УДК 629.1.062

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ТОПЛИВНОГО ГАЗА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Докт. техн. наук, проф. КАЧАН А. Д., канд. техн. наук, проф. КОПКО В. М., канд. техн. наук КАЧАН С. А., инж. КРАВЦОВ В. И.

Белорусский национальный технический университет, Белтрансгаз

На газораспределительных станциях (ГРС) могут эффективно применяться комбинированные энергетические установки (КЭУ) в составе турбодетандерных агрегатов (ТДА), использующих потенциальную энергию транспортируемого газа, и тепловых двигателей (ТД). Теплота уходящих газов ТД (предпочтительно это газопоршневые двигатели (ГПД) или контактные ПГУ) утилизируется для подогрева газа перед и при необходимости за ТДА.

Оптимизируем температуру подогрева газа перед ТДА в таких схемах.

Предположим, что энтальпия газа после его расширения в детандергенераторном агрегате (ДГА) будет такой же, как значение ее перед подогревателями на входе в КЭУ, т. е. $h_2^{\text{ДГА}} = h_{\text{Г}}^{\text{исх}}$.

Тогда электрический КПД КЭУ можно записать в виде

$$\eta_{\text{КЭУ}} = \eta_{\text{э}}^{\text{ТД}} + \left(1 - \eta_{\text{э}}^{\text{ТД}}\right)\beta\eta_{\text{под}}\eta_{\text{эм}}^{\text{ДГА}}, \qquad (1)$$

где $\eta_{\text{э}}^{\text{ТД}}$ – электрический КПД теплового двигателя; β – степень использования сбросной теплоты ТД для подогрева газа перед ДГА; $\eta_{\text{под}}$ – коэффициент, учитывающий потери теплоты в подогревателях; $\eta_{\text{эм}}^{\text{ДГА}}$ – электромеханический КПД ДГА.

Соответственно произведение $\left(1 - \eta_{\text{э}}^{\text{ТД}}\right)\beta\eta_{\text{под}}\eta_{\text{эм}}^{\text{ДГА}}$ характеризует удельную (на единицу сожженного в КЭУ топлива) мощность ДГА.

Проведенный анализ показал, что реально достижимо значение $\beta \approx 0{,}8$. Тогда при $\eta_{\text{э}}^{\text{ТД}} = 0{,}43$; $\eta_{\text{под}} = 0{,}98$ и $\eta_{\text{эм}}^{\text{ДГА}} \approx 0{,}96$ из (1) получим величи-

ну электрического КПД КЭУ $\eta_{КЭУ} \approx 0{,}86$. Таким образом, для 1 МВт теплоты используемого в КЭУ топлива мощность КЭУ равна 0,86 МВт, при этом мощность теплового двигателя составляет примерно половину суммарной мощности.

При увеличении нагрева газа перед детандером КПД КЭУ будет снижаться, поскольку дополнительно подводимая теплота $\Delta Q_{г}$ используется с КПД $\eta_{доп}$, меньшим КПД ТД.

Цикл ТДА с дополнительным подводом теплоты к газу в $h - s$ диаграмме приведен на рис. 1. Здесь 0–1 – подвод теплоты к газу в исходном варианте при равенстве энтальпий газа перед ДГА (точка 0) и за ним (точка $2_д$); 1–1′ – дополнительный подвод теплоты к газу с повышением температуры газа перед ДГА от $t_{10}^{ДГА}$ до $t_{1доп}^{ДГА}$; $1-2_t$, $1-2_д$ и $1'-2'_t$, $1'-2'_д$ – теоретический (адиабатный) и действительный процессы расширения газа в ДГА в исходном варианте и в варианте с дополнительным подводом теплоты к газу; $p_1^{ДГА}$, $p_2^{ДГА}$ – давление газа перед и за ДГА.

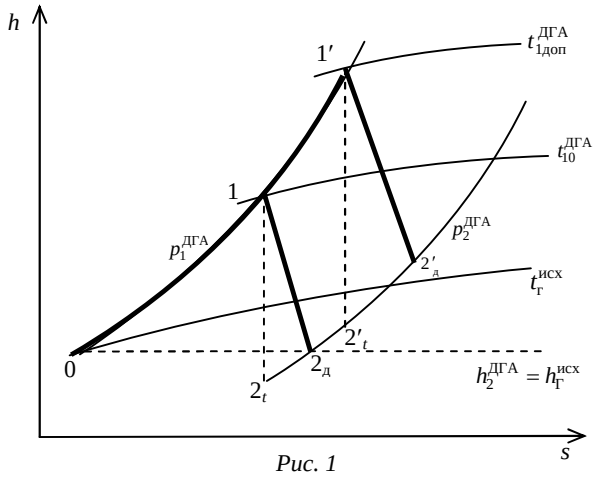

Рис. 1

Для этого случая выражение (1) для КПД КЭУ преобразуется к виду

$$\eta_{КЭУ} = \eta_э^{ТД} + (1-\eta_э^{ТД})\beta\eta_{под}\eta_{эм}^{ДГА}\left(1+\frac{\Delta Q_г}{Q_{г0}}\eta_{доп}\right)\frac{Q_{г0}}{Q_{г0}+\Delta Q_г}. \qquad (2)$$

