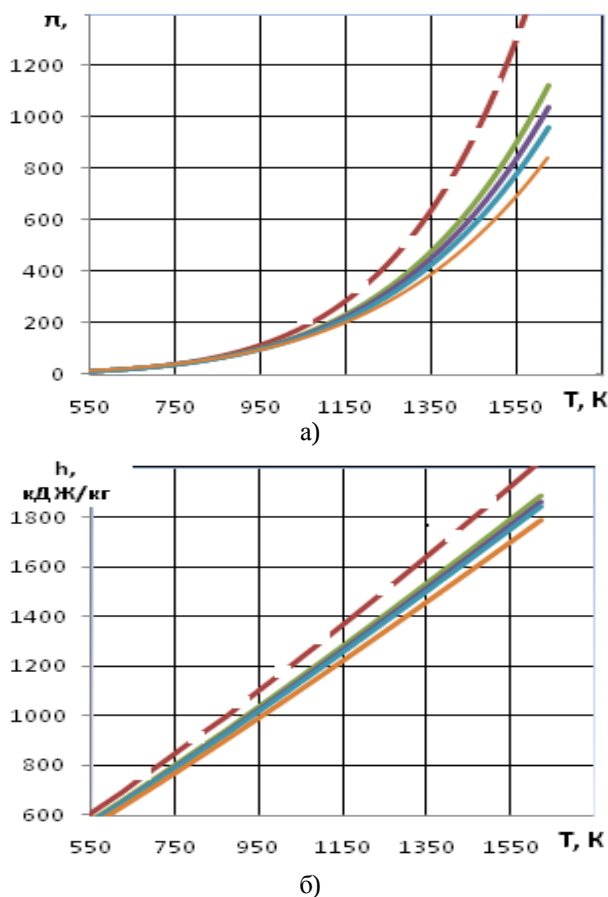


Рис. 3. Зависимости а) $\pi_i = f(T)$ и б) $h = f(T)$ при различных значениях α :

— $\alpha=1$ — $\alpha=2,5$ — $\alpha=3,5$ — $\alpha=5$ — воздух

Для рассчитанных термодинамических параметров смеси продуктов сгорания газового топлива применена равномерная шкала температур T с интервалом в 1° и неравномерные шкалы энтальпий $h(T)$ и относительных давлений $\pi(T)$. Эти шкалы равноправны с точки зрения рассмотрения их в качестве аргумента или функции. В среде пакета «Microsoft Excel» с помощью функции «Просмотр» искомое значение, (рассчитанный или заданный в ходе термодинамического расчета параметр), определяется в массиве рассчитанных термодинамических параметров рабочего тела, которые задаются в аргументе «просматриваемый вектор». Функция «Просмотр» выбирает в массиве искомое наибольшее значение, которое меньше искомого значения или равно ему и возвращает его в термодинамический расчет цикла. Так, по значению имеющегося аргумента определяются искомые параметры. По рассчитанному значению энтальпии h находится температура в цикле T или относительное давление π_i , и наоборот.

Для правильной работы программы массивы, в которых производится просмотр, отсортированы в возрастающем порядке. Форма массива позволяет просматривать искомое значение из

списка рассчитанного параметра в строке или столбце указанного аргумента, находить указанное значение и возвращать значение из аналогичной позиции столбца или строки искомого параметра. Погрешность определения искомого значения составляет 0,01%. Использование уточненных значений теплофизических параметров рабочего тела позволяет выполнять термодинамический расчет цикла двигателей, работающих на топливном газе любого состава. Расчет цикла можно выполнить для любого диапазона температуры окружающей среды. Использование разработанного алгоритма термодинамического расчета не требует дополнительных итерационных расчетов с целью получения достоверных значений термодинамических параметров ГТД. Алгоритм расчета приведен на рис. 4.

