

## ВОЗМОЖНОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ КОКСОВОГО ГАЗА АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ» В ГАЗОТУРБИННОМ ЦИКЛЕ

Бушуев А. Н.

«Новотроицкий филиал НИТУ МИСИС (г. Новотроицк, Россия)

Рассмотрены температурные зависимости основных термодинамических параметров продуктов сгорания коксового газа в газотурбинных агрегатах АО «Уральская Сталь». Представлена зависимость температуры горения коксового газа заданного состава от показателя избытка воздуха при горении. Проведено сравнение основных термодинамических показателей продуктов сгорания коксового газа с соответствующими показателями атмосферного воздуха. Показано, что при значениях объемного избытка воздуха более 1,5 в продуктах сгорания коксового газа АО «Уральская Сталь» их термодинамические параметры практически не отличаются от соответствующих показателей продуктов сгорания природного газа Оренбургского месторождения, что также указывает на возможность утилизации коксового газа в серийных ГТУ при определенных конструктивных корректировках.

**Ключевые слова:** газотурбинный агрегат, коксовый газ, коксохимическое производство, продукты сгорания, температура сгорания, термодинамические параметры.

Коксохимическое производство, нередко входящее в состав крупных металлургических комбинатов страны, по сей день остается серьезным загрязнителем окружающей среды. Частично сбросной коксовый газ очищается с получением полезных продуктов (например, аммиака), частично возвращается обратно в коксовые батареи, и остаток по возможности подается на утилизацию [1]. В связи с проблемой загрязнения окружающей среды вопрос утилизации коксового газа остается актуальным. Сегодня утилизация коксового газа подразумевает, как правило, тепловую утилизацию путем его сжигания при содержании в составе горючих элементов и соединений –  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  [1, 2].

Сырьем для коксохимического производства металлургического комбината АО «Уральская Сталь» служит уголь в основном Карагандинского и Кузнецкого угольных бассейнов. Усредненный химический состав коксового газа предприятия за 2023 г. приведен в табл. 1.

Посредством аппроксимации параметров по температурам получены функциональные зависимости энтальпии  $h$  (кДж/кг), адиабаты  $k$ , изобарной и изохорной теплоемкостей  $C_p$  и  $C_v$  (кДж/кг · °С) коксового газа АО «Уральская Сталь»:

$$h(t) = 1,51068 \cdot t + 597,2767,$$

$$k(t) = -0,0003 \cdot t + 1,3419,$$

$$C_p(t) = 0,0000026 \cdot t^2 + 0,0008411 \cdot t + 1,4172737,$$

$$C_v(t) = 0,0000025 \cdot t^2 + 0,00087 \cdot t + 1,0556898.$$

Теоретически необходимый объем воздуха для сжигания газообразного топлива  $V_0$ , объемы азота  $N_2$ , трехатомных газов  $RO_2$  и паров воды  $H_2O$  в продуктах сгорания топлива рассчитываются соответственно по формулам [2, 3]:

$$V_0 = 0,0476 [0,5(H_2 + CO) + 1,5H_2S + 2CH_4 - O_2 + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_mH_n],$$

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

$$V_{RO_2} = 0,01(\sum m C_mH_n + H_2S + SO_2 + CO_2 + CO),$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \left( H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_mH_n + 0,124d_{г.тл} \right) + 0,161 \cdot V_0,$$

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

Так, объемы компонентов в продуктах сгорания в расчете на 1 м<sup>3</sup> рассматриваемого коксового газа составляют:

$$V_{N_2} = 3,144 \text{ м}^3, V_{RO_2} = 0,35 \text{ м}^3, V_{H_2O} = 1,125 \text{ м}^3.$$

Значения массовых долей отдельных компонентов в продуктах сгорания коксового газа дают возможность определить термодинамические свойства данных продуктов.

