

УДК 621.311.22

## Влияние направляющего аппарата компрессора ГТЭ-110 на показатели работы блока ПГУ-325

Мошкарин А.В., д-р техн. наук, Шелыгин Б.Л., канд. техн. наук, Жамлиханов Т.А., асп.

Разработаны статические характеристики, позволяющие оценить зависимости мощности отдельных элементов, параметров теплоносителя и рабочей среды, КПД ГТУ и ПГУ от степени открытия входного направляющего аппарата компрессора ГТУ и температуры наружного воздуха.

*Ключевые слова:* газотурбинная установка (ГТУ), температура наружного воздуха, коэффициент избытка воздуха, КПД, электрическая мощность, входной направляющий аппарат, компрессор.

## Influence of GTE-110 Compressor Exducer on Operating Characteristics of CCGT-325 MW Power Unit

B.L. Shelygin, Candidate of Engineering, A.V. Moshkarin, Doctor of Engineering, T.A. Zhamlikhanov, Post-Graduate Student

Static characteristics, allowing to estimate dependences of power of separate elements, parameters of the heat-transfer and a workspace, coefficient of efficiency of GTU and CCGT from a degree of the GTU compressor exducer opening and outdoor temperature are developed.

*Keywords:* gas turbo unit (gas turbine), outdoor temperature, excess air coefficient, coefficient of efficiency, electric power, exducer, compressor.

В ходе эксплуатации парогазовых установок (ПГУ) ТЭС газотурбинные установки (ГТУ) работают в переменных режимах [1] и их технологические показатели отличаются от расчетных значений (при температуре наружного воздуха  $t_{нар} = 15^\circ\text{C}$ ) [2].

В зависимости от нагрузки потребителя и значений  $t_{нар}$  изменяется вырабатываемая электрическая мощность ГТУ  $N_{ГТУ}$ . Для поддержания номинальной частоты вращения ротора газовой турбины (ГТ) 3000 об/мин соответствующий расход топлива В в камеру сгорания (КС) ГТУ подается с помощью топливных клапанов. Требуемый расход воздуха регулируется открытием (закрытием) входного направляющего аппарата (ВНА), установленного после конфузора осевого компрессора установки (рис. 1).

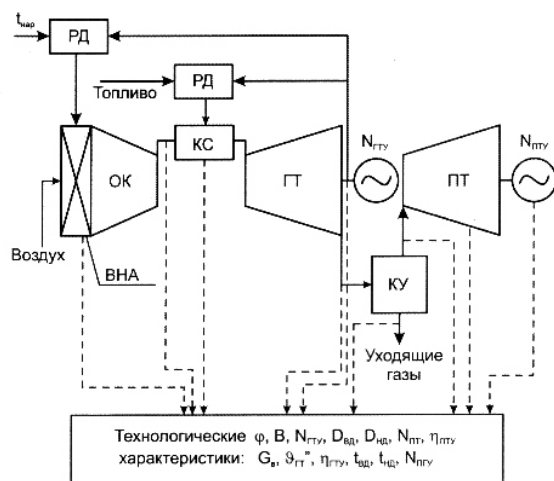


Рис. 1. Схема регулирования мощности ГТУ: ВНА – входной направляющий аппарат; ОК – осевой компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; КУ – котел-утилизатор; ПТ – паровая турбина

Поворотом лопаток ВНА на определенный угол  $\varphi$  изменяют расход  $G_B$  и степень закручивания воздушного потока в сторону вращения ротора газовой турбины (ГТ), влияющие в целом на режим всей ГТУ.

Поворот лопаток ВНА позволяет:

- повысить экономичность ГТУ при переменных режимах;
- стабилизировать параметры уходящих из ГТУ газов;
- обеспечить надежность эксплуатации в переменных режимах.

Угловое положение лопаток ВНА (угол открытия  $\varphi$ ) контролируется [2]:

- визуально (стрелкой по шкале);
- дистанционно (датчиком угла открытия  $\varphi$ , выдающим сигнал на блочный щит управления).

