

УДК 621. 438

**Расчет показателей процесса сгорания углеводородного топлива произвольного
элементного состава в камере сгорания газотурбинной установки**

Д.А. Скибин

Студент, кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

*Научный руководитель: Иванов В.Л., к.т.н., доцент кафедры «Газотурбинные и
нетрадиционные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Skatuser@gmail.com

Для расчета параметров термодинамического цикла газотурбинной установки открытого цикла необходимо знать показатель адиабаты и теплоемкость рабочего тела лопаточных машин. Рабочим телом компрессора ГТУ открытого цикла является атмосферный воздух, а рабочим телом турбины являются продукты сгорания углеводородного топлива. Теплоемкость при постоянном давлении C_p и теплоемкость при постоянном объеме C_v воздуха в функции температуры представлены в справочной литературе. Показатель адиабаты процесса повышения давления воздуха в компрессоре зависит от температуры и определяется на основе упомянутых выше теплоемкостей процесса. Более сложно решается вопрос об аналогичных параметрах процесса расширения продуктов сгорания в газовой турбине, поскольку и теплоемкость, и показатель адиабаты процесса расширения зависят не только от температуры, но и от фракционного состава продуктов сгорания. В общем случае продукты сгорания являются смесью газов CO , CO_2 , SO_2 , NO_x , H_2O , O_2 , N_2 . Фракционный состав продуктов сгорания зависит от элементного или фракционного состава исходного углеводородного топлива, а также степени полноты процесса сгорания. Теоретическая температура полного сгорания

зависит от теплоты сгорания топлива, а также от температуры компонентов (топливо и воздух), поступающих в камеру сгорания. Действительная температура продуктов сгорания за камерой сгорания на входе в турбину ниже теоретической и назначается проектным заданием в зависимости от применяемых в газовой турбине высокотемпературных материалов и способа охлаждения лопаток турбины. Так, например, теоретическая температура при сжигании авиационного керосина может достигать величины порядка 2500К, а реальная температура перед турбиной современных энергетических ГТУ не превышает 1700К [1]. Для понижения температуры продуктов сгорания до проектного уровня они смешиваются с воздухом, поступающим от компрессора в зону смешения камеры сгорания. Реальный состав рабочего тела газовой турбины-смеси продуктов сгорания с дополнительно вводимым воздухом зависит не только от элементного состава исходного топлива, но и дополнительной массы воздуха, поступающего в зону смешения. Следовательно, состав реальных продуктов сгорания, теплоемкость и показатель адиабаты процесса расширения для каждого конкретного случая подлежат индивидуальным расчетам. При известном фракционном составе теплоемкость и показатель адиабаты можно определить по известным зависимостям для газовой смеси, используя справочные данные[2] по зависимостям теплоемкостей от температуры для каждой фракции входящей в газовую смесь.

Основным топливом для современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) является авиационный керосин, для транспортных ГТД – керосин или дизельное топливо, мазут, для газотурбинных установок (ГТУ) газокompрессорных станций магистральных газопроводов – природный газ, для энергетических ГТУ – природный газ или мазут. Широко используемые топлива стандартизованы, их элементный состав стабилен, для них могут быть рассчитаны исчерпывающие показатели процесса сгорания, необходимые для расчета как процесса расширения в газовой турбине, так и коэффициента полезного действия (КПД) ГТД или ГТУ. Для пояснения дальнейшей логики построения расчетной программы необходимо обратиться к следующим зависимостям:

Мощность ГТУ простого цикла

$$N_e = C_{p2} T_{\Gamma} \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{\frac{K_{\Gamma}-1}{K_{\Gamma}}}} \right) \eta_T G_{\Gamma} - C_{p2} T_a \left(\frac{\pi_K^{\frac{K_B-1}{K_B}} - 1}{\eta_K} \right) G_B, \quad (1)$$

Удельная мощность

$$N_{y\partial} = \frac{N_e}{G_B} = C_{p2} T_{\Gamma} \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{\frac{K_{\Gamma}-1}{K_{\Gamma}}}} \right) \eta_T \frac{G_{\Gamma}}{G_B} - C_{p2} T_a \left(\frac{\pi_K^{\frac{K_B-1}{K_B}} - 1}{\eta_K} \right), \quad (2)$$

