

Энергетика

УДК 62-631.2:665.65

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБИННЫХ ПРИВОДОВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

С.А. Гулина, А.С. Гулина

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: kr_oeg@mail.ru

Рассмотрен вопрос термодинамического расчета характеристик приводных газотурбинных двигателей (ГТД) газоперекачивающих агрегатов (ГПА) компрессорных станций магистральных газопроводов, работающих на природном газе. Разработана математическая модель определения теплофизических параметров продуктов сгорания для природного газа ряда месторождений с различным компонентным составом. Предложен новый алгоритм и программа термодинамического расчета, применимая как для определения характеристик новых типов газотурбинных двигателей, так и для мониторинга показателей двигателей, эксплуатируемых на газопроводах с переменным составом топливного газа.

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

В настоящее время газовое топливо широко используется в наземных газотурбинных установках. Для получения достоверных термодинамических и эксплуатационных характеристик ГПА необходим учет влияния состава сжигаемого топливного газа. Приближенные расчеты их характеристик обычно производятся с использованием математических моделей, предусматривающих постоянство компонентного состава природного газа. Для точного определения параметров цикла невозможно использовать модели процессов на основе молекулярно-кинетической теории идеальных газов. Как показал анализ используемых методов расчета характеристик ГТД [1, 5], их достоверность в расчетных моделях может быть обеспечена только при учете температуры атмосферного воздуха, фактического состава топливного газа и температуры при его сжигании. Необходимость учета переменности теплофизических свойств воздуха и продуктов сгорания в процессе термодинамических расчетов циклов достаточно очевидна, поскольку неучет в расчетах изменения свойств рабочего тела, его зависимости от температуры и величины коэффициента избытка воздуха α в камере сгорания дает ошибку в вычислениях более 5 % [5].

Расчеты параметров ГТД значительно усложняются при их работе на при-

Светлана Анатольевна Гулина (к.т.н.), доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».

Анастасия Сергеевна Гулина, студентка.

родном газе произвольного состава, зависящем от места его добычи. Как правило, используемый в них топливный газ не имеет постоянного химического состава: так, например, содержание в нем метана CH_4 для различных месторождений изменяется от 80 до 99 % при переменном составе остальных компонентов – предельных углеводородов (этан, пропан, бутан, пентан), примесей азота, серы, углекислого газа, сероводорода и водорода. Соответственно этому изменяется состав продуктов сгорания, коэффициент избытка воздуха α , мощность Ne и экономичность двигателя. Особенность состава рабочего тела ГТД определяет его термодинамические свойства, зависящие от переменности теплоемкости воздуха и продуктов сгорания, в диапазоне рабочих значений давлений и температур. Для различных составов природного газа (в зависимости от месторождения) определены химико-физические данные компонентов газовой смеси и рассчитано теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 м^3 газа (стехиометрический коэффициент):

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

Вышеуказанные данные сведены в таблицу.

Теплофизические показатели газового топлива

Газовое топливо (месторождение)	CH_4	Др. углевод.	CO	CO_2	N_2	H_2O	H_2	O_2	H_u^{nc} , мДж/кг	L_0 , $\text{м}^3/\text{м}^3$
Водород 100 %									111,667	2,380
Метан 100 %									46,602	9,520
Ямбург	98,2	1,12			0,67			0,01	46,183	9,523
Вуктылское	81,8	12,84		0,3	5,06				43,432	10,325
Оренбургское	84,6	5,05		1,3	9,05				41,638	9,080
Покровское	65,3	8,4		0,3	26,0				34,101	8,002
Сухой отбенз. газ	92,7	4,7		0,8	1,7			0,1	45,245	9,868
Биогаз	71,7	–		24,1	4,1				33,428	6,833
ПНГ	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 счет различного содержания примесей и тяжелых углеводородов теплота его продуктов сгорания H_u^{nc} изменяется в среднем на 27 %, а стехиометрический коэффициент L_0 – на 22 %. Эти показатели определяют значение коэффициента избытка воздуха α для тер-