Повышение экономичности ПГУ достигается за счет автоматизации процессов установки в резервном диапазоне нагрузок. Создание автоматизированной системы управления (АСУ) [3] возможно с помощью алгоритмов управления объектом с использованием статических характеристик.

В ходе эксплуатации ГТУ АСУ должна обеспечивать автоматическую настройку ВНА для поддержания следующих параметров:

- температуры газов за ГТУ  $\vartheta''_{ГТУ}$  и соответствующей температуры пара за котлом-утилизатором (КУ)  $t_{вд}$ ;
- оптимального значения коэффициента избытка воздуха за ГТУ  $\alpha''_{ГТУ}$ ;
- максимального значения КПД ПГУ  $\eta_{ПГУ}$ .

Ниже получены статические характеристики применительно к энергоблоку ПГУ-325 ОАО «Ивановские ПГУ»[4]. Расчетное исследование выполнялось с использованием данных ИК ЗиОМАР и ВТИ, полученных в результате тепловых расчетов

элементов ПГУ-325. В качестве сжигаемого в КС ГТЭ-110 топлива принят природный газ с теплотой сгорания  $Q^p_n = 49,4$  МДж/кг [5].

Регулирование значений давления и температуры пара за КУ не предусмотрено. Рабочий диапазон паропроизводительности КУ соответствует диапазону возможных нагрузок ГТУ в условиях моноблочного режима ПГУ.

При работе ПГУ на номинальной нагрузке ВНА находится в максимально открытом положении ( $\varphi = 0$  град.). Установлено, что эффективная работа ВНА характерна для относительной мощности ГТУ, составляющей  $75 \div 100$  % от номинальной величины. Тогда для поддержания оптимального значения  $\alpha''_{ГТУ} = 3 \div 4$ , в зависимости от  $N_{ГТУ}$  и  $t_{нар}$ , угол открытия ВНА  $\varphi$  должен находиться в пределах  $0 \div 30$  град. (рис. 2) и изменяться согласно следующей зависимости, град.:

$$\varphi = 2,25(30 - t_{нар})^{0,33} - k_1(N_{ГТУ} - 80)^{0,91}, \quad (1)$$

где  $k_1 = 2,58 - 0,21(30 - t_{нар})^{0,44}$ .

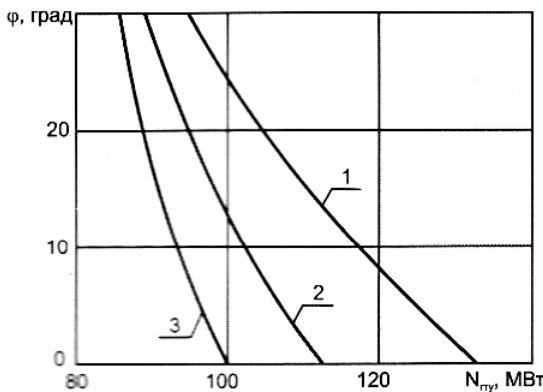


Рис. 2 Изменение угла открытия ВНА компрессора ГТУ в зависимости от ее электрической мощности и температуры наружного воздуха  $t_{нар}$ : 1 –  $-30$  °C; 2 –  $-15$  °C; 3 –  $30$  °C

Когда  $t_{нар} = 30$  °C, снижение  $N_{ГТУ}$  на 16 МВт, до 84 МВт, обеспечивается поворотом лопаток ВНА на предельную величину ( $\varphi = 30$  град.). При этом в случае  $t_{нар} = -30$  °C снижение электрической мощности ГТУ более чем глубокое (на 27 МВт).

Для возможного диапазона нагрузок ГТУ ( $82,5 \div 130$  МВт) применительно к зоне эффективного действия ВНА ( $\varphi = 0 \div 30$  град.) ее электрическая мощность при снижении  $t_{нар}$  от  $30$  °C до  $-30$  °C изменяется согласно следующим зависимостям (рис. 3), МВт:

- при  $t_{нар} < 0$  °C

$$N_{ГТУ} = 131 - \varphi^{1,06} - k_2(30 + t_{нар})^{1,05}, \quad (2)$$

где  $k_2 = 0,4 - 0,18\varphi^{0,19}$ ;

- при  $t_{нар} \geq 0$  °C

$$N_{ГТУ} = 119 - 0,8\varphi - k_3 t_{нар}^{1,05}, \quad (3)$$

где  $k_3 = 0,63 - 0,0006\varphi^{1,7}$ .