КПД ГТУ

$$\eta_e = \frac{N_e}{Q_H^P \eta_{CT} G_T} = \frac{N_{y\partial} G_B}{Q_H^P \eta_{CT} G_T} = \frac{N_{y\partial}}{Q_H^P \eta_{CT} g_1}, \quad (3)$$

где T_a - температура перед компрессором, T_{Γ} - температура перед турбиной, π_K - степень повышения давления в компрессоре, π_T - степень понижения давления в турбине, C_{p2} - теплоемкость воздуха в процессе повышения давления, C_{p1} - теплоемкость продуктов сгорания в процессе расширения в турбине, K_B - показатель адиабаты процесса повышения давления воздуха, K_{Γ} - показатель адиабаты процесса понижения давления продуктов сгорания в турбине, G_B и G_{Γ} - массовый расход воздуха через компрессор и массовый расход продуктов сгорания через турбину соответственно, η_K - КПД процесса повышения давления воздуха в компрессоре, η_T - КПД процесса расширения продуктов сгорания в турбине, $N_{y\partial}$ - удельная мощность ГТУ, η_{CT} - КПД процесса сгорания (коэффициент полноты сгорания), Q_H^P - Дж/кг - низшая теплота сгорания топлива, G_T , кг/с - расход топлива, g_1 - относительный расход топлива.

Наиболее ответственной частью расчета является определение КПД ГТУ, что в большей степени связано с правильным определением относительного расхода топлива. Этот вопрос подробно рассмотрен в работе В.Е. Михальцева [3] в которой для определения относительного расхода топлива предложена зависимость

$$g_T = \frac{C_{p2} T_{\Gamma} - C_{p2} T_B - (C_{p20} T_0 - C_{p20} T_0)}{Q_H^P \eta_{CT} - (C_{p2} T_{\Gamma} - C_{p20} T_0) + (C_{p1} T_{\Gamma} - C_{p1} T_0)}, \quad (4)$$

где C_{p1} - средняя удельная теплоемкость продуктов сгорания при температуре T_{Γ} - сгорания газа за камерой сгорания (на входе в турбину), C_{p2} - средняя удельная теплоемкость воздуха на входе в камеру сгорания при температуре T_K воздуха на входе в камеру сгорания, C_{p10} - средняя удельная теплоемкость продуктов сгорания при температуре T_0 , C_{p20} - средняя удельная теплоемкость воздуха при температуре T_0 , C_{p1} - средняя удельная теплоемкость топлива при температуре T_T , T_0 - стандартная температура, при которой определена низшая теплота сгорания топлива, T_T - температура, при которой топливо поступает в камеру сгорания.

Входящие в (4) средняя удельная теплоемкость воздуха, средняя удельная теплоемкость широко используемых стандартизованных марок топлива принимаются по справочным данным [2]. Средняя удельная теплоемкость продуктов сгорания зависит от фракционного состава продуктов сгорания, представляющих собой смесь чистых продуктов сгорания (результат процесса полного сгорания топлива при теоретически необходимой для его сгорания массой воздуха) и избыточного воздуха.

Теоретически необходимая масса воздуха для полного сгорания 1 кг топлива (так называемый стехиометрический коэффициент) определяется зависимостью

$$L_0 = 1149C^P + 34.48H^P + 4.31(S^P - O^P), \frac{кг}{кг}, \quad (5)$$

где C^P , H^P , S^P , O^P -массовые доли углерода, водорода, серы, кислорода соответственно в рабочей массе топлива. Действительный расход воздуха через камеру сгорания превышает теоретически необходимый и характеризуется коэффициентом избытка воздуха α . В зависимости от типа топлива, температуры компонентов на входе в камеру сгорания, температуры за камерой сгорания коэффициент избытка воздуха может изменяться в широких пределах.

