

ОСОБЕННОСТИ УТИЛИЗАЦИИ КОКСОВОГО ГАЗА В ГАЗОТУРБИННОМ ЦИКЛЕ (НА ПРИМЕРЕ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»)

Антон Николаевич Бушуев¹, канд. техн. наук, доцент (bushuev.an@misis.ru)

¹ Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», г. Новотроицк, 462359. Россия

Аннотация. В статье проведено сравнение основных термодинамических показателей продуктов сгорания коксового газа предприятия АО «Уральская Сталь» с соответствующими показателями атмосферного воздуха. Показано, что продукты сгорания рассматриваемого коксового газа и его смеси с природным газом при большинстве термодинамических расчетов могут рассматриваться как воздух, что позволяет сравнивать особенности работы ГТУ на различных видах топлива. Представлены зависимости и графики температуры горения смеси коксового и природного газов при различных объемных долях компонентов от показателя избытка воздуха при горении. Рассмотрены интервалы значений энтальпии продуктов сгорания смеси коксового и природного газов при избытке воздуха и проведено сравнение энтальпий для двух вариантов газовой смеси. Показано, что сжигание газовой смеси на основе коксового газа рассматриваемого состава в камере сгорания ГТУ теоретически может обеспечить стабильную работу турбины на уровне задаваемой мощности.

Ключевые слова: газотурбинная установка, коксовый газ, коксохимическое производство, продукты сгорания, температура горения, термодинамические параметры

FEATURES OF COKE GAS UTILIZATION IN THE GAS TURBINE CYCLE (ON THE EXAMPLE OF URAL STEEL JSC)

Anton N. Bushuev¹

¹ Novotroitskiy branch of the National Research Technological University «MISIS», Novotroitsk. Russia

Abstract. The article compares the main thermodynamic parameters of coke gas combustion products of the Ural Steel JSC enterprise with the corresponding atmospheric air indicators. It is shown that the combustion products of the coke gas in question and its mixture with natural gas can be considered as air in most thermodynamic calculations, which makes it possible to compare the characteristics of gas turbine engine operation on different types of fuels. The dependencies and graphs of the combustion temperature of the mixture of coke and natural gas with various volumetric fractions of the components from the indicator of excess air during burning are presented. The ranges of enthalpy values of combustion products of a mixture of coke and natural gases with an excess of air are considered and the enthalpy values for two variants of the gas mixture are compared. It is shown that the combustion of a gas mixture based on coke oven gas of the considered composition in the combustion chamber of a gas turbine engine can theoretically ensure stable operation of the turbine at the level of the specified power.

Keywords: gas turbine installation, coke oven gas, coke chemical production, combustion products, combustion temperature, thermodynamic parameters

Коксохимическое производство, часто являющееся частью крупных металлургических комбинатов страны, сегодня остается серьезным загрязнителем окружающей среды. Определенная доля сбросного коксового газа подвергается очистке с получением полезных продуктов, часть возвращается обратно в коксовые батареи и избыток, как правило, подается на утилизацию [1, 2]. Сегодня утилизация этого газа подразумевается, как

правило, в паротурбинном цикле путем сжигания за счет горючих элементов и соединений (H_2 , CH_4 , CO) в его составе.

Сырьем для коксохимического производства металлургического комбината АО «Уральская Сталь» (г. Новотроицк) является уголь Карагандинского и Кузнецкого угольных бассейнов. Усредненный химический состав коксового газа предприятия приведен в табл. 1.

Таблица 1. Показатели коксового газа на АО «Уральская Сталь» за 2023 г.

Удельный вес, кг/м ³	Массовые доли элементов, %							
	C ₂ H ₆	CO ₂	C _m H _n	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
0,444	0,53	2,1	1,63	1,0	6,85	58,3	21,75	7,85

Таблица 2. Объемы в продуктах сгорания коксового газа при избытке воздуха, м³/м³

Газ (компонент)	Коэффициент избытка воздуха α				
	1,5	1,8	2,2	2,5	2,8
N ₂	12,38	14,81	18,05	20,49	22,92
RO ₂	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466
H ₂ O	3,057	3,107	3,173	3,223	3,272
O ₂	1,232	1,971	2,957	3,696	4,435
Итого	18,13	21,35	25,65	28,87	32,10