Здесь $Q_{г0}$ – подвод теплоты к газу при $h_2^{ДГА} = h_г^{исх}$; $\eta_{доп}$ – КПД выработки электроэнергии в дополнительном цикле ДГА при увеличении подвода теплоты к газу перед ним на величину $\Delta Q_г$,

$$\eta_{доп} = \left(1-\frac{273+t_{2доп}^{ДГА}}{273+t_{1доп}^{ДГА}}\right)\eta_{oi}^{ДГА}, \qquad (3)$$

где $t_{1доп}^{ДГА}$, $t_{2доп}^{ДГА}$ – температуры газа перед и за ДГА при адиабатном расширении и дополнительном подводе теплоты к газу перед ДГА; $\eta_{oi}^{ДГА}$ – внутренний относительный КПД газовой турбины ДГА ($\eta_{oi}^{ДГА} \approx 0{,}8$).

Значение $\eta_{\text{доп}}$ при постоянной величине $\eta_{oi}^{\text{ДГА}}$ возрастает с увеличением степени расширения газа в ДГА $p_1^{\text{ДГА}} / p_2^{\text{ДГА}}$ и величины $\Delta Q_{\text{г}}$. При $p_1^{\text{ДГА}} / p_2^{\text{ДГА}} \approx 3...6$ и $\eta_{oi}^{\text{ДГА}} = 0{,}8$ приблизительно $\eta_{\text{доп}} \approx 0{,}12...0{,}25$.

Результаты расчета $\eta_{\text{КЭУ}}$ по (2) при $\eta_{\text{доп}} = 0{,}14$ иллюстрируются рис. 2.

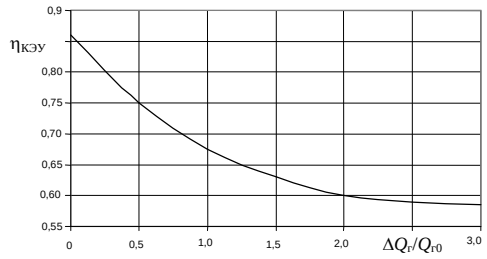

Рис. 2

Как видно, с увеличением относительной величины подвода теплоты к газу перед ДГА $\Delta Q_{\text{г}} / Q_{\text{г0}}$ КПД КЭУ $\eta_{\text{КЭУ}}$ существенно снижается. Однако это еще не означает уменьшения системной эффективности КЭУ, определяемой, например, по критерию экономии топлива против схемы замещения. Положительным является увеличение расхода топлива на ТД и его мощности пропорционально отношению $(\Delta Q_{\text{г}} + Q_{\text{г0}}) / \Delta Q_{\text{г0}}$ при сохранении неизменной степени использования теплоты теплового двигателя, а также повышением работы расширения газа в ДГА и его мощности.

Если принять, что на исходном режиме (при подводе к газу теплоты $Q_{\text{г0}}$) расход топлива на ТД составляет 1 МВт, то экономия топлива в тепловых единицах при дополнительном подводе теплоты к газу $\Delta Q_{\text{г}}$ равна

$$\Delta B_{\text{эк}} = \left[\frac{\Delta Q_{\text{г}} + Q_{\text{г0}}}{Q_{\text{г0}}} \eta_{\text{э}}^{\text{ТД}} + \overline{N}_{\text{ДГА}}^{\text{исх}} + \frac{\Delta Q_{\text{г}}}{Q_{\text{г0}}} \eta_{\text{доп}} \eta_{\text{эм}}^{\text{ДГА}} \right] \Big/ \eta_{\text{зам}} - \frac{\Delta Q_{\text{г}} + Q_{\text{г0}}}{Q_{\text{г0}}}. \quad (4)$$

Здесь $\overline{N}_{\text{ДГА}}^{\text{исх}}$ – исходная мощность ДГА при $Q_{\text{г0}}$; $\eta_{\text{зам}}$ – КПД выработки электроэнергии на замещающей станции энергосистемы.