Значения термодинамических параметров рабочего тела для процессов с воздухом (сжатие в компрессорах или подогрев в теплообменнике при наличии регенерации теплоты уходящих газов) определяются по рассчитанным значениям для воздуха, а для процессов в турбине по значениям для продуктов сгорания с учетом коэффициента избытка воздуха α в процессе сгорания топлива. Алгоритм и программа расчета параметров ГТД разработаны с использованием одного из самых распространенных расчетных инструментов – электронных таблиц EXCEL, входящих в пакет программ стандартного Microsoft Office. Это самый доступный вычислительный инструмент, что облегчает инженерные расчеты, и позволяет легко корректировать данные и автоматически исправляет все результаты расчета и их графическое представление.

Выводы: установлено, что уточненное определение теплофизических свойств рабочего тела (конкретного состава топлива) влияет на точность рассчитанных параметров эффективности цикла. Для термодинамического расчета была использована математическая модель расчета параметров цикла на основе разработанного алгоритма уточненного определения параметров рабочего тела для продуктов сгорания топливного газа определенного состава, которая позволяет учесть существенное влияние на термодинамические свойства рабочего тела коэффициента избытка воздуха в процессах сгорания топлива и переменность теплоемкости воздуха и продуктов сгорания в диапазоне рабочих значений температур, с учетом влажности воздуха на входе в двигатель. Использование данной программы позволяет выполнять термодинамический расчет цикла как для вновь создаваемых двигателей, так и для двигателей находящихся в эксплуатации, топливом для которых является газ. В настоящее

время программа доведена до конечного вида и готова к использованию. С её помощью выполнены многочисленные вариантные расчёты известных ГТД (НК-12СТ, НК-14СТ, НК-16СТ,

НК-38СТ, АЛ-31СТ и др.) было получено хорошее совпадение результатов расчётов с паспортными данными ГТД и с результатами натурных испытаний.

