УДК 621.165 + 621.438

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА И АЭРОДИНАМИКИ ГАЗОВОГО ТРАКТА НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ГТУ И ПГУ

Асп. ГРИНЧУК А. С.

Белорусский национальный технический университет

На показатели и энергетические характеристики ГТУ и ПГУ достаточно сильное влияние оказывают климатические условия (температура, относительная влажность, барометрическое давление наружного воздуха), потери давления перед компрессором ГТУ (сопротивление воздухоочистительного устройства) и за газовой турбиной (сопротивление котла-утилизатора). Изменение этих факторов в процессе эксплуатации сказывается на экономичности, развиваемой электрической мощности, расходах рабочих сред и их параметрах как для самой ГТУ, так и для паротурбинной части ПГУ [1], что должно учитываться при выборе оборудования и определении показателей парогазовых ТЭС.

Расчет тепловой схемы и характеристик энергетической ПГУ в условиях переменных режимных факторов – весьма сложная задача. В полном объеме она выполняется фирмами-изготовителями с использованием собственных расчетных методов, стендовых испытаний и моделирования. В научно-исследовательской практике используют представленные заводские энергетические характеристики (в графической или табличной форме), аппроксимация которых в расчетные зависимости и алгоритмы позволяет определять характеристики и показатели ПГУ для различных условий эксплуатации.

На Минской ТЭЦ-3 в начале 2009 г. введена в эксплуатацию бинарная теплофикационная ПГУ номинальной электрической мощностью 223 МВт, тепловой – 158 МВт [2]. Сегодня – это наиболее крупная и экономичная ПГУ в Беларуси, в ее состав входят газовая турбина GT13E2 (Alstom, Швейцария), двухконтурный котел-утилизатор (SES TLMAČE, Словакия) и паровая турбина Т-53/67-8,0 (УТМЗ, Россия).

На примере ПГУ-230 рассмотрим влияние аэродинамического сопротивления газовоздушного тракта ГТУ и параметров наружного воздуха на показатели и характеристики энергоблока.

Гарантийные показатели ГТУ Alstom GT13E2, работающей в составе ПГУ-230, приведены в табл. 1.

Расчетный КПД выработки электроэнергии для конденсационного режима ПГУ-230 при указанных в табл. 1 показателях ГТУ равен 49,9 %. По результатам проведенных пусконаладочных испытаний КПД ПГУ на нагрузке, близкой к номинальной, составил около 51 %, что обусловлено лучшей фактической экономичностью ГТУ по сравнению с гарантированными показателями.

Аэродинамическое сопротивление. Работа ГТУ в составе ПГУ связана с некоторым повышением сопротивления выходного тракта и ростом давления за газовой турбиной по сравнению с автономной работой ГТУ. Это приводит к небольшому снижению электрической мощности, КПД и к незначительному увеличению температуры газов за ГТУ.

Таблица 1

Гарантийные показатели ГТУ GT13E2 и расчетные условия базового режима эксплуатации

Параметр	Значение
Номинальная мощность ГТУ (брутто), кВт	168600
КПД ГТУ (брутто), %	35,8
Температура газов перед турбиной, °С	1095
Температура газов за турбиной, °С:	510
Расход газов за турбиной, кг/с	533
Избыток воздуха в отработавших газах	3,4
Расчетные условия окружающей среды:	
температура, °С	15
атмосферное давление, кПа	101,3
относительная влажность, %	60
Аэродинамическое сопротивление котла-утилизатора, кПа	3,0
Низшая теплота сгорания газообразного топлива, кДж/кг	48971

Влияние аэродинамического сопротивления КУ на перечисленные параметры можно оценить с помощью зависимостей:

- электрическая мощность: $N_{\text{ГТУ}} = N_{\text{гту}}^{\text{авт}}(1 - 0{,}55\delta p_{\text{вых}})$;
- КПД ГТУ: $\eta_{\text{ГТУ}} = \eta_{\text{гту}}^{\text{авт}}(1 - \delta p_{\text{вых}})$;
- повышение температуры газов за ГТУ: $\Delta T_{\text{к.т}} = 0{,}272\delta p_{\text{вых}} T_{\text{к.т}}^{\text{авт}}$, где $\delta p_{\text{вых}} = \Delta p_{\text{вых}}/p_{\text{атм}}$ – относительная потеря давления за ГТУ; $\Delta p_{\text{вых}}$ – аэродинамическое сопротивление КУ, Па; $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па.