модинамического цикла ГТД. Поэтому для проведения инженерных термодинамических расчетов ГТД оказалось необходимым и целесообразным создать программу определения теплофизических свойств рабочего тела, учитывающую характеристику и компонентный состав газа и продуктов его сгорания. В этой программе использованы широко применяемые на практике электронные таблицы Excel с включенными в них массивами данных для любого состава топливного газа. Они включают характеристики компонентов газового топлива (C_mH_n ; H_2S ; CO_2 ; O_2 ; CO ; H_2 ; H_2O ; N_2), продуктов сгорания газообразного топлива (N_2 , CO_2 , O_2 , H_2O) и воздуха.

Теплофизические параметры продуктов сгорания и воздуха (C_p – теплоемкость, S^0 – энтропия, H – энтальпия) определялись по зависимостям, рекомендованными авторами [2], в виде аппроксимирующего полинома шестого порядка:

$$\begin{aligned}\mu c_p &= C_p = \sum_{n=-1}^{n=7} a_n^{c_p} \left(\frac{T}{1000} \right)^n; \\ \mu h &= H = \sum_{n=1}^{n=8} a_n^h \left(\frac{T}{1000} \right)^n + b_h \ln \frac{T}{1000}; \\ \mu s^0 &= S^0 = \sum_{n=-1}^{n=7} a_n^s \left(\frac{T}{1000} \right)^n + b_s \ln \frac{T}{1000},\end{aligned}$$

где α_j – коэффициенты соответствующих полиномов, приводятся в [2]; 1000 – масштабный коэффициент.

Для воздуха расчеты проводятся в диапазоне температур от -25 до 1650 °С, для продуктов сгорания – от 650 до 1650 °С. Теплофизические параметры компонентов смеси продуктов сгорания (энтальпия μh и логарифм относительного давления $\lg \pi_0$) при их стехиометрическом составе (коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$) рассчитывается по формуле

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

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

где r – объемная доля компонента, %.

Дополнительно рассчитываются показатель изоэнтропы $k(T)$ и газовая постоянная $R(T)$. Для остальных значений коэффициента избытка воздуха $\alpha > 1$ определяется объемная доля воздуха в продуктах сгорания r_e с учетом влажности воздуха на входе в двигатель:

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

где V^0 – суммарный объем продуктов сгорания; d_e – влагосодержание.

Зависимость объемной доли воздуха r_e от коэффициента избытка воздуха при α от 1 до ∞ для природного газа месторождения Ямбург приведена на рис. 1.

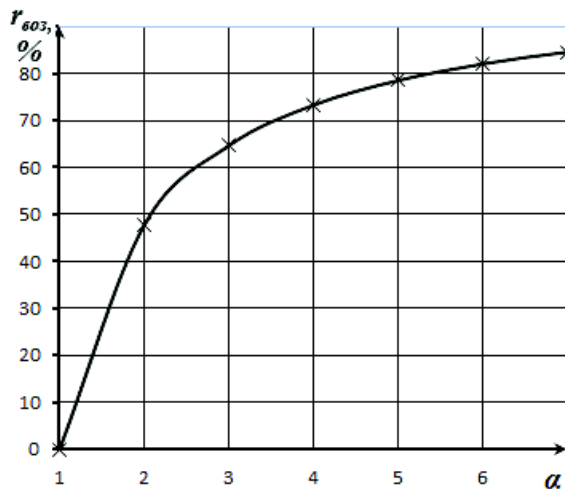


Рис. 1. Зависимость объемной доли воздуха r_g от коэффициента избытка воздуха α (для природного газа месторождения Ямбург)

В соответствии с рекомендациями [2] молекулярная масса продуктов сгорания для любого содержания воздуха в продуктах сгорания табулируется с помощью линейной интерполяции, значения энтальпии $\mu h_{1c.m}$ и относительного давления $\pi_{0c.m}$ данной смеси определяется линейной интерполяцией между значениями при $\alpha = 1$ и $\alpha = \infty$, что соответствует $r_g = 0\%$ и $r_g = 100\%$:

$$\mu h_{1c.m} = \mu h_g + (\mu h_{\alpha=1} - \mu h_g)(1 - r_g); \quad \pi_{0c.m} = \pi_{0g} + (\pi_{0\alpha=1} - \pi_{0g})(1 - r_g).$$