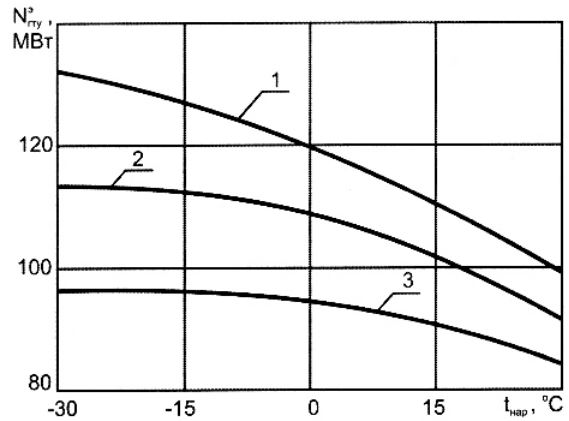


Рис. 3. Изменение электрической мощности ГТУ в зависимости от температуры наружного воздуха и угла открытия ВНА  $\varphi$ : 1 –  $0$  град.; 2 –  $15$  град.; 3 –  $30$  град.

В пределах  $t_{нар} = 0 \div 30$  °C для всех значений  $\varphi$  величина  $N_{ГТУ}$  существенно возрастает (в  $1,17 \div 1,2$  раза). При низких  $t_{нар}$  ( $-30 \div 0$  °C) и максимально открытом ВНА ( $\varphi = 0$  град.) величина  $N_{ГТУ}$  возрастает в меньшей мере (на 11 %). В случаях высоких значений  $\varphi$  ( $15 \div 30$  град.) значения  $N_{ГТУ}$  возрастают незначительно (на  $2 \div 5$  МВт).

За счет сокращения энергозатрат на работу ОК ГТУ для  $N_{ГТУ} = 90 \div 110$  МВт, когда  $\varphi = 0 \div 7,5$  град., при снижении  $t_{нар}$  от  $30$  до  $-30$  °C КПД ГТУ возрастает от  $32,8 \div 33,1$  до  $36,3 \div 36,8$  % (рис. 4) согласно следующим зависимостям, %:

- при  $t_{нар} < 0$  °C

$$\eta_{ГТУ} = 37,1 - 0,15\varphi - k_4(t_{нар} + 30)^{1,04}, \quad (4)$$

где  $k_4 = 0,055 - 0,013\varphi^{0,4}$ ;

- при  $t_{нар} \geq 0$  °C

$$\eta_{ГТУ} = 35,1 - 0,057\varphi^{1,06} - k_5 t_{нар}^{1,04}, \quad (5)$$

где  $k_5 = 0,06 - 0,00083\varphi$ .

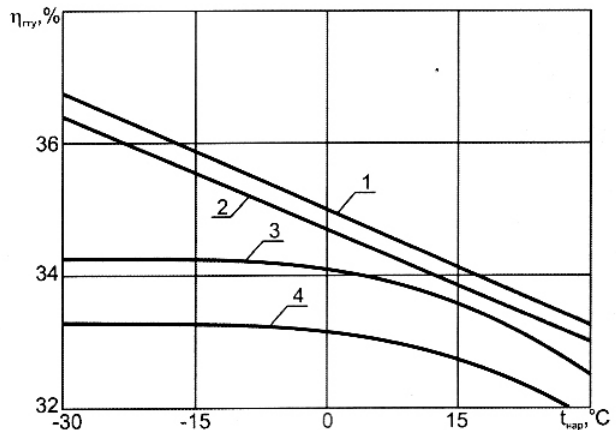


Рис. 4. Изменение КПД ГТУ в зависимости от температуры наружного воздуха и угла открытия ВНА  $\varphi$ : 1 –  $0$  град.; 2 –  $7,5$  град.; 3 –  $15$  град.; 4 –  $30$  град.