Аэродинамическое сопротивление за ГТУ определяется конструктивными характеристиками и особенностями исполнения котла-утилизатора и при эксплуатации практически зависит только от расхода газов. Для ПГУ-230 сопротивление КУ на номинальном режиме работы ГТУ составляет около 2,0 кПа, что определяет снижение электрической мощности газовой турбины на 1,1 % (1,85 МВт), снижение КПД ГТУ – на 0,7 % (абс.), увеличение температуры газов за ГТУ – на 3 °С по сравнению с ее работой в автономном режиме.

На рис. 1 представлены зависимости изменения относительной мощности $\overline{N}_{\text{ГТУ}}$, КПД $\overline{\eta}_{\text{ГТУ}}$ и расхода газов $\overline{G}_{\text{к.т}}$ от изменения аэродинамического сопротивления воздушного тракта до и после ГТУ.

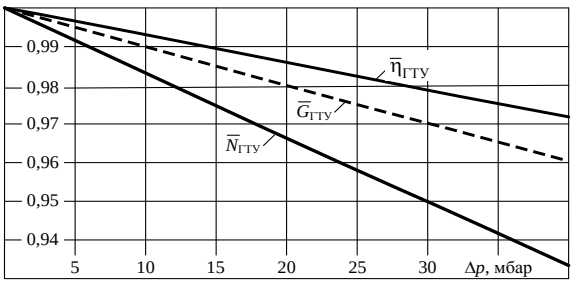

Рис. 1. Зависимости изменения относительной мощности $\overline{N}_{\text{ГТУ}}$, КПД $\overline{\eta}_{\text{ГТУ}}$ и расхода газов $\overline{G}_{\text{к.т}}$ от изменения аэродинамического сопротивления до или после ГТУ

Аэродинамическое сопротивление воздушного тракта на входе в компрессор ГТУ состоит из сопротивления отдельных элементов КВОУ: воздушных фильтров, подогревателя воздуха (антиобледенительной системы), шумоглушителя. Рост потерь давления воздуха в КВОУ в первую очередь связан с загрязнением фильтров очистки воздуха.

В КВОУ ГТУ GT13E2 установлены два типа фильтрующих элементов: фильтры предочистки и фильтры тонкой очистки воздуха. В процессе эксплуатации при загрязнении их аэродинамическое сопротивление может изменяться в соответствующих пределах (табл. 2).

Таблица 2

Фильтр	Аэродинамическое сопротивление фильтров, Па	
	Новые	Полностью загрязненные
Предочистки	50	300
Тонкой очистки	100	600

Как видно, сопротивление полностью отработавших ресурс фильтров КВОУ увеличивается на 7,5 мбар, что приводит к снижению электрической мощности ГТУ на 1,3 % (2,2 МВт), КПД ГТУ – на 0,5 % (отн.). Для предупреждения увеличения сопротивления фильтров КВОУ сверх допустимой величины отсек КВОУ оснащен защитными клапанами, открытие которых происходит при достижении сопротивления фильтров до 15 мбар.

Заводом-изготовителем не предусмотрена очистка отработавших фильтров, а их полная замена весьма дорогостояща и трудоемка. Для продления ресурса фильтров КВОУ и поддержания расчетной мощности и экономичности ГТУ необходим комплекс мероприятий, направленных на снижение запыленности циклового воздуха ГТУ.