Все рассчитанные параметры для продуктов сгорания и воздуха табулируются в функции температуры с шагом в 1°C . Для рассчитанных термодинамических параметров смеси продуктов сгорания газового топлива применена равномерная шкала температур T с интервалом в 1°C 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 цикла параметр) определяется в массиве аргумента «Просматриваемый вектор». Форма массива позволяет просматривать искомое значение из списка рассчитанного параметра в строке или столбце указанного аргумента, находит указанное значение и возвращает значение из аналогичной позиции столбца или строки искомого параметра. По значению имеющегося аргумента, допустим рассчитанному значению энтальпии h , находится искомый параметр – температура в цикле T или относительное давление π_i , или наоборот. Погрешность определения искомого значения составляет $0,01\%$.

Используемая модель теплового процесса и разработанная программа позволяют рассчитывать теплофизические параметры рабочего тела для любого состава топливного газа и автоматически использовать их при проведении теплового расчета двигателя.

Модель теплового процесса ГТД составлена на основе объединенного закона термодинамики:

$$dq = TdS = c_p dT - vdP,$$

где dq – изменение теплоты в цикле;

dS – изменение энтропии в цикле при сохранении условия зависимости c_p от температуры.

Авторы [4] предлагают связь между температурой и давлением в изоэнтروпическом процессе сжатия или расширения определять в виде отношения

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\pi(T_2)}{\pi(T_1)} \right), \text{ где функция } \pi(T_1) = \pi(T_0) e^{\frac{S_{P1} - S_{P0}}{R}},$$

где S_{P0} , S_{P1} – значение энтропии при соответствующих давлениях.

Термодинамическая функция $\pi(T)$, являющаяся относительным давлением, зависит только от одного термодинамического параметра – температуры T . Параметр относительного давления определяется для условий изоэнтропического процесса. Для изоэнтропического процесса

$$\ln \pi_0 = \frac{\mu S^0}{\mu R} \text{ и } \lg \pi_0 = \frac{S^0}{\mu R} \lg e,$$

где e – основание натурального логарифма;

$$\mu R = 8,3142 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \text{ – мольная газовая постоянная.}$$

Энтропия определяется:

$$S^0 = \frac{\mu R}{\lg e} \ln \pi_0. \quad (1)$$

Для изоэнтропического процесса имеем:

$$0 = \mu R \ln \frac{P_2}{P_1} + S_{2S}^0 + S_1^0, \quad (2)$$

где S_{2S}^0 – значение S^0 при температуре газа, соответствующей концу изоэнтропического процесса;

S_1^0 – значение S^0 при температуре газа, соответствующей началу изоэнтропического процесса.

Для реального процесса, протекающего при тех же давлениях P_1 и P_2 и той же начальной температуре,

$$S_2 - S_1 = \mu R \ln \frac{P_2}{P_1} + S_2^0 + S_1^0, \quad (3)$$

где S_2^0 – значение S^0 при температуре газа, соответствующей концу реального процесса.

Вычитая из уравнения (2) уравнение (3), получаем

$$S_2 - S_1 = S_2^0 + S_{2S}^0,$$

т. е. изменение энтропии в реальном процессе равно разности значений S^0 , соответствующих температурам газа в конце реального и изоэнтропического процессов (при одинаковом отношении давлений). Последнее равенство после подстановки значений S^0 из уравнения (1) примет вид

$$S_2 - S_1 = \mu R \lg \pi_0 (\lg \pi_{02} - \lg \pi_{02S}), \quad (4)$$

т. е. изменение энтропии определяется через значения логарифма относительного давления.