Основные физические параметры продуктов сгорания коксового газа АО «Уральская Сталь» без избытка воздуха приведены в табл. 2. При избытке воздуха в продуктах сгорания образуется свободный

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

Удельный вес, кг/м <sup>3</sup>	Массовая доля элементов, %							
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
0,444	0,53	2,1	1,63	1,0	6,85	58,3	21,75	7,85

**Таблица 2.** Параметры продуктов сгорания коксового газа без избытка воздуха

Температура $t$ , °С	Физические параметры продуктов сгорания			
	Теплоемкость $C_p$ , кДж/кг · °С	Теплоемкость $C_v$ , кДж/кг · °С	Показатель адиабаты $k$	Энтальпия $h$ , кДж/кг
0	1,002	0,722	1,387	268,98
100	1,019	0,739	1,379	370,05
300	1,064	0,784	1,360	578,18
500	1,118	0,838	1,339	796,41
700	1,168	0,888	1,320	1025,19
900	1,207	0,927	1,307	1262,90
1100	1,238	0,957	1,297	1507,49
1300	1,261	0,981	1,290	1757,46
1500	1,279	0,999	1,285	2011,54

**Таблица 3.** Значения энтальпии продуктов сгорания коксового газа при избытке воздуха, кДж/кг

Температура $t$ , °С	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$					
	1,5	1,8	2,2	2,5	2,8	3,2
0	270,60	271,12	271,58	271,83	272,03	272,23
100	371,51	371,98	372,40	372,62	372,80	372,98
300	578,60	578,74	578,86	578,93	578,98	579,03
500	795,27	794,91	794,58	794,40	794,27	794,12
700	1022,07	1021,06	1020,16	1019,68	1019,31	1018,92
900	1257,42	1255,65	1254,07	1253,23	1252,57	1251,89
1100	1499,37	1496,76	1494,41	1493,16	1492,19	1491,18
1300	1746,49	1742,95	1739,79	1738,10	1736,78	1735,42
1500	1997,58	1993,08	1989,06	1986,91	1985,23	1983,49

кислород  $O_2$ . По мере увеличения коэффициента избытка воздуха состав и свойства продуктов сгорания приближаются по показателям к атмосферному воздуху.

Энтальпия газов как рабочего тела в термодинамическом цикле отображает тепловой эквивалент, вносимый единицей продуктов сгорания в цикл тепловой машины. Так, энтальпию в большинстве случаев можно рассматривать как показатель, определяющий оптимальность использования рабочего тела в цикле и требуемое его количество для выработки заданной полезной энергии [2]. Значения энтальпии продуктов сгорания данного коксового газа от температуры при различных коэффициентах избытка воздуха сведены в табл. 3.

Низшая теплота сгорания коксового газа как газообразного топлива может быть рассчитана по формуле [3]:

$$Q_p^H = 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 590 \cdot C_2H_4 + 127,7 \cdot CO.$$

Теплота сгорания коксового газа предприятия АО «Уральская Сталь» согласно расчетам по усредненному составу составляет порядка 34340 кДж/кг.

Если продукты сгорания топливного газа рассматривать как рабочее тело в газотурбинном цикле, то показателями, определяющими энергетическую эффективность цикла и применяемого газотурбинного оборудования, будут прежде всего начальная температура и давление [4]. Если давление обеспечивается компрессором, устанавливаемом в большинстве схем на одном валу с газовой турбиной, то температура определяется непосредственно природой сжигаемого топливного газа. Следовательно, температура горения коксового газа, как любого газообразного топлива, будет варьироваться в зависимости от его химического состава.

При отсутствии механического и химического недожога (кроме диссоциации), если сгорание топлива ведется с избытком воздуха, то теоретическая темпе-

**Таблица 4.** Отношения показателей продуктов сгорания коксового газа к значениям воздуха при его избытке в продуктах сгорания  $\alpha = 1,5$

Температура, °С	Отношения показателей			
	$c_{рлс}^{кт} / c_{рв}$	$c_{втс}^{кт} / c_{вв}$	$k_{тс}^{кт} / k_{в}$	$h_{тс}^{кт} / h_{в}$
0	0,9998	1,0056	0,9935	0,9900
100	1,0064	1,0151	0,9914	0,9935
300	1,0126	1,0232	0,9912	0,9992
500	1,0162	1,0273	0,9913	1,0032
700	1,0185	1,0299	0,9913	1,0063
900	1,0205	1,0321	0,9911	1,0087
1100	1,0224	1,0343	0,9908	1,0107
1300	1,0234	1,0353	0,9908	1,0123
1500	1,0238	1,0356	0,9909	1,0137
Среднее	1,0171	1,0280	0,9912	1,0052