Атмосферное давление и влажность воздуха. В отличие от аэродинамического сопротивления, оказывающего влияние на мощность и экономичность, атмосферное давление и относительная влажность воздуха сказываются в основном на развиваемой электрической мощности ГТУ (рис. 2). Изменение относительной влажности в диапазоне температур до 35 °С на изменение КПД ГТУ сказывается весьма незначительно, не превышая 0,05 % (отн.), что можно не учитывать в практических расчетах.

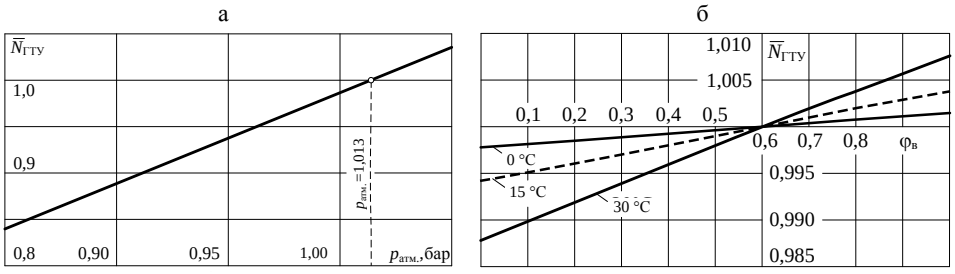

Рис. 2. Определение изменения электрической мощности ГТУ при номинальной нагрузке в зависимости от атмосферного давления $p_{атм}$ и относительной влажности воздуха $\varphi_в$: а – влияние атмосферного давления на изменение мощности ГТУ; б – то же относительной влажности воздуха

Относительная влажность воздуха (или степень насыщения) определяется следующим образом:

$$\varphi_{в} = \frac{\rho_{п}}{\rho''} \cdot 100\ \%,$$

где $\rho_{п}$ – плотность пара влажного воздуха (плотность пара), кг/м^3; ρ'' – плотность сухого насыщенного пара при данной температуре, кг/м^3.

За расчетное атмосферное давление по стандарту ISO 3977-2:1997 для ГТУ принято давление, равное 760 мм рт. ст. (1013 мбар). Для условий эксплуатации ПГУ-230 среднегодовое значение атмосферного давления находится на уровне 988 мбар, что несколько ниже расчетного, а среднегодовая относительная влажность воздуха составляет 78 %, т. е. выше расчетной. Результирующее снижение развиваемой электрической мощности ГТУ составит 3,9 МВт, или 2,3 %.

Температура наружного воздуха. Среди всех режимных и эксплуатационных факторов наиболее сильно влияет на показатели ГТУ температура наружного воздуха $T_{н.в}$, что связано с затратами мощности на сжатие воздуха в компрессоре при изменении его плотности. На привод осевого воздушного компрессора ГТУ расходуется значительная часть мощности, вырабатываемой газовой турбиной. Так, для GT13E2 на номинальном режиме на привод компрессора расходуется 49 % располагаемой мощности газовой турбины, а при нагрузке технического минимума (6 МВт) – 75 %.

На рис. 3 приведены зависимости влияния температуры наружного воздуха $T_{н.в}$ на энергетические характеристики ГТУ при полной электрической нагрузке.