Изменение энтальпии с учетом зависимости c_p от температуры T определится:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_0}^{T_1} c_p \frac{dT}{T} - \int_{T_0}^{T_2} c_p \frac{dT}{T}, \quad (5)$$

относительное давление:

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

Использование уточненных значений теплофизических параметров рабочего тела (энтальпий $h(T)$, относительного давления $\pi_{is}(T)$) позволяет выполнять термодинамический расчет цикла двигателей, работающих на топливном газе любого состава. Разработанная модель по сравнению с существующими моделями позволяет более детально учесть переменность теплофизических свойств рабочего тела в зависимости от процентного содержания основных компонентов и примесей.

На базе разработанной математической модели для определения термодинамических показателей ГТД составлен алгоритм термодинамического расчета двигателя для газообразного топлива произвольного состава (рис. 2).

Расчет цикла можно выполнить для любого диапазона температуры окружающей среды. Использование разработанного алгоритма термодинамического расчета не требует дополнительных итерационных расчетов, достоверные значения термодинамических параметров ГТД получаются за счет введения точных составов топливного газа. Алгоритм и программа расчета параметров ГТД разработаны с использованием самого доступного вычислительного расчетного инструмента Excel, стандартного Microsoft Office, что облегчает инженерные расчеты и позволяет корректировать исходные данные.

Использование данной программы позволяет выполнять термодинамический расчет цикла для вновь создаваемых двигателей с целью получения оптимальных параметров цикла для конкретных условий эксплуатации.

Оценка адекватности созданной программы термодинамического расчета ГТД проведена на основе экспериментального исследования газотурбинного двигателя MS 5002B, работающего на природном газе в составе газоперекачивающего агрегата ГТК-25И. Выполнено сравнение результатов расчета мощности с использованием разработанной модели и программы (тепловой способ) с результатами измерения мощности ГТД с помощью торсионного вала и с результатами определения мощности на муфте «ГТУ – нагнетатель» по производительности приводимого нагнетателя в соответствии с ГОСТ 20440 (эксплуатационный метод).

Теплотехнические измерения проводились на трех режимах, характеризующихся различными оборотами свободной турбины. Состав природного газа, его теплофизические свойства представлены специализированной лабораторией. На основе результатов построена графическая зависимость полного давления за турбиной высокого давления (ТВД) от оборотов силового вала (рис. 3). Для трех режимов нанесены точки, соответствующие измеренному давлению и давлению, рассчитанному по вышеизложенному алгоритму и программе.