В случаях пониженных температур  $t_{нар} = -30+0$  °С и низких нагрузок  $N_{ГТУ}$ , когда  $\varphi = 15+30$  град., значения КПД ГТУ изменяются незначительно (на 0,1+0,2 %).

Расход природного газа в КС ГТУ определяется изменением приращений величины  $N_{ГТУ}$  и  $\eta_{ГТУ}$ , кг/с:

$$V = \frac{100N_{ГТУ}}{\eta_{ГТУ}Q_p^p}, \quad (6)$$

где  $Q_p^p$  – располагаемая теплота топлива, МДж/кг [5].

Теплосодержание топлива не превышает 1 % от его теплоты сгорания 49,4 МДж/кг. Тогда расход природного газа в зависимости от определяющих факторов рассчитывается по следующим уравнениям, кг/с:

- при  $t_{нар} < 0$  °С

$$V = 7,1 - 0,023\varphi^{1,18} - k_6(t_{нар} + 30)^{1,05}, \quad (7)$$

где  $k_6 = (7 - 0,34\varphi^{0,91})10^{-3}$ ;

- при  $t_{нар} \geq 0$  °С

$$V = 6,84 - 0,013\varphi^{1,3} - k_7 t_{нар}^{1,7}, \quad (8)$$

где  $k_7 = 0,02 - 0,000015\varphi^{1,8}$ .

В диапазоне  $\varphi = 0+30$  град., согласно топливной характеристике, при снижении  $t_{нар}$  от 30 до  $-30$  °С величина  $N_{ГТУ}$  возрастает на 15+31 %, а КПД ГТУ на 4+11 %. Поэтому, по сравнению с минимальными значениями (5,15+6,1 кг/с), расход топлива возрастает в 1,1+1,17 раза, достигая при  $t_{нар} = -30$  °С и  $\varphi = 0+7$  град. значений 6,75+7,1 кг/с (рис. 5).

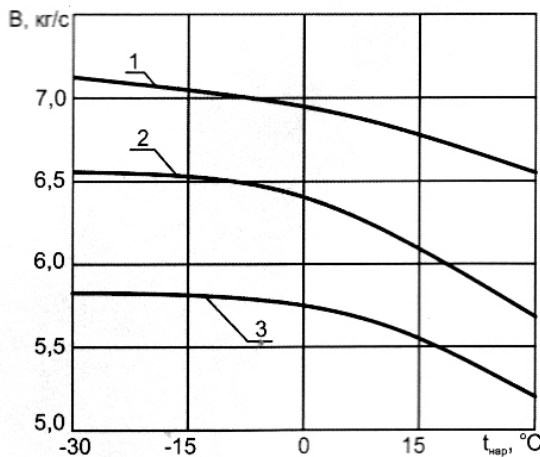


Рис. 5. Изменение расхода топлива в КС ГТУ в зависимости от температуры наружного воздуха при различных углах открытия ВНА  $\varphi$ : 1 – 0 град.; 2 – 15 град.; 3 – 30 град.

Для снижения мощности установки  $N_{ГТУ}$  уменьшают расход топлива в КС. Одновременно с помощью ВНА осевого компрессора ГТУ снижают расход окислителя. При номинальных значениях  $N_{ГТУ}$  ВНА открыт полностью.

Закрытие ВНА поворотом его лопаток на 30 град. обеспечивает эффективное снижение нагрузки агрегата в диапазоне  $(0,7+1,0)N_{ГТУ}^{ном}$  при оптимальных значениях коэффициента избытка воздуха  $\alpha''_{ГТУ} = 3+4$  [1, 2].