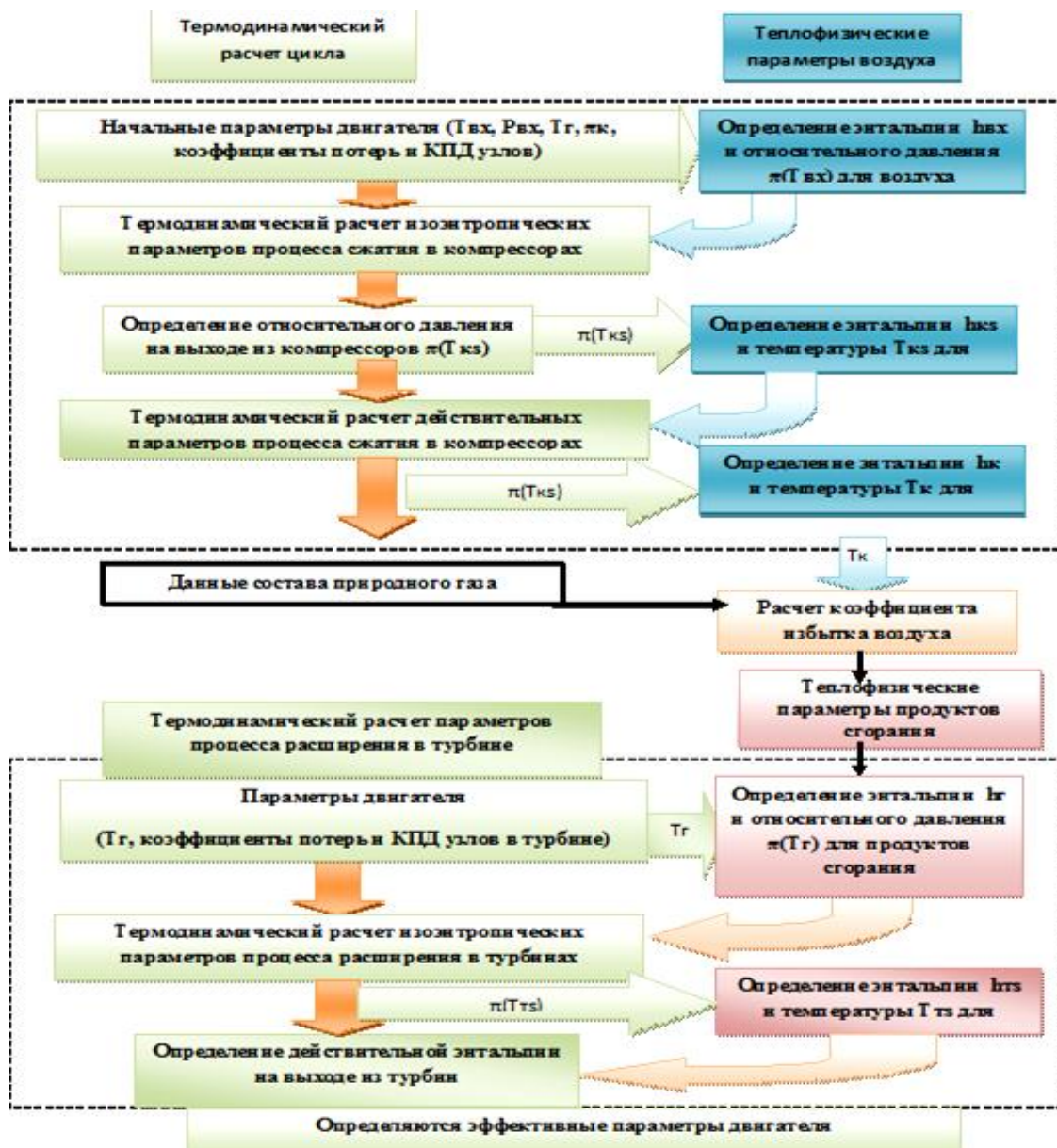


Рис. 4. Алгоритм термодинамического расчета, основанный на уточненном определении теплофизических параметров рабочего тела

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Михеенков, Е.Л. Проведение термодинамических расчётов с учётом переменности свойств рабочего тела / Е.Л. Михеенков, М.Ю. Орлов и др. // Известия 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 / С.А. Гулина, М.Ю. Орлов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. №3 (часть 3). С.28-34.
3. Акимов, В.М. Теория и расчёт воздушно-реактивных двигателей / В.М. Акимов, В.И. Бакулев, Р.И. Курзинер – М.: Машиностроение, 1987. 568 с.
4. Жаров, Г.Г. Судовые высоко-температурные газотурбинные установки / Г.Г. Жаров, Л.С. Венцюлис. – Л.: Судостроение, 1973. 359 с.
5. Дорофеев, В.М. Термогазодинамический расчёт газотурбинных силовых установок / В.М. Дорофеев, В.Г. Маслов, Н.В. Первышин. – М.: Машиностроение, 1973. 144 с.
6. Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства газов. Справочник: в 2 т. – М. Энергоиздат, 1987. 288 с.

MODELING THE THERMODYNAMIC PROCESS IN GAS-TURBINE ENGINES FOR ANALYSIS THE CHARACTERISTICS OF GAS-TURBINE DRIVES AT GAS-DISTRIBUTING UNITS

© 2014 V.K. Tyan, S.A. Gulina, G.M. Orlova

Samara State Technical University

In article problems of thermodynamic calculation of driving gas-turbine engines working at natural gas are considered. The algorithm of thermodynamic calculation on a basis of π -h-T-functions with the exact accounting the change of thermophysical parameters of a working body for any composition of fuel gas is offered.

Key words: *gas-turbine drive, gas-distributing unit, natural gas, calculating model, thermophysical parameters*

Vladimir Tyan, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department "Pipelines Transport". E-mail: v_k_tyan@mail.ru
Svetlana Gulina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Pipelines Transport". E-mail: kr_oeg@mail.ru
Gulsina Orlova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Pipelines Transport". E-mail: g.m.orlova@yandex.ru