Результаты расчетов по (4) при $\eta_{\text{эм}}^{\text{ДГА}} = 0{,}96$ и нескольких значениях $\eta_{\text{доп}}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Экономия топлива за счет использования КЭУ $\Delta B_{\text{эк}}$, МВт

$\frac{\Delta Q_{\text{г}}}{Q_{\text{г0}}}$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$\eta_{\text{доп}} = 0{,}1$	1,150 0,654	1,284 0,641	1,417 0,628	1,551 0,616	1,684 0,603	1,818 0,590	1,951 0,578
$\eta_{\text{доп}} = 0{,}14$	1,150 0,654	1,322 0,671	1,494 0,688	1,666 0,704	1,838 0,721	2,009 0,738	2,181 0,755
$\eta_{\text{доп}} = 0{,}18$	1,150 0,654	1,360 0,700	1,571 0,747	1,781 0,793	1,991 0,839	2,201 0,886	2,412 0,932

Над чертой в таблице даны результаты, полученные при $\eta_{\text{зам}} = 0{,}4$ (вариант паротурбинной замещающей КЭС), под чертой – при $\eta_{\text{зам}} = 0{,}52$ (парогазовая замещающая КЭС).

Как видно, при $\eta_{\text{доп}} \geq 0{,}14$ абсолютная экономия топлива $\Delta B_{\text{эк}}$ возрастает во всем диапазоне изменения $\Delta Q_{\text{г}} / Q_{\text{г}0}$, хотя при этом относительная (на единицу расхода топлива в ТД) экономия топлива снижается, поскольку КПД дополнительного цикла $\eta_{\text{доп}}$ значительно ниже $\eta_{\text{зам}}$.

Положительная величина экономии топлива при $\eta_{\text{зам}} = 0{,}52$ объясняется тем, что суммарный КПД ТД и дополнительного цикла получается выше значения $\eta_{\text{зам}}$. Если же альтернативой строительству КЭУ рассматривать теплофикационные установки с более высоким КПД по выработке электроэнергии, то дополнительный подвод теплоты $\Delta Q_{\text{г}}$ может стать невыгодным.

Эффективность дополнительного подвода теплоты к газу ДГА можно также оценить расчетами конкретных вариантов КЭУ с использованием значений энтальпии газа в характерных точках цикла или с применением $h - s$ диаграммы метана.

При этом сначала рассчитываются показатели КЭУ на исходном режиме. Для чего на начальной изобаре $p_1^{\text{ДГА}}$ подбирается точка 1 из такого условия, чтобы энтальпия газа после ДГА

$$h_{2\text{д}} = h_1 - (h_1 - h_{2t})\eta_{oi}^{\text{ДГА}} \tag{5}$$

получилась равной энтальпии газа перед ДГА (в точке 0) $h_{2\text{д}} = h_{\text{г}}^{\text{исх}}$.

В (5) h_1, h_{2t}, $h_{2\text{д}}$ – энтальпии газа в точках 1, 2_t и $2_{\text{д}}$.

Через подвод теплоты к газу в исходном варианте $Q_{\text{г}0} = h_1 - h_0$ мощность теплового двигателя находится как

$$N_{\text{ТД}} = \eta_{\text{э}}^{\text{ТД}} \frac{Q_{\text{г}0}}{\beta\eta_{\text{под}}\left(1 - \eta_{\text{э}}^{\text{ТД}}\right)}. \tag{6}$$

Выражение (6) записано из расчета единичного расхода газа на ДГА. При его увеличении мощность ТД будет пропорционально возрастать.

Расход топлива на тепловой двигатель в тепловых единицах равен

$$B_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{г}0}}{\beta\eta_{\text{под}}\left(1 - \eta_{\text{э}}^{\text{ТД}}\right)}, \tag{7}$$

а мощность ДГА при единичном расходе газа составляет

$$N_{\text{ДГА}} = (h_1 - h_{2\text{д}})\eta_{\text{эм}}^{\text{ДГА}}. \tag{8}$$

В итоге экономию топлива за счет использования КЭУ против схемы замещения можно найти по формуле

$$\Delta B_{\text{эк}} = \frac{N_{\text{ТД}} + N_{\text{ДГА}}}{\eta_{\text{зам}}} - B_{\text{т}}. \tag{9}$$

При увеличении подвода теплоты к газу и сохранении неизменными коэффициентов β и $\eta_{\text{под}}$ пропорционально $\frac{h_1' - h_0}{h_1 - h_0}$ возрастут мощность

теплового двигателя и расход топлива на него. При этом мощность ДГА составит

$$N_{\text{ДГА}} = \left(h'_1 - h'_{2\text{д}}\right)\eta_{\text{эм}}^{\text{ДГА}} \ . \qquad (10)$$

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 2, подтверждает целесообразность дополнительного подвода теплоты к газу перед ДГА. При этом при более высокой степени расширения газа в ДГА p_1/p_2 экономия топлива увеличивается в связи с ростом КПД дополнительного цикла $\eta_{\text{доп}}$. Так, при $p_1/p_2 = 6$ величина $\eta_{\text{доп}} \approx 0{,}25$, а при $p_1/p_2 = 3$ имеем $\eta_{\text{доп}} \le 0{,}15$.