Теоретически необходимый объем воздуха V_0 для сжигания газообразного топлива и объемы соответствующих компонентов (N₂, RO₂ и H₂O) в продуктах сгорания топлива рассчитывают по формулам [3, 4, 5]:

$$V_0 = 0,0476[0,5(H_2 + CO) + 1,5H_2S + 2CH_4 - O_2 + \Sigma(m + n/4)C_mH_n];$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79V_0 + 0,01N_2;$$

$$V_{RO_2} = 0,01(\Sigma mC_mH_n + H_2S + SO_2 + CO_2 + CO);$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01(H_2S + H_2 + \Sigma(n/2)C_mH_n + 0,124d_{г.т.а.}) + 0,161V_0,$$

где $d_{г.т.а.}$ – влагосодержание топлива, г/кг.

Таблица 3. Отношения показателей продуктов сгорания коксового газа к соответствующим показателям воздуха

Температура, °C	Отношения показателей			
	$c_{p_{пс}}^{кр} / c_{p_{в}}$	$c_{v_{пс}}^{кр} / c_{v_{в}}$	$k_{пс}^{кр} / k_{в}$	$h_{пс}^{кр} / h_{в}$
0 с	0,9994	1,0084	0,9899	0,9841
100	1,0095	1,0229	0,9869	0,9897
300	1,0190	1,0352	0,9867	0,9985
500	1,0243	1,0414	0,9868	1,0047
800	1,0298	1,0475	0,9864	1,0113
1000	1,0327	1,0508	0,9861	1,0147
1300	1,0355	1,0537	0,9860	1,0187
1500	1,0360	1,0541	0,9861	1,0208
Среднее	1,0258	1,0425	0,9866	1,0076

Расчетные объемы компонентов в продуктах сгорания коксового газа рассматриваемого состава в зависимости от показателя объемного избытка воздуха α приведены в табл. 2.

Теплота сгорания коксового газа предприятия АО «Уральская Сталь» согласно расчетам по усредненному составу [3] составляет ~16230 кДж/м³ или 34340 кДж/кг.

Учитывая факт удобства расчета большинства термодинамических циклов под атмосферный воздух, как рабочее тело, актуально проведение оценки разности термодинамических свойств воздуха и продуктов сгорания коксового газа или его смеси с природным газом [3, 5, 6]. В табл. 3 приведено сравнение основных термодинамических показателей воздуха и продуктов сгорания коксового газа рассматриваемого состава без избытка воздуха. Здесь $c_{p_{пс}}^{кр}$, $c_{v_{пс}}^{кр}$, $k_{пс}^{кр}$, $h_{пс}^{кр}$ – изобарная и изохорная теплоемкость, показатель адиабаты и энтальпия продуктов сгорания коксового газа соответственно, $c_{p_{в}}$, $c_{v_{в}}$, $k_{в}$, $h_{в}$ – соответствующие термодинамические показатели атмосферного воздуха. Расчет проводили по теплофизическим свойствам компонентов продуктов сгорания [6, 7].

Как видно из табл. 3, продукты сгорания коксового газа при большинстве термодинамических расчетов за счет малой разницы теплофизических свойств могут быть заменены воздухом, что удобно при сравнении особенностей работы ГТУ на различных видах топлива. В качестве расчетного топлива рационально также рассмотреть вариант смеси коксового газа с природным, используемым для обогащения и повышения теплоты сгорания.

Химический состав, выражаемый в объемных долях отдельных элементов, может быть определен по объемным долям самих газов в смеси. Объемы отдельных компонентов в топливной газовой смеси могут быть рассчитаны по формуле [3, 5, 6]:

$$V_a^{тс} = V_a^{прг} \cdot \alpha_{прг} + V_a^{кр}(1 - \alpha_{прг}),$$

где $\alpha_{прг}$ – объемная доля природного газа в топливной смеси; $V_a^{прг}$ – объем

компонента «а» в природном газе; $V_a^{кр}$ – объем компонента «а» в коксовом газе.

На основе полученных объемных долей компонентов в топливной смеси и в продуктах ее сгорания осуществлено сравнение основных термодинамических показателей с аналогичными для воздуха с целью оценки возможности рассмотрения продуктов сгорания как атмосферный воздух при термодинамических расчетах. Результаты сведены в табл. 4.