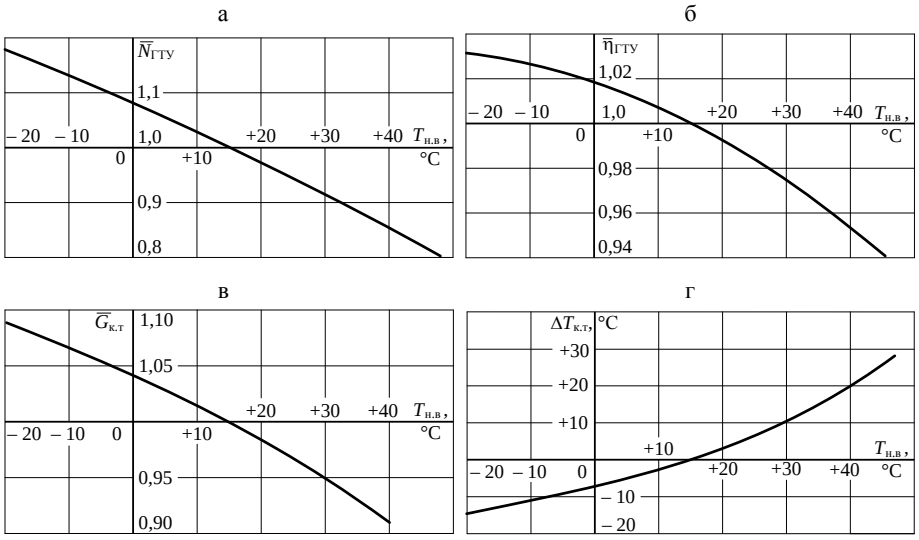

Рис. 3. Зависимости изменения относительной мощности $\bar{N}_{ГТУ}$, экономичности $\bar{\eta}_{ГТУ}$ ГТУ, а также расхода газов за турбиной $\bar{G}_{к.т}$ и их температуры $\Delta T_{к.т}$ от температуры наружного воздуха $T_{н.в}$ по заводским данным для GT13E2: а – зависимость относительного изменения электрической мощности ГТУ от $T_{н.в}$; б – то же КПД от $T_{н.в}$; в – то же расхода газов за ГТУ от $T_{н.в}$; г – зависимость изменения температуры газов за ГТУ от $T_{н.в}$

Графические зависимости энергетических характеристик ГТУ можно преобразовать в аналитические, описав их полиномами с использованием многочленов второго и третьего порядков:

$$F(T_{\text{н.в}}) = \sum_{i=1}^{n} a_i T_{\text{н.в}}^i \quad \text{либо} \quad F(T_{\text{н.в}}) = F_0 \sum_{i=1}^{n} b_i T_{\text{н.в}}^i \; F,$$

где F_0 – номинальная характеристика ГТУ для расчетных условий (табл. 1).

Для рассматриваемой ГТУ автором были получены и использованы при расчетах следующие аппроксимированные зависимости:

- для электрической нагрузки ГТУ, МВт:

$$N_{\text{э}}^{\text{ГТУ}} = 168{,}6 \cdot (-0{,}00001381730020997\, T_{\text{н.в}}^2 - 0{,}00514309614906 T_{\text{н.в}} + 1{,}0817577664);$$

- для электрического КПД ГТУ, %:

$$\eta_{\text{ГТУ}} = 35{,}8 \cdot (-0{,}000016419953972\, T_{\text{н.в}}^2 - 0{,}000967593361712 T_{\text{н.в}} + 1{,}018606906);$$

- для температуры газов за ГТУ, °С:

$$T_{\text{к.т}} = 510 \cdot (0{,}00007406902\, T_{\text{н.в}}^3 + 0{,}00374397166466\, T_{\text{н.в}}^2 + 0{,}4082859157 T_{\text{н.в}} - 7{,}223982877);$$

- для расхода газов за ГТУ, кг/с:

$$G_{\text{к.т}} = 533 \cdot (-0{,}00000015503937\, T_{\text{н.в}}^3 - 0{,}000011672227137\, T_{\text{н.в}}^2 - 0{,}00256894433776 T_{\text{н.в}} + 1{,}0415523473).$$

Поскольку экономичность паровой турбины ПГУ зависит от начальных параметров пара, в первую очередь контура ВД, то при изменении его температуры и начального давления происходит изменение располагаемого теплоперепада и экономичности паротурбинного цикла. Как видно из зависимости $\Delta T_{\text{к.т}} = f(T_{\text{н.в}})$ (рис. 3), при низкой $T_{\text{н.в}}$ температура газов за ГТУ снижается на 10–15 °С от номинальной, что определяет ощутимое снижение параметров цикла ПТУ. Расход теплоносителя в ГТУ и ПТУ при снижении $T_{\text{н.в}}$ наоборот увеличивается.