ратура горения условно может быть определена по формуле [2, 3]:

$$t_{\alpha}^r = \frac{Q_n^p + Q_t + Q_v - Q_{дис}}{C_{пр.сг} \cdot V_{\alpha}}$$

где  $Q_t$  – физическая теплота подогретого топлива,  $Q_v$  – физическая теплота подогретого воздуха,  $Q_{дис}$  – химический недожог из-за диссоциации,  $V_{\alpha}$  – объем образуемых продуктов сгорания при заданном избытке воздуха  $\alpha$ .

Расчет температуры горения можно рассчитать через тепловой баланс после преобразования зависимостей:

$$Q_n^p (1 - \eta) = C_{пр.сг} \cdot V_{\alpha} \cdot (t_r - t_0),$$

где  $\eta$  – коэффициент общих тепловых потерь;  $t_r$  – температура горения, °С;  $t_0$  – температура вносимого воздуха (смеси), °С.

Полученная расчетная зависимость температуры горения от избытка воздуха  $\alpha$  при тепловых потерях 10 % может быть записана через полином второй степени:

$$t_r(\alpha) = 573,90\alpha^2 - 2890,52\alpha + 4695,50.$$

График данной зависимости показан на рисунке.

Согласно теоретическому расчету температура горения коксового газа рассматриваемого состава без избытка воздуха приблизительно составляет 2424 °С, что превышает адиабатную температуру горения природного газа. Данный эффект наблюдается по причине значительно меньшего объема продуктов сгорания коксового газа на единицу его массы. В случае перерасчета на количество продуктов сгорания 1 кг природного газа температура понижается примерно в 1,4

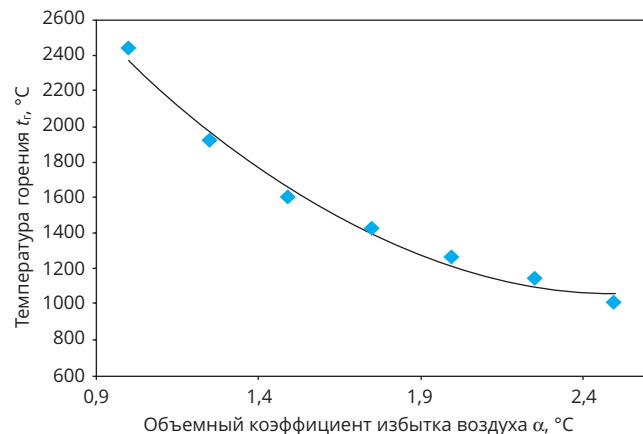


График зависимости температуры горения коксового газа от избытка воздуха  $\alpha$

раза. Так, температура продуктов сгорания коксового газа при количестве, соответствующем продуктам сгорания природного газа с избытком воздуха  $\alpha = 2$ , составит 893 °С. В случае сжигания коксового газа в камере сгорания в подобных условиях температура рабочего тела будет недостаточна для стабильной работы большинства газовых турбин. Температура сгорания природного газа в аналогичных условиях согласно расчету составляет порядка 1130 °С.

При пересчете на количество продуктов сгорания 1 кг природного газа получена зависимость температуры горения коксового газа от объемного избытка воздуха  $\alpha$ :

$$t_r(\alpha) = 364,57 \cdot \alpha^2 - 1881,14 \cdot \alpha + 3176,07.$$

**Таблица 5.** Отношения параметров продуктов сгорания коксового и природного газа при объемном избытке воздуха  $\alpha = 1,5$