Для используемых стандартизованных топлив низшая теплота сгорания и стехиометрический коэффициент являются величинами известными. Пример некоторых из них представлен в таблице 1.[4]

Таблица 1

Низшая теплота сгорания и стехиометрический коэффициент топлива

№ п/п	Топливо	Низшая теплота сгорания , кДж/кг	Стехиометрический коэффициент кг/кг
1.	Природный газ саратовский	46900	16,34
2.	Природный газ ставропольский	48900	16,85
3.	Газ подземной газификации	3600	0,995
4.	Бензин	43750	14,91
5.	Керосин авиационный Т-1, ТС-1	43000	14,61
6.	Дистиллят	41030	13,82

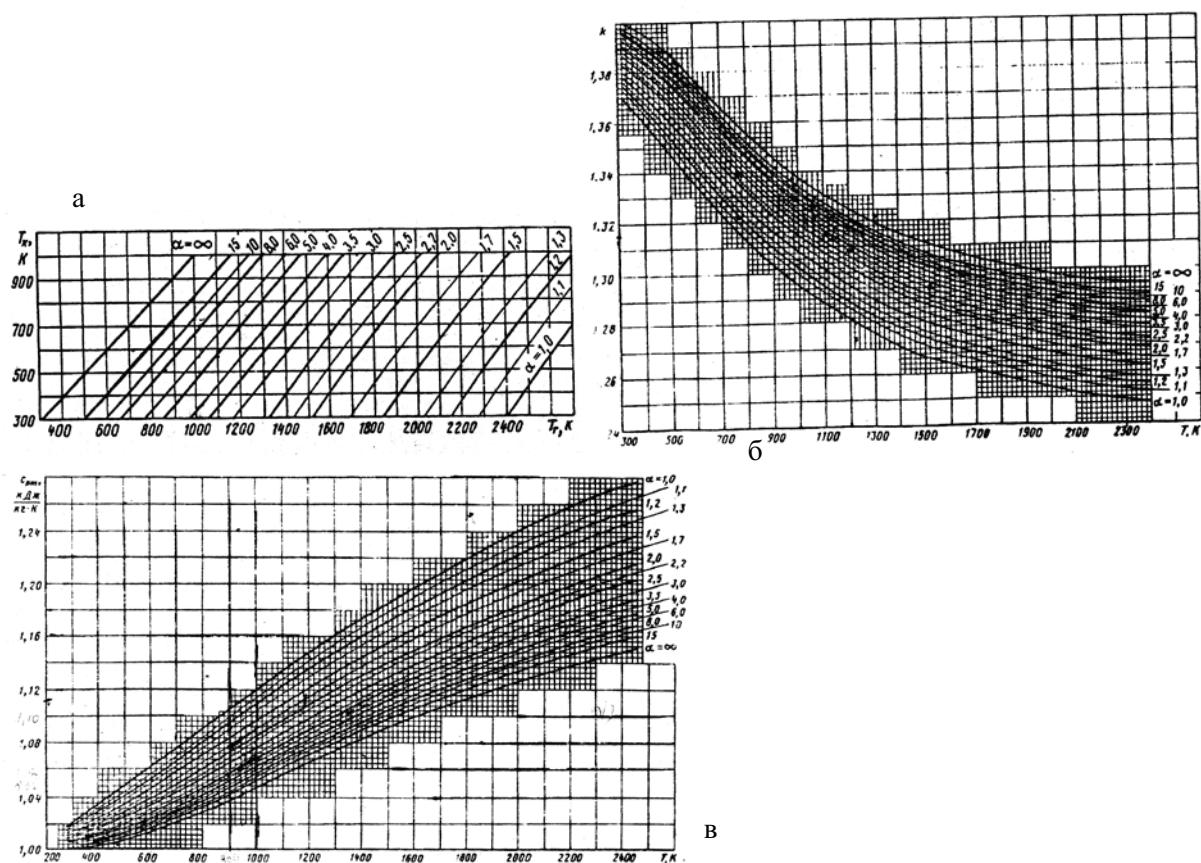


Рис.1. Показатели продуктов сгорания керосина при $T_T=288\text{ K}$

- а. Зависимость α от $T_{\text{В}}$ и T_{Γ}
- б. Зависимость C_p от T_{Γ} и α
- в. Зависимость k_{Γ} от T_{Γ} и α

Для некоторых из стандартных топлив необходимые для расчета мощности и экономичности ГТУ, упомянутые выше расчетные показатели в табулированной или графической форме, удобных для использования при практических расчетах ГТУ, представлены в литературе. Например, диаграмма для определения коэффициента избытка воздуха камеры сгорания ГТУ (топливо – авиационный керосин, температура впрыска топлива в камеру сгорания 288 K), теплоемкость C^p продуктов сгорания и показатель адиабаты k представлены на рис. 1б и 1в, соответственно.[5].