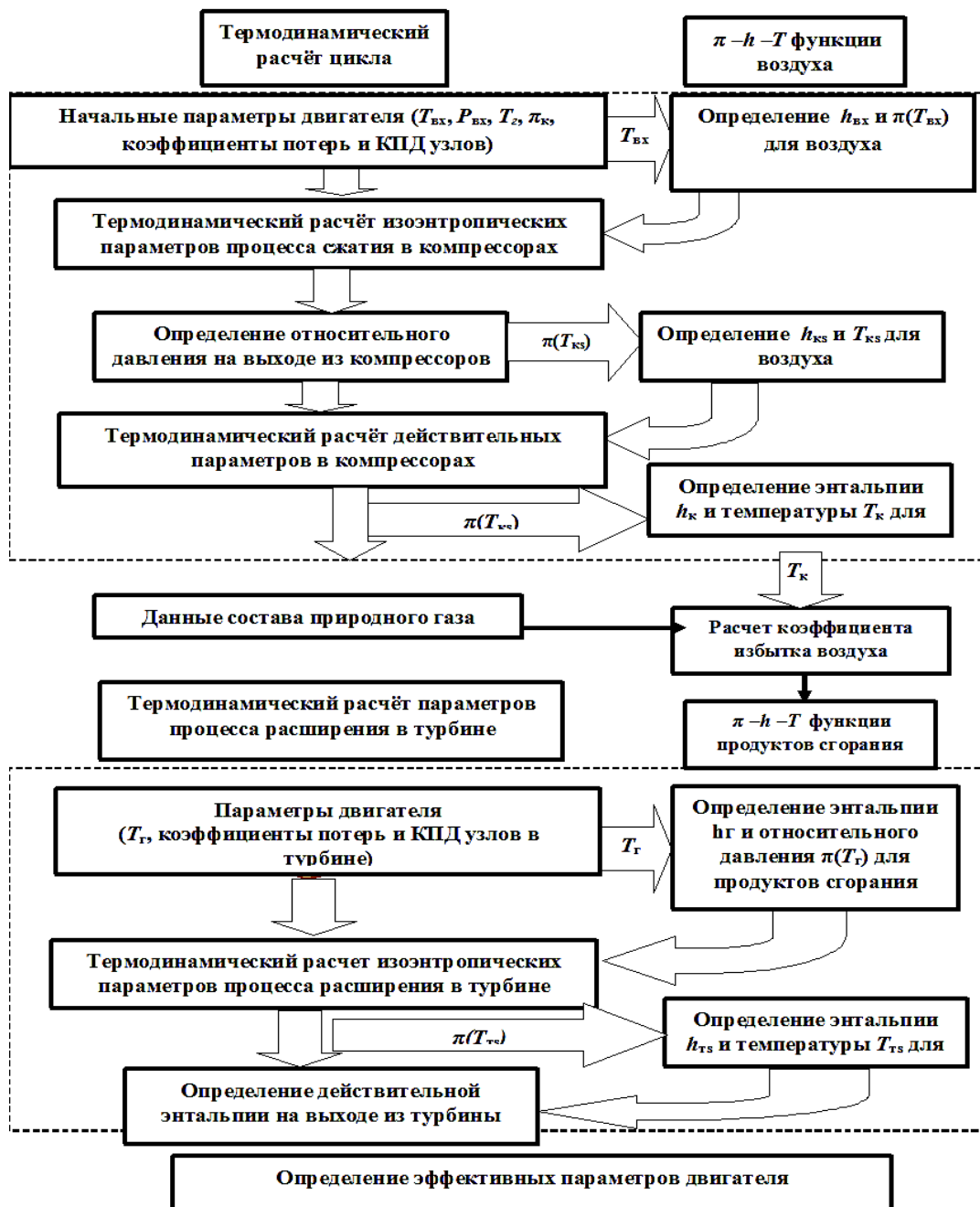


Рис. 2. Алгоритм термодинамического расчета, основанный на уточненном определении теплофизических параметров рабочего тела

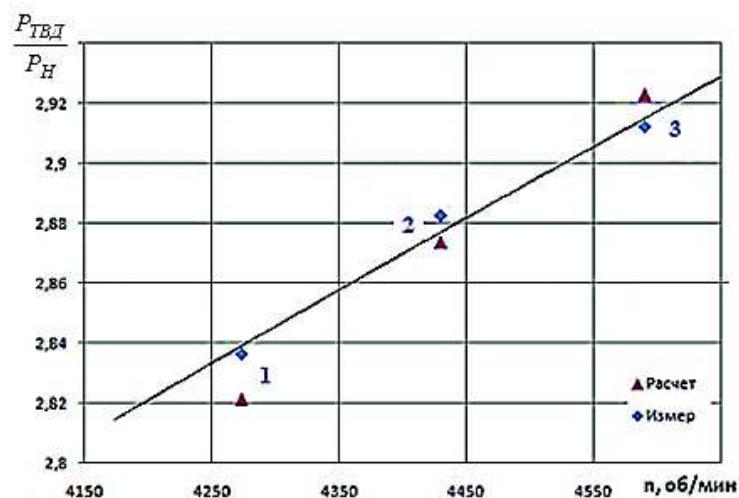


Рис. 3. Зависимость давления за ТВД на 3 режимах

Расхождение между величинами давления составляет не более 1 %. Расхождение между результатами мощности, определенной вышеуказанными способами, составляет от 0,5 до 1,8 % для всех режимов работы ГТД.