В зоне эффективного действия ВНА ( $\varphi = 0+30$  град.) изменение расходов газов за ГТУ в зависимости от определяющих факторов рассчитывается согласно следующему уравнению (рис. 6), кг/с:

$$G_{ГТ}'' = 403 - 0,044\varphi^2 - 0,73(t_{нар} + 30)^{1,09}. \quad (9)$$

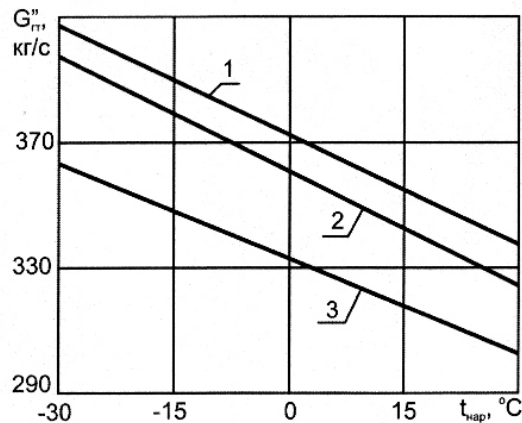


Рис. 6. Изменение расхода газов за ГТ в зависимости от температуры наружного воздуха и угла открытия ВНА  $\varphi$ : 1 – 0 град.; 2 – 15 град.; 3 – 30 град.

Для всех значений  $\varphi$  в случаях снижения температуры наружного воздуха от 30 до  $-30$  °С величина  $G_{ГТ}''$  возрастает на 17+24 %. При неизменных  $t_{нар}$  и увеличении  $\varphi$  от 0 до 15 град. расход газов резко снижается.

Оценка необходимого положения лопаток ВНА для обеспечения требуемых параметров газов на входе в КУ осуществляется с помощью зависимости, град.:

$$\varphi = 4,77 \left[ 403 - G_{ГТ}'' - 0,73(t_{нар} + 30)^{1,09} \right]^{0,5}. \quad (10)$$

С использованием уравнений (7)–(9) расход воздуха в КС ГТУ можно определить по формуле, кг/с,

$$G_B = G_{ГТ}'' - V. \quad (11)$$

Температура газов за ГТУ имеет важное значение для работы КУ и показателей ПГУ в целом. В случаях, когда  $t_{нар}$  выше 5 °С, температура газов за ГТУ повышается от 520 до 540+550 °С и определяется согласно следующей зависимости (рис. 7), °С:

$$g_{ГТ}'' = 520 + 0,8(t_{нар} - 5). \quad (12)$$

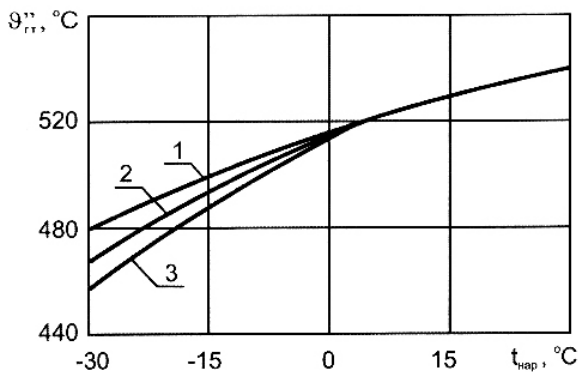


Рис. 7. Изменение температуры газов за ГТУ в зависимости от температуры наружного воздуха при различных углах открытия ВНА φ: 1 – 0 град.; 2 – 15 град.; 3 – 30 град.

При  $t_{нар} < 5 \text{ } ^\circ\text{C}$  с увеличением  $\varphi$  до 30 град. температура газов за ГТУ снижается на  $20+25 \text{ } ^\circ\text{C}$  согласно зависимости,  $^\circ\text{C}$ ,

$$t_{гг}^* = 520 - k_8 (5 - t_{нар})^{1,14}, \quad (13)$$

где  $k_8 = 0,97 + 0,036\varphi^{1,08}$ .

Для исключения эрозионного износа элементов проточной части ЦНД паровой турбины марки К-110-6,5 температура пара перед ней не должна быть ниже  $430 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Температурный напор на входе в КУ (тракт ВД) составляет  $30+40 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Поэтому минимальное значение температуры газов за ГТУ, по условию надежности работы энергоблока в целом, должно превышать  $455 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Данное значение обеспечивается величиной  $\varphi = 30 \text{ град.}$ , которой соответствуют нагрузки  $N_{ГТУ} = 80+85 \text{ МВт}$ .