Для топлива нестандартного элементного состава теплота сгорания, коэффициент избытка воздуха, теплоемкость топлива и продуктов сгорания требуют индивидуального определения. Сложность расчетной процедуры заключается в том, что состав продуктов сгорания зависит не только от компонентов чистых продуктов сгорания, но и массы

избыточного воздуха, определяемого значением коэффициента избытка воздуха и стехиометрическим коэффициентом, значение последнего можно определить только на основании решения уравнения (4). Современные программы энергосбережения и рационального использования топливных ресурсов включают в себя все большее вовлечение в сферу энергетики различных видов твердого топлива, попутных горячих газов, продуктов газификации, твердых бытовых и промышленных отходов. Характерной особенностью низкосортных малокалорийных топлив является низкое значение стехиометрического коэффициента L_0 , величина которого может быть $L_0 < 1.0$. Соответственно, масса продуктов сгорания может вдвое превысить массовый расход воздуха, поступающего в камеру сгорания. Работы кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки» последнего периода [5],[6], связанные с энергосбережением и утилизацией вторичных энергоресурсов выявили настоятельную необходимость разработки комплексной программы расчета процесса сгорания. Такое характерное соотношение масс воздуха и продуктов сгорания требует аккуратного расчета всех показателей процесса сгорания. Для снижения трудоемкости подобных расчетов создана комплексная программа, позволяющая в рамках единого расчетного комплекса определять теплотемкость, показатель адиабаты, коэффициент избытка воздуха, относительный расход топлива, необходимые для расчета КПД и мощности ГТУ, в камере сгорания которой сжигается любой вид углеводородного топлива, при любых температурных условиях на входе и выходе камеры сгорания при любой температуре топлива, поступающей в камеру сгорания. Основной блок расчетной программы строится на использовании следующих зависимостей.

- низшая теплота сгорания(по формуле Д.И. Менделеева) ;

$$Q_H^P = 4,19 \left[8100C^P + 2800 \left(H^P - \frac{O^P}{8} \right) + 2500S^P - 600W^P \right], \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

- теоретически необходимый массовый расход воздуха через камеру сгорания при заданной величине массового расхода топлива G_T

$$G_B = L_0 G_T \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

- избыточный массовый расход воздуха через камеру сгорания

$$G_{BH} = (\alpha - 1) G_T, \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

-полный массовый расход воздуха через камеру сгорания

$$G_B = \alpha L_0 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

- объемный состав чистых продуктов сгорания при полном сжигании 1 кг топлива (коэффициент избытка воздуха равен единице)

$$V_{CO_2} = 1.85C^P \text{ нм}^3; V_{SO_2} = 0.681S^P \text{ нм}^3; V_{H_2O} = 11.2H^P + 1.24W^P \text{ нм}^3;$$

$$V_{N_2} = 0.92L_0 + 0.8N^P \text{ нм}^3; V_{\Sigma} = \sum_1^4 V_i, \text{ нм}^3 - \text{полный объем чистых продуктов сгорания.}$$

или в объемных долях

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{\Sigma}}; r_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{\Sigma}}; r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{\Sigma}}; r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{\Sigma}}$$

В приведенных выше расчетных зависимостях приняты следующие обозначения: $[Q_n^P, \text{Дж/кг}]$ – низшая теплота сгорания; L_0 , кг воздуха/ кг. топлива; α – коэффициент избытка воздуха; C^P , H^P , S^P , O^P , W^P , N^P – массовые доли углерода, водорода, серы, кислорода, влаги, азота в рабочей массе топлива соответственно; V – объем чистых продуктов сгорания 1кг топлива, $\text{нм}^3/\text{кг}$; V_{CO_2} , V_{SO_2} , V_{H_2O} , V_{N_2} -- объем компонентов в чистых продуктах сгорания. нм^3 ; r_i объемные доли компонентов G_t , кг/с – массовый расход топлива

Теплоемкость чистых продуктов сгорания определяется как теплоемкость газовой смеси, состоящей из CO_2 , SO_2 , N_2 , H_2O . Удельная теплоемкость каждой компоненты при соответствующей температуре принимается по справочным данным [2]. Теплоемкость полного массового расхода продуктов сгорания определяется как теплоемкость смеси чистых продуктов сгорания и избыточного воздуха.