С помощью разработанной программы выполнены многочисленные варианты расчетов известных ГТД (НК-12СТ, НК-14СТ, НК-16СТ, НК-38СТ, АЛ-31СТ и др.), эксплуатируемых на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Результаты термодинамического расчета близки к показателям их паспортных данных. При этом было установлено, что изменение удельного расхода топлива при эксплуатации ГТД в зависимости от содержания метана в топливном газе составило в среднем 12 %.

Разработанная методика и программа термодинамического расчета параметров ГТД может быть применена для вновь создаваемых двигателей с возможностью определения оптимальных параметров цикла в конкретных условиях их эксплуатации. Также методика и программа применимы для мониторинга характеристик приводных ГТД, находящихся в эксплуатации на компрессорных станциях газопроводов, с определением их мощности во всем диапазоне рабочих режимов, с использованием штатных средств измерения. Это позволяет реализовать инженерные мероприятия и планировать работу этих двигателей в режимах, позволяющих повысить их эффективность.

При этом получены следующие результаты:

1. Создана математическая модель учета теплофизических параметров продуктов сгорания топливного газа, которая обеспечивает получение более точных данных показателей эффективности ГТД.

2. Разработанные алгоритм и программа уточненного определения теплофизических параметров рабочего тела ГТД в широком диапазоне составов топливного газа могут быть использованы в случаях адаптации ГТД к различным видам газового топлива – природного, попутного, доменного газа, биогаза.

3. Рассчитанные значения показателей эффективности ГТД хорошо согласуются с экспериментальными данными за счет учета точного состава топливного газа, что позволяет выполнять термодинамический расчет цикла как для вновь

создаваемых двигателей, так и для двигателей, находящихся в эксплуатации.

Разработанная программа термодинамического расчета ГТД реализована в самом распространенном расчетном инструменте Excel и может практически применяться инженерами – разработчиками ГТД, инженерами компрессорных станций магистральных газопроводов и студента вузов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Михеенков Е.Л.* Проведение термодинамических расчетов с учетом переменности свойств рабочего тела / Михеенков Е.Л., Бирюк В.В., Орлов М.Ю. и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск. – 2008. – С. 59-66.
2. *Ривкин С.Л.* Термодинамические свойства газов. Справочник: в 2 т. – М.: Энергоиздат, 1987. – 288 с.
3. *Гулина С.А.* Упрощение термодинамических расчетов тепловых машин путем использования модели идеальных газов / Гулина С.А., Орлов М.Ю. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – № 3. – Ч. 3. – С. 28-34.
4. *Дорофеев В.М.* Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок / Дорофеев В.М., Маслов В.Г., Первышин Н.В. – М.: Машиностроение, 1973. – 144 с.
5. *Гулина С.А.* Моделирование термодинамического процесса газотурбинных двигателей для анализа характеристик газотурбинных приводов газоперекачивающих агрегатов / Гулина С.А., Тянь В.К., Орлова Г.М. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 1 (2). – С. 578-584.

Статья поступила в редакцию 23 сентября 2015 г.

THE APPLICATION OF THERMODYNAMIC CALCULATION FOR THE MONITORING OF THE CHARACTERISTICS OF GAS-DISTRIBUTING-UNIT GAS-TURBINE DRIVES

S.A. Gulina, A.S. Gulina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

The paper discusses the question of thermodynamic calculation of drive gas-turbine engines (GTE) working on natural gas for gas-distributing units (GPU) of compressor stations of the gas-trunk pipeline compressor stations. A mathematical model of the determination of combustion-products heat-physical characteristics is developed for various-composition natural gas of a number of gas fields. A new algorithm and thermodynamic-calculation program which is applicable both for the determination of the new-type GTE characteristics and for the monitoring of the parameters of engines operating on variable-composition fuel gas pipelines.

Keywords: *gas turbine drive, gas transmittal unit, natural gas, the calculation model, the thermodynamic analysis, the cycle work, exergy.*

*Svetlana A. Gulina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Anastasiya S. Gulina, Student.*