В случае рассмотрения продуктов сгорания топливного газа в качестве рабочего тела в газотурбинном цикле определяющими показателями являются прежде всего начальная температура и давление [3, 8, 9]. Температура горения газообразного топлива может быть рассчитана через тепловой баланс [3, 4]:

$$Q_H^p(1 - \eta) = C m (t - t_0),$$

где η – коэффициент общих тепловых потерь; t – температура горения, °C; t_0 – температура вносимого воздуха (смеси), °C; C – массовая теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(кг·°C); m – масса продуктов сгорания, кг.

Для горючей смеси с объемной долей коксового газа 0,3 полученная расчетная зависимость температуры горения от избытка воздуха α при тепловых потерях 10 % может быть записана через полином или степенную функцию:

$$t(\alpha) = -323,556\alpha^3 + 2248,571\alpha^2 - 5589,063\alpha + 5913,048;$$

$$t(\alpha) = 2202,037\alpha^{-0,9387}.$$

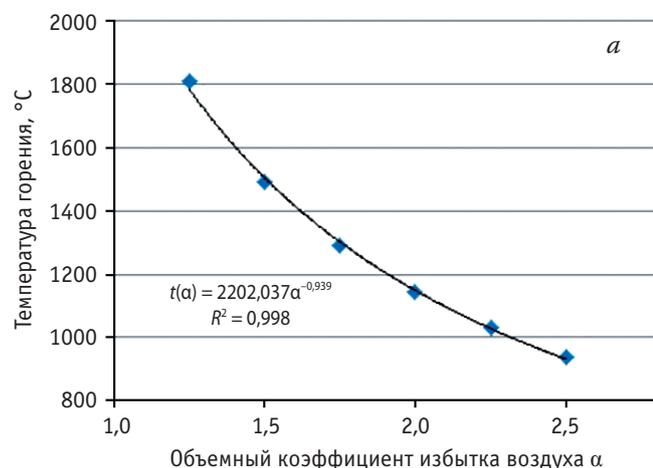


Таблица 4. Отношения показателей продуктов сгорания топливной смеси к значениям воздуха при объемной доле природного газа 0,5

Температура, °C	Отношения показателей			
	$c_{p_{пс}}^{кр} / c_{p_{в}}$	$c_{v_{пс}}^{кр} / c_{v_{в}}$	$k_{пс}^{кр} / k_{в}$	$h_{пс}^{кр} / h_{в}$
0	0,9941	1,0044	0,9897	0,9763
100	1,0063	1,0217	0,9849	0,9828
300	1,0183	1,0374	0,9815	0,9934
500	1,0246	1,0449	0,9806	1,0009
800	1,0305	1,0513	0,9802	1,0088
1000	1,0335	1,0546	0,9800	1,0127
1300	1,0363	1,0574	0,9800	1,0173
1500	1,0368	1,0577	0,9802	1,0197
Среднее	1,0256	1,0451	0,9813	1,0043

Для горючей смеси с объемной долей коксового газа 0,7 данный показатель аналогично может быть записан функциями:

$$t(\alpha) = -392,296\alpha^3 + 2687,810\alpha^2 - 6533,053\alpha + 6632,206;$$

$$t(\alpha) = 2315,434\alpha^{-0,961}.$$

Графики температур горения газовых смесей показаны на рисунке.

Как видно из графиков, полученная теоретическая температура горения несколько выше для газовой смеси с большей долей коксового газа исследуемого состава. Данный эффект наблюдается по причине значительно меньшего объема продуктов сгорания коксового газа на единицу его массы по сравнению с природным газом. Так, ко-

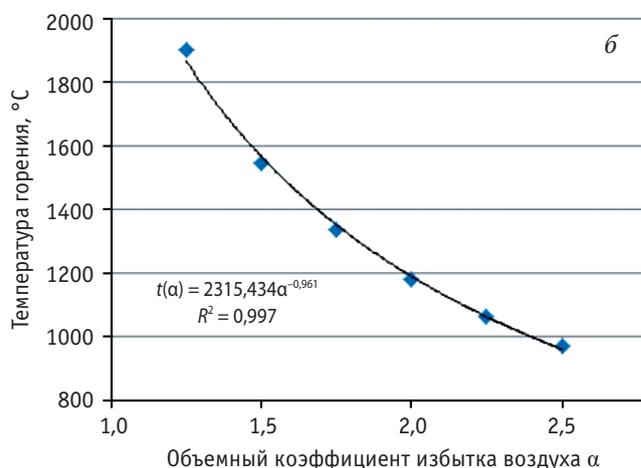


График зависимости температуры горения смеси коксового и природного газа от избытка воздуха а: а и б – для смеси с долей коксового газа соответственно 30 и 70 %