Используя полученные зависимости характеристик ГТУ от $T_{\text{н.в}}$ и модель расчета параметров и показателей двухконтурной ПГУ на ЭВМ, определены параметры и изменение экономичности схемы бинарной ПГУ, аналогичной ПГУ-230 МТЭЦ-3, при различной $T_{\text{н.в}}$. Результаты расчетов в численном виде сведены в табл. 3, в графическом – представлены на рис. 3.

Полученные результаты показывают, что максимум тепловой экономичности установки приходится на $T_{\text{н.в}} \approx 7$–8 °С, что примерно соответствует среднегодовому значению $T_{\text{н.в}}$ для Минска. При снижении температуры наружного воздуха ниже 7 °С КПД рассматриваемой утилизационной ПГУ $\eta_{\text{ПГУ}}$ начинает снижаться, несмотря на увеличение КПД $\eta_{\text{ГТУ}}$ и расхода газов ГТУ. Происходит уменьшение $\eta_{\text{ПГУ}}$ (рис. 4) из-за преобладающего влияния паротурбинной части, снижение экономичности и удельной мощности которой не компенсируется ростом $\eta_{\text{ГТУ}}$ и увеличением расхода рабочих сред ГТУ и ПТУ.

Таблица 3

Влияние температуры наружного воздуха $T_{н.в}$ на показатели бинарной ПГУ (конденсационный режим базовой нагрузки)

Параметр	Температура наружного воздуха $T_{н.в}$, °С						
	–20	–10	0	10	15	20	30
Температура газов за ГТУ $T_{к.т}$, °С	495,5	499,0	502,8	507,3	510,0	513,0	520,4
Расход газов за ГТУ $G_{к.т}$, кг/с	581	568	555	541	533	525	506
Электрический КПД $\eta_{ГТУ}$, %	36,92	36,75	36,47	36,06	35,80	35,54	34,90
Параметры пара высокого давления:							
• температура ВД $T_0^{вд}$, °С	473,5	477,0	480,5	485,3	488,0	491,0	498,4
• оптимальное давление $p_0^{вд}$, МПа	7,0	7,2	7,4	7,6	7,7	7,8	8,2
• расход $D_0^{вд}$, кг/с	59,57	58,84	58,16	57,51	57,16	56,86	56,02
Параметры пара низкого давления:							
• температура $T_0^{нд}$, °С	211,1	211,8	212,6	213,2	213	213,5	214,8
• оптимальное давление $p_0^{нд}$, МПа	0,64	0,65	0,67	0,69	0,70	0,71	0,75
• расход $D_0^{нд}$, кг/с	23,95	23,41	22,83	22,145	21,72	21,28	20,37
Электрическая мощность ГТУ $N_э^{ГТУ}$, МВт	198,8	190,8	182,4	173,5	168,6	164,1	154,3
Электрическая мощность ПТУ $N_э^{ПТУ}$, МВт	68,3	67,7	67,2	66,7	66,5	66,2	65,8
Электрическая мощность ПГУ $N_э^{ПГУ}$, МВт	267,1	258,5	249,6	240,2	235,1	230,3	220,0
КПД ПТУ $\eta_{ПТУ}$, %	25,9	26,0	26,2	26,4	26,5	26,6	26,9
КПД ПГУ $\eta_{ПГУ}$, %	49,60	49,79	49,91	49,93	49,91	49,88	49,77