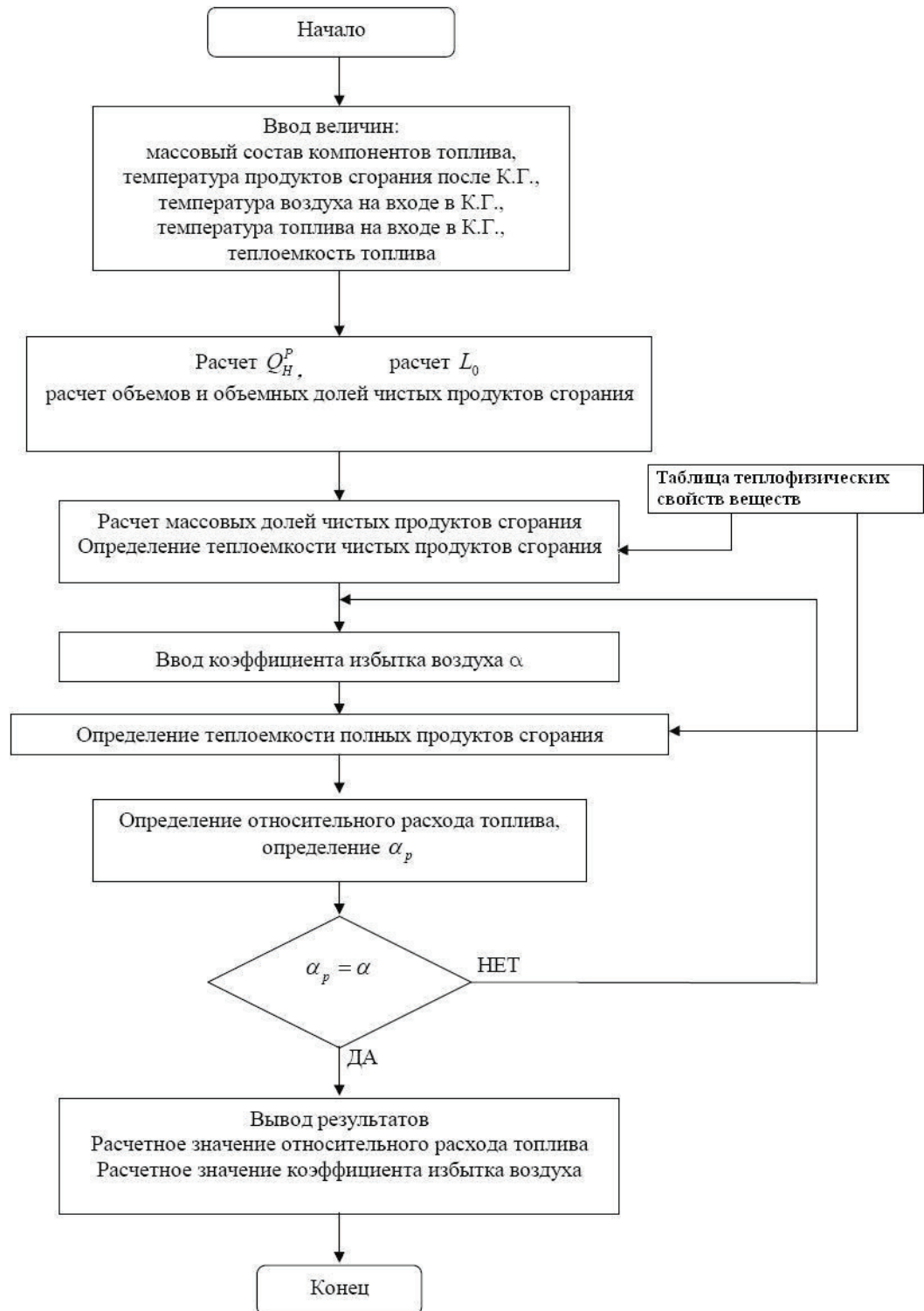


Рис.2. Блок-схема расчета показателей процесса сгорания углеводородного топлива произвольного элементного состава