Таблица 5. Результаты расчета ГТУ со свободной турбиной 25000 кВт

Параметры	Значения при работе ГТУ	
	природный газ	газовая смесь
Коэффициент потерь полного давления в камере сгорания $\sigma_{\text{к}}$	0,98	
Коэффициент потерь полного давления во входном устройстве компрессора $\sigma_{\text{вх}}$	0,98	
Степень понижения полного давления в выходном устройстве $\pi_{\text{вых}}$	1,05	
Изоэнтروпийный КПД компрессора $\eta_{\text{к}}$	0,858	
Политропный КПД компрессора $\eta_{\text{пол}}$	0,9	
Коэффициент полноты сгорания $\eta_{\text{г}}$	0,99	
Температура газа перед турбиной $T_{\text{г}}$, °C	1200	
Относительный расход топлива $q_{\text{т}}$	0,0223	0,0245
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	44396	40784
Коэффициент избытка воздуха $\alpha_{\text{к}}$	3,197	3,227
Относительный отбор охлаждающего воздуха на конвективное охлаждение соплового аппарата $\delta_{\text{охлаСА}}$	0,0336	0,0336
Относительный отбор охлаждающего воздуха на конвективное охлаждение рабочих колес $\delta_{\text{охлаРК}}$	0,0	
Относительный отбор воздуха на охлаждение турбины компрессора $\delta_{\text{охла}}$	0,0336	0,0336
Секундный расход топлива на 1 кг воздуха, кг/с	0,0214	0,0234
Газовая постоянная газа $R_{\text{г}}$, Дж/(кг·°C)	287,69	287,74
Изобарная теплоемкость газа $C_{\text{пр}}$, кДж/(кг·°C)	1,263	1,268
Адиабата газа на входе в турбину $k_{\text{г}}$	1,295	1,294
Удельная работа турбины $L_{\text{т}}$, кДж	778,60	779,52
Температура «чистого» газа за турбиной $T_{\text{тчг}}$, °C	583,4	585,2
Расход газа за турбиной $G_{\text{тг}}$, кг	1,011	1,013
Температура газа за турбиной $T_{\text{г}}$, °C	576,7	578,4
Относительный расход топлива за турбиной $q_{\text{тт}}$	0,0216	0,0237
Газовая постоянная газа за турбиной $R_{\text{тт}}$	287,67	287,72
Эффективная удельная работа цикла на 1 кг воздуха $L_{\text{е}}$, кДж	352,78	355,20
Расход воздуха через двигатель $G_{\text{в}}$, кг/с	71,22	70,74
Фактический расход газа $G_{\text{г}}$, кг/с	71,98	71,63
Фактический секундный расход топлива $G_{\text{тг}}$, кг/с	1,52	1,658
Удельная работа ГТУ или удельная тяга $L_{\text{уд}}$, кВт/(кг/с)	352,78	355,20
Эффективный КПД газотурбинного двигателя $\eta_{\text{е}}$	0,372	0,372
Коэффициент полезной работы ϕ	0,464	0,466

личество продуктов сгорания природного газа без избытка воздуха лежит в пределах 10–11 м³/м³, для рассматриваемого коксового газа данный показатель составляет 4,62 м³/м³. При этом теплота сгорания коксового газа отличается в меньшей степени от аналогичного показателя для природного газа.

Большее значение для термодинамических расчетов двигателя и циклов имеет энтальпия рабочего тела (продуктов сгорания), отображающая

количество полезного тепла, вносимого в цикл. Упрощенно данный показатель можно представить через зависимость типа [3, 5]:

$$I = c_p m t,$$

где c_p – изобарная массовая теплоемкость рабочего тела, кДж/(кг·°C).