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Отношение физических параметров			
	$c_{\text{pnc}}^{\text{кг}} / c_{\text{pv}}$	$c_{\text{vnc}}^{\text{кг}} / c_{\text{vb}}$	$k_{\text{nc}}^{\text{кг}} / k_{\text{в}}$	$h_{\text{nc}}^{\text{кг}} / h_{\text{в}}$
0	1,0048	1,0036	1,0005	1,0072
100	1,0029	1,0009	1,0019	1,0063
300	1,0006	0,9979	1,0043	1,0046
500	0,9996	0,9968	1,0051	1,0033
700	0,9993	0,9965	1,0051	1,0025
900	0,9992	0,9965	1,0051	1,0019
1100	0,9991	0,9965	1,0050	1,0014
1300	0,9991	0,9966	1,0049	1,0011
1500	0,9991	0,9966	1,0049	1,0009
Среднее	1,0001	0,9976	1,0044	1,0030

**Таблица 6.** Результаты расчета ГТУ со свободной турбиной 25 МВт

Параметры	Значения при работе ГТУ	
	на коксовом газе	на природном газе
Относительный расход топлива $q_{\text{т}}$	0,0308	0,0232
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	34332	44396
Секундный расход топлива на 1 кг воздуха, кг/с	0,0294	0,0222
Относительный отбор воздуха на охлаждение турбины компрессора $\delta_{\text{охл}}$	0,0336	0,0336
Изобарная теплоемкость газа $C_{\text{pv}}$ , кДж/(кг · °C)	1,283	1,265
Адиабата газа на входе в турбину $k_{\text{т}}$	1,289	1,294
Удельная работа турбины $L_{\text{т}}$ , кДж/кг	746,51	743,61
Температура «чистого» газа за турбиной $T_{\text{тчб}}$ , °C	618,0	612,1
Расход газа за турбиной $G_{\text{т}}$ , кг/с	1,019	1,012
Температура газа за турбиной $T_{\text{т}}$ , °C	608,8	603,4
Относительный расход топлива за турбиной $q_{\text{т}}$	0,0297	0,0224
Газовая постоянная газа за турбиной $R_{\text{т}}$ , Дж/(кг · °C)	287,87	287,69
Эффективная удельная работа цикла на 1 кг воздуха $L_{\text{е}}$ , кДж	360,82	352,92
Фактический секундный расход топлива $G_{\text{тс}}$ , кг/с	2,05	1,58
Располагаемая удельная энергия топлива, внесенного в двигатель (на 1 кг топлива)	1010,7	985,2
Эффективный КПД газотурбинного двигателя $\eta_{\text{е}}$	0,358	0,356
Коэффициент полезной работы $\phi$	0,491	0,486

Учитывая факт удобства расчета большинства термодинамических циклов под атмосферный воздух как рабочее тело, актуально проведение оценки разности термодинамических свойств воздуха и продуктов сгорания коксового и природного газов.

В табл. 4 приведено сравнение основных термодинамических показателей воздуха и продуктов сгорания коксового газа при объемном избытке воздуха  $\alpha = 1,5$ . Здесь  $c_{\text{pnc}}^{\text{кг}}, c_{\text{vnc}}^{\text{кг}}, k_{\text{nc}}^{\text{кг}}, h_{\text{nc}}^{\text{кг}}$  — изобарная и изохорная теплоемкость, показатель адиабаты и энтальпия

продуктов сгорания коксового газа соответственно;  $c_{\text{pv}}, c_{\text{vb}}, k_{\text{в}}, h_{\text{в}}$  — соответствующие термодинамические показатели атмосферного воздуха.

Как видно, уже при малом избытке воздуха термодинамические параметры продуктов сгорания коксового газа практически идентичны воздуху, что позволяет при проведении большинства расчетов газотурбинных циклов в качестве рабочего тела принимать воздух. Данные допущения удобны при сравнении особенностей работы ГТУ на различных видах топлива и газовой смеси.

В табл. 5 приведено сравнение термодинамических показателей продуктов сгорания коксового газа при объемном избытке воздуха  $\alpha = 1,5$  с соответствующими показателями продуктов сгорания природного газа при аналогичных условиях. Здесь  $c_{\text{прг}}^{\text{прг}}$ ,  $c_{\text{исг}}^{\text{прг}}$ ,  $k_{\text{исг}}^{\text{прг}}$ ,  $h_{\text{исг}}^{\text{прг}}$  — изобарная и изохорная теплоемкость, показатель адiabаты и энтальпия продуктов сгорания природного газа Оренбургского месторождения.