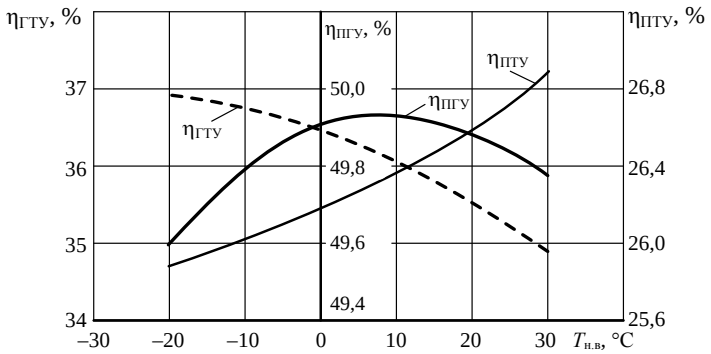

Рис. 4. Зависимость КПД ГТУ, ПТУ и ПГУ от $T_{н.в}$ при номинальной загрузке (конденсационный режим)

Мощность паровой турбины увеличивается при снижении температуры наружного воздуха, но гораздо меньшими темпами, чем газовой. Это определяет снижение такого важного показателя бинарной ПГУ, как соотношение мощностей паровой и газовой частей: $k_{ПГУ} = N_э^{ПТУ} / N_э^{ГТУ}$. Так, если при $T_{н.в}$ = 15 °С $k_{ПГУ}$ = 0,39, то при $T_{н.в}$ = –20 °С $k_{ПГУ}$ = 0,34, экономичность ПТУ при этом снижается с 26,5 до 25,9 %. В научной литературе показано, что для бинарной ПГУ оптимальным считается соотношение мощностей паровой и газовой частей с $k_{ПГУ} \approx 0{,}5$.

Получить стабильно высокие КПД ПТУ и $k_{ПГУ}$ при снижении $T_{н.в}$ возможно применением дожигания топлива в КУ с целью повышения начальных параметров пара контура ВД (до 565 °С; 12,75 МПа) [3]. При этом каждому значению $T_{н.в}$ будет соответствовать своя оптимальная степень дожигания $\beta_{дж}^{i} = f(T_{н.в})$. Причем при низких температурах наружного воздуха количество дожигаемого в КУ топлива увеличивается как по причине снижения температуры газов за ГТУ, так и ввиду увеличения их расхода.

Аналогично варианту чисто утилизационной ПГУ были произведены соответствующие расчеты показателей двухконтурной конденсационной ПГУ с дожиганием топлива в блоке дожигающих устройств (БДУ) КУ перед пароперегревателем ВД. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Таблица 4

Влияние температуры наружного воздуха $T_{н.в}$ на показатели ПГУ с ГТУ GT13E2 при дожигании топлива в КУ

Параметр	Температура наружного воздуха $T_{н.в}$, °С						
	–20	–10	0	10	15	20	30
Температура газов за ГТУ $T_{к.т}$, °С	495,5	499,0	502,8	507,3	510,0	513,0	520,4
Температура газов за БДУ $T_{к.д}$, °С	590	590	590	590	590	590	590
Степень дожигания $\beta_{дж}$, %	7,72	7,35	6,93	6,44	6,15	5,84	5,11
Расход газов за ГТУ $G_{к.т}$, кг/с	581	568	555	541	533	525	506
Электрический КПД ГТУ $\eta_{ГТУ}$, %	36,92	36,75	36,47	36,06	35,80	35,54	34,90
Расход пара контура ВД $D_0^{вд}$, т/ч	78,87	77,10	75,33	73,42	72,33	71,24	68,65
Расход пара контура НД $D_0^{нд}$, т/ч	20,34	19,88	19,43	18,94	18,65	18,37	17,70
Электрическая мощность ГТУ $N_э^{ГТУ}$, МВт	198,8	190,8	182,4	173,5	168,6	164,1	154,3
Электрическая мощность ПТУ $N_э^{ПТУ}$, Вт	96,9	94,7	92,5	90,2	88,8	87,5	84,3
Электрическая мощность ПГУ $N_э^{ПГУ}$, МВт	295,7	285,5	274,9	263,7	257,4	251,6	238,6
КПД ПГУ $\eta_{ПГУ}$, %	49,11	49,31	49,43	49,47	49,47	49,48	49,41