Согласно расчетам, данный показатель на 1 м³ топливной смеси с долей коксового газа 0,3 лежит в пределах 38610–39041 кДж при избытке воздуха

1,25–2,50, для смеси с долей коксового газа 0,7 аналогичный показатель составляет 35213–35621 кДж. Иными словами, несмотря на меньшую температуру горения, энтальпия продуктов сгорания более обогащенной смеси выше примерно на 9,6 %.

Проведенные расчеты и сравнение параметров продуктов сгорания коксового газа, его смеси с природным газом и воздуха позволяют выполнять тепловые расчеты газовых турбин на любом горючем газе, используя методику расчета для классического природного газа, являющегося базовым топливом для ГТУ. В табл. 5 приведены основные результаты сравнительного расчета простой ГТУ со свободной турбиной для режимов сжигания в камере сгорания природного газа и его смеси с коксовым газом с долей 0,5 [3, 8–10].

Как видно, сжигание газовой смеси на основе коксового газа рассматриваемого состава в камере сгорания ГТУ теоретически может обеспечить стабильную работу турбины на уровне задаваемой мощности. По причине меньшей плотности коксового газа и более низкой массовой теплоты сгорания его удельный расход в смеси превышает аналогичный показатель для чистого природного газа. Различия в других показателях работы ГТУ лежат в пределах $\leq 10\%$.

Также можно отметить, что практическая аналогия термодинамических параметров между воздухом и продуктами сгорания газовой смеси позволяет проводить сравнение режимов работы газовых турбин и указывает на возможность прямой утилизации коксового газа в камере сгорания ГТУ с выполнением определенных операций по его очистке. На основании полученных результатов и ранее проводимых исследований [11–13] можно утверждать, что перевод ГТУ на смесь коксового и природного газов допустим при определенных конструктивных доработках как самой силовой турбины, так и камеры сгорания [14].

Список источников

1. Кауфман А. А., Харлампович Г. Д. Технология коксохимического производства : уч. пособие. Екатеринбург : ВУХИН, 2005. 288 с.
2. Сабирова Т. М. Основы технологии улавливания и переработки химических продуктов коксования : уч. пособие / под ред. Н. А. Третьякова. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2018. 154 с.
3. Теплотехника : учебник / под общ. ред. А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. М. : МГТУ им. Баумана, 2018. 880 с.
4. Королев В. Н. Теория горения и взрыва : уч.-метод. пособие. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2021. 76 с.
5. Барилевич В. А., Смирнов Ю. А. Основы технической термодинамики и теории тепло- и массообмена : уч. пособие. М. : ИНФРА-М, 2022. 432 с.
6. Быков Н. В. Газовая динамика : уч. пособие. М. : МГТУ им. Баумана, 2020. 106 с.
7. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М. : Наука, 1972. 721 с.
8. Михайлов В. В., Пономарев В. А., Вятков В. В. Методика термогазодинамического расчета газотурбинных установок : уч. пособие. Рыбинск : РГАТУ им. П. А. Соловьева, 2019. 130 с.
9. Михальцев В. Е., Моляков В. Д. Теория и проектирование газовой турбины : уч. пособие / под ред. А. Ю. Вараксина. М. : МГТУ им. Баумана, 2020. 232 с.
10. Мингазов Б. Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей : конструкция, моделирование процессов и расчет : уч. пособие. Казань : Изд-во Казанского гос. техн. ун-та, 2006. 219 с.
11. Росляков А. Д., Кочеров Е. П., Цыбизов Ю. И. Возможность использования попутных газов в газотурбинных двигателях, созданных в рамках конверсии // Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та. 2011. № 3 (27). С. 248–252.
12. Шахуов Т. А., Куникеев Б. А. Анализ работы газотурбинной установки при изменении состава топлива // Черная металлургия: Бюл. НТИЭИ. 2018. № 5. С. 87–94.
13. Бакланов А. В., Неумоин С. П. Возможность использования коксового газа в конвертированных газотурбинных установках электро- и компрессорных станций // Газовая промышленность. 2019. № 3. С. 84–91.
14. Бакланов А. В. Управление процессом сжигания топлива путем изменения конструкции горелки в камере сгорания газотурбинного двигателя // Вестн. Московского авиационного ин-та. 2018. № 2. С. 73–85.

*Статья поступила в редакцию 14.08.2024;
одобрена после рецензирования 29.08.2024;
принята к публикации 14.10.2024*