Как показали расчеты, уже при объемном избытке воздуха от 1,5 разница в термодинамических показателях продуктов сгорания коксового и природного газов составляет менее 1 %.

Проведенные расчеты и сравнение параметров продуктов сгорания и воздуха позволяют выполнять тепловые расчеты газовых турбин на коксовом газе, используя методику расчета для классического природного газа, принятого базовым топливом. В табл. 6 сведены основные результаты сравнительного расчета простой ГТУ со свободной турбиной для режимов сжигания в камере сгорания коксового и природного газов [2, 4, 5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сжигание коксового газа рассматриваемого состава в камере сгорания ГТУ теоретически может обеспечить стабильную работу турбины на уровне задаваемой мощности. По причине меньшей плотности коксово-

го газа и более низкой массовой теплоты сгорания его удельный расход превышает аналогичный показатель для природного газа. Различия в других показателях работы ГТУ лежат в пределах 10 % и менее. Можно отметить, что практическая аналогия термодинамических параметров между воздухом и продуктами сгорания коксового и природного газов позволяет проводить сравнения режимов работы газовых турбин и указывает на возможность прямой утилизации коксового газа в камере сгорания ГТУ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кауфман А.А., Харлампович Г.Д.** Технология коксохимического производства : учеб. пособ. — Екатеринбург : ВУХИН, 2005. — 288 с.
2. **Теплотехника** : учебник / под общ. ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. — 6-е изд. — М. : МГТУ им. Баумана, 2018. — 880 с.
3. **Королев В.Н.** Теория горения и взрыва : учеб.-методич. пособ. : — Екатеринбург : изд-во Уральского ун-та, 2021. — 76 с.
4. **Михайлов В.В., Пономарев В.А., Вятков В.В.** Методика термогазодинамического расчета газотурбинных установок : учеб. пособ. — Рыбинск : РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2019. — 130 с.
5. **Михальцев В.Е., Моляков В.Д.** Теория и проектирование газовой турбины : учеб. пособ. / под ред. А.Ю. Варакина. — М. : МГТУ им. Баумана, 2020. — 232 с.

Статья поступила 18.07.2024

## ЧЛЕНЫ СЕКЦИЙ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

### Доменное производство:

*Брагин Ю. С., Евстюгин С. Н., Лазуткин А. Е., Сперкач И. Е., Черноусов П. И.*

### Сталеплавильное производство:

*Паршин В. М.* (редактор раздела),  
*Зинченко С. Д., Зинько Б. Ф., Марукович Е. И., Носоченко О. В., Смирнов Л. А., Соколов В. В.*

### Электрометаллургия:

*Косырев К. Л., Буцкий Е. В., Галкин М. П., Смирнов А. Н., Стомахин А. Я.*

### Ферросплавы:

*Гладких В. А., Жучков В. И., Ишутинов В. И., Павлов А. В., Шкирмантов А. П.*

### Прокатное производство:

*Юсупов В. С.* (редактор раздела),  
*Бринза В. В., Парамонов В. А., Песин А. М., Тулупов О. Н., Целиков Н. А., Юнин Г. Н.*

### Производство труб:

*Коликов А. П.* (редактор раздела),  
*Кондратов Л. А., Романцев Б. А.*

### Метизное производство:

*Камелин В. Г.* (редактор раздела),  
*Манушин В. А., Салехова Г. А.*

### Металлургическое оборудование:

*Чиченев Н. А.* (редактор раздела), *Горбатюк С. М., Жильцов А. П., Корчунов А. Г., Савельев А. Н.*

### Металловедение и термическая обработка:

*Филиппов Г. А.* (редактор раздела), *Капуткина Л. М., Шур Е. А., Эфрон Л. И.*

### Новые металлические материалы и процессы:

*Еремин Г. Н., Лазуткин С. Е., Свистунова Т. В.*

### Экономика, управление и организация производства:

*Бродов А. А.* (редактор раздела),  
*Иванов И. Н., Караваев Е. П., Юзов О. В.*

### Экология и ресурсосбережение:

*Валавин В. С., Колдаева И. Л., Клейменова Э. В., Клименко С. В., Максимов Б. Н., Шушан Ф. Б.*