Таблица 2

Показатели работы КЭУ для 1 кг/с расхода газа на ТДА при $h_{\text{г}}^{\text{исх}}$ = 726,5 кДж/кг и p_1 = 3,6 МПа

Параметр работы	p_1/p_2					
	3			6		
Температура газа до/после ТДА, °С	63 –6	93,5 26,7	130 60	94 –7	138 26,7	175 60
Энтальпия газа до/после ТДА, кДж/кг	861 726,5	943,0 797,9	1037,2 876,0	954 726,5	1058,8 802,5	1162 883
$h_1^{\text{ДГА}} - h_{\text{г}}^{\text{исх}}$, кДж/кг	134,5	216,5	310,7	227,5	332,3	435,6
$\Delta Q_{\text{г}}/Q_{\text{г}0}$	0	0,61	1,31	0	0,46	0,91
$\eta_{\text{доп}}$	–	0,128	0,150	–	0,275	0,248
Мощность ТДА, кВт	134,5	145,0	161,2	227,5	256,3	279,0
Мощность ТД, кВт	129,4	208,3	299,0	218,9	319,7	419,0
Расход топлива ТД, кВт	301,0	484,5	695,2	509,1	743,5	974,5
Мощность КЭУ, кВт	263,9	353,3	460,0	446,4	576,0	698,0
$\Delta B_{\text{эк}}$, кВт: при $\eta_{\text{зам}}$ = 0,4; при $\eta_{\text{зам}}$ = 0,52	 358,8 206,5	 398,8 194,9	 454,8 189,4	 606,9 349,4	 696,5 364,2	 770,5 367,8
Экономия топлива на единицу подведенной теплоты в ТД при $\eta_{\text{зам}}$ = 0,4; при $\eta_{\text{зам}}$ = 0,52	 1,192 0,686	 0,823 0,402	 0,654 0,272	 1,192 0,686	 0,937 0,490	 0,791 0,377

Аналогичные результаты можно получить при условии равенства начальной (до подогревателей) и конечной температур газа $t_2^{\text{ДГА}} = t_{\text{г}}^{\text{исх}}$.

При расчетах без использования $h - s$ диаграммы энтальпия газа в характерных точках должна определяться через его теплоемкость $C_p^{\text{г}}$ с учетом зависимости последней как от температуры, так и от давления газа.

По данным [1], в диапазоне изменения температуры 270…370 К и давления 1…5 МПа теплоемкость используемого в Беларуси природного газа можно найти по формуле

$$C_p^{\text{г}} = 1{,}386 + 26{,}56 \cdot 10^{-4} \cdot T + (6{,}03 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - \\ - 4{,}43 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0{,}851)p, \quad \text{кДж/(кг} \cdot \text{°C)}, \qquad (11)$$

где T – абсолютная температура; p – давление газа, МПа.

На ГРС Беларуси в первую очередь следует ориентироваться на применение в составе КЭУ газопоршневых двигателей.

При повышенном подогреве газа перед ДГА мощность теплового двигателя может превышать мощность детандера почти в два раза. В результате даже при относительно небольших расходах газа можно подобрать достаточно крупные существующие типоразмеры ГПД мощностью 3…5 МВт.

Для крупной ГРС, в частности Лукомльской, для которой мощность ДГА может составить около 8 МВт, возможным представляется применение в составе КЭУ уже освоенной НПП «Машпроект» контактной ПГУ 16 МВт [2].

Эффективность КЭУ с повышенным подогревом газа перед ДГА будет возрастать в случае использования физической теплоты топливного газа или при наличии потребителей низкопотенциальной теплоты, например горячего водоснабжения.

Более строго выбор оборудования и структуры КЭУ необходимо производить не из условия максимальной экономии топлива, а по результатам технико-экономического сравнения вариантов.

ВЫВОД

По результатам проведенных исследований можно заключить, что в настоящее время, когда замещающей станцией выбирается Лукомльская ГРЭС с $\eta_{зам} \approx 0{,}4$, при применении на газораспределительных станциях комбинированных энергетических установок в составе турбодетандерных агрегатов и достаточно экономичных тепловых двигателей (ГПД или контактной ПГУ) выгодным является повышенный подогрев газа перед ДГА без его захолаживания за детандергенераторной установкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимизация режимов работы турбодетандерной установки с учетом гидратообразования: Разработка технических предложений, направленных на уменьшение сжигаемого газа или исключение сжигания его в подогревателе: Техн. отчет / НТЦ «НЭЭ» НАН Беларуси. – Мн., 1992.

2. Сташок А. Н., Шелестюк А. И. Газотурбинные двигатели НПП «Машпроект» для электростанций: Опыт и новые энергосберегающие технологии // Известия инженерных наук Украины. – 1999. – Вып. 1. – С. 52–57.

Представлена кафедрой ТЭС Поступила 20.01.2005