Зависимость $\beta_{дж}^{i}$ от $T_{н.в}$ (табл. 4) была аппроксимирована в аналитическую зависимость

$$\beta_{дж}^{i} = -7{,}42591575 \cdot 10^{-5} \cdot (\beta_{дж}^{расч})^2 - 0{,}007623864 \cdot \beta_{дж}^{расч} + 1{,}128822,$$

где $\beta_{дж}^{расч}$ – оптимальная степень дожигания топлива в КУ при расчетной $T_{н.в}$ = 15 °С, рассчитывается для конкретной схемной реализации ПГУ; $\beta_{дж}^{i}$ – то же при произвольной $T_{н.в}$.

Положительным и важным обстоятельством схемы с дожиганием является то, что термодинамическая эффективность ПГУ при увеличении $\beta_{дж}$ изменяется незначительно – не более 0,36 % (абс.) от максимального значения. Снижение экономичности от потери бинарности ПГУ в существенной степени компенсируется увеличением КПД ГТУ, а также (по сравне-

нию со схемой без дожигания) увеличением КПД и мощности ПТУ. Экономичность ПТУ здесь остается практически постоянной, а соотношение мощностей газотурбинной и паротурбинной частей изменяется незначительно: с 0,53 ($T_{н.в}$ = 15 °С) до 0,49 ($T_{н.в}$ = –20 °С). При снижении $T_{н.в}$ расход пара на ПТУ увеличивается более интенсивно (табл. 3), и в схеме с дожиганием вырабатывается дополнительная тепловая (и электрическая) мощность, что востребовано для ТЭЦ по режимам отпуска теплоты в отопительный период.

ВЫВОДЫ

1. Климатические факторы оказывают значительное влияние на экономичность и развиваемую электрическую мощность при эксплуатации ГТУ и ПГУ. Изменение мощности может достигать 15 % и более, КПД ГТУ – до 4 % (отн.) по сравнению с расчетным режимом.

2. Аэродинамическое сопротивление газовоздушного тракта ГТУ в первую очередь связано с сопротивлением котла-утилизатора и загрязнением фильтров КВОУ на впуске воздуха в компрессор. Снижение электрической мощности ГТУ при увеличении сопротивления КВОУ может достигнуть 1,3 %, КПД ГТУ – 0,5 % (отн.). Аэродинамическое сопротивление котла-утилизатора ПГУ-230 определяет снижение электрической мощности ГТУ на 1,1 %, КПД ГТУ – на 0,7 % (абс.) по сравнению с автономным режимом работы.

3. Для бинарных ПГУ (без дожигания в КУ топлива) при снижении температуры наружного воздуха, несмотря на рост КПД ГТУ, происходит ухудшение общей экономичности ПГУ за счет значительного снижения начальных параметров паротурбинного цикла. Зависимость КПД ПГУ при этом имеет максимум при температуре наружного воздуха, близкой к расчетной.

4. В случае применения ПГУ на ТЭЦ одним из способов повышения тепловой мощности Т-отборов паровой турбины ПГУ при снижении температуры наружного воздуха является применение дожигания топлива в КУ в среде отработанных газов газовой турбины. Оптимальной в этом случае можно считать такую степень дожигания, которая позволяет стабилизировать параметры пара контура высокого давления и поднять их до стандартных (565 °С, 13 МПа).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ц а н е в, С. В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособие для вузов / С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремизов; под ред. С. В. Цанева. – 2-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 584 с.

2. К р у п н е й ш и й в республике парогазовый блок введен в эксплуатацию на Минской ТЭЦ-3: интервью с главным инженером МТЭЦ-3 Е. О. Вороновым // Энергетическая стратегия. – 2009. – № 2.

3. Я к о в л е в, Б. В. Оптимизация начальных параметров и степени дожигания топлива в котлах-утилизаторах ПГУ с одним и двумя давлениями пара / Б. В. Яковлев, А. С. Гринчук // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 6.

Представлена кафедрой ТЭС Поступила 07.07.2009