Расчетная программа составлена в среде программирования «Делфи», которая позволяет написать отдельную программу, не требующую для своей работы ничего, кроме операционной системы. Блок-схема программы представлена на рис.2. Расчет полностью автоматизирован и требует лишь ввода первоначального значения коэффициента избытка воздуха. Это связано с тем, что для разного исходного состава топлива и разных

Молодежный научно-технический вестник ФС 77-51038

температурных условий численное значение. коэффициента избытка воздуха может значительно разниться. Поэтому для сокращения числа приближенной принято целесообразным использовать «ручной» ввод коэффициента избытка воздуха первого приближения.

В качестве примера в таблице 2 приведены результаты расчета параметров процесса сгорания генераторного газа, полученного в результате процесса газификации ТБО, при температуре генераторного газа на входе в камеру сгорания $T_T = 293 \text{ K}$.

Таблица 2

Результаты расчета процесса сгорания генераторного газа

Состав генераторного газа	$g_{H_2} = 0.01332$; $g_{CH_4} = 0.01298$; $g_{C_2H_4} = 0.01729$; $g_{CO} = 0.14496$; $g_{CO_2} = 0.22859$; $g_{N_2} = 0.59769$
Теплота сгорания $Q_H^P, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	4.523
Стехиометрический коэффициент L_0	1.291
$T_T = 1410 \text{ K}$ $T_B = 450 \text{ K}$	$\alpha = 2.0$; $g_T = 0.38729$; $C_{pT} = 1.174 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
$T_T = 1405 \text{ K}$ $T_B = 650 \text{ K}$	$\alpha = 2.5$; $g_T = 0.3098$; $C_{pT} = 1.165 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
$T_T = 1416 \text{ K}$ $T_B = 800 \text{ K}$	$\alpha = 3.0$; $g_T = 0.258$; $C_{pT} = 1.158 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Российская программа развития топливо – энергетического комплекса на перспективу до 2030 г. предусматривает все большее вовлечение в сферу народного хозяйства твердого топлива, в том числе низкосортного местного топлива, а также вторичных бытовых отходов коммунального хозяйства страны, вторичных отходов деревообрабатывающей и других отраслей промышленности.

Эффективным способом использования твердого топлива, особенно низкокалорийных высокозольных сортов является газификация с последующим использованием генераторного газа в качестве топлива в том числе для газотурбинных установок. Очевидно, что создавать фундаментальную расчетно-справочную базу для таких топлив практически невозможно. Соответственно требуется практически удобный инженерный

метод расчета основных показателей процесса сгорания топлива любого заданного элементного состава. Такой метод может быть полезным и для стандартных видов топлива, поскольку позволяет более точно (по сравнению с табличными или графическими данными) определить коэффициент избытка воздуха, теплоемкости и другие расчетные показатели, используемые при расчете мощности и экономичности ГТУ.

Список литературы

1. Бекнев В.С., Иванов В.Л. Возможный способ повышения мощности и экономичности стационарных комбинированных энергетических установок с газовыми турбинами. Теплоэнергетика, 2005г., №6. С. 23-27.
2. Варгафтик Н.В. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М. Физматгиз. 1963. 703 с.
3. Михальцев В.Е. К определению относительного расхода топлива в ГТУ. Известия ВУЗов СССР. Сер. машиностроение. 1963. №6. С. 114 – 122.
4. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Расчет цикла газотурбинной установки Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана 2000г. 31 с.
5. Иванов В.Л. Газотурбинный энергопреобразователь для установки утилизации твердых бытовых и промышленных отходов методом газификации. Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2012, №7. С. 134 – 144.
6. Тумашев Р.З. Бодров Н.Г. Когенерационная газотурбинная установка на попутных нефтяных газах с высоким содержанием тяжелых углеводородов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012, №7. С. 145 – 165.