Для оребренных труб испарительного пакета коэффициент теплопередачи определяется, преимущественно, величиной коэффициента теплоотдачи конвекцией, пропорциональной расходу газов. Понижение значения этого коэффициента при дополнительном снижении температурного напора ведет к ухудшению тепловосприятия парогенерирующей поверхности. Поэтому при увеличении  $\varphi$  от 0 до 30 град. паропроизводительность контура ВД снижается согласно следующим зависимостям, т/ч:

- при  $t_{нар} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$D_{ВД} = 165 - 0,73\varphi - 0,25(0,1 - t_{нар})^{1,1}; \quad (14)$$

- при  $t_{нар} \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$D_{ВД} = 165 - 0,73\varphi - 0,09t_{нар}. \quad (15)$$

Для всех значений  $\varphi$  и  $t_{нар}$  температура пара ВД на  $20+30 \text{ } ^\circ\text{C}$  ниже соответствующей величины  $t_{гг}$ .

В случаях  $t_{нар} \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  температура острого пара независимо от величины  $\varphi$  равна (рис. 8),  $^\circ\text{C}$ ,

$$t_{ВД} = 491 + 0,8t_{нар}. \quad (16)$$

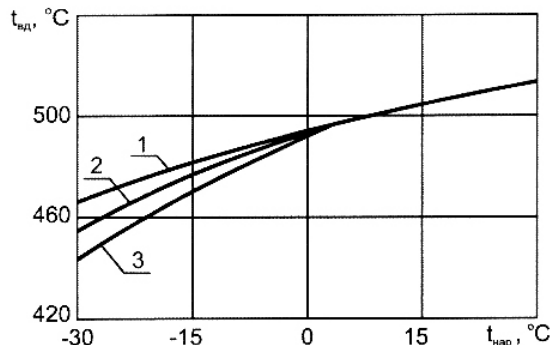


Рис. 8. Изменение температуры пара ВД за КУ при моноблочном режиме ПГУ в зависимости от температуры наружного воздуха при различных углах открытия ВНА φ: 1 – 0 град.; 2 – 15 град.; 3 – 30 град.

При  $t_{нар} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  с увеличением величины  $\varphi$  и снижении нагрузки ГТУ за счет ухудшения тепловосприятия пароперегревателя ВД температура пара за КУ уменьшается согласно зависимости,  $^\circ\text{C}$ ,

$$t_{ВД} = 491 - k_9 (0,1 - t_{нар})^{1,05}, \quad (17)$$

где  $k_9 = 0,83 + 0,012\varphi^{1,15}$ .

По условию надежности работы последних ступеней ПТ, снижение величины  $t_{ВД}$  ограничивается значениями  $430+440 \text{ } ^\circ\text{C}$  [6]. При температурном напоре на входе в газодом пароперегревателя ВД, равном  $25+30 \text{ } ^\circ\text{C}$ , минимально допустимая температура  $t_{гг}^* = 455 \text{ } ^\circ\text{C}$  при максимальной степени закрытия ВНА ( $\varphi = 30 \text{ град.}$ ) обеспечивается при  $t_{нар} = -(20+25 \text{ } ^\circ\text{C})$  и  $N_{ГТУ} = 80+83 \text{ МВт}$ .

Применительно к моноблочному режиму работы ПГУ для диапазона  $t_{нар} = -30+0 \text{ } ^\circ\text{C}$  паропроизводительность контура НД при снижении температуры наружного воздуха линейно возрастает от  $28+31$  до  $31+36 \text{ т/ч}$  согласно зависимостям, т/ч:

- при  $\varphi = 0+18 \text{ град.}$

$$D_{НД} = 35,5 - 0,13(30 + t_{нар}); \quad (18)$$

- при  $\varphi = 19+30 \text{ град.}$

$$D_{НД} = 31,5 - 0,11(30 + t_{нар}). \quad (19)$$

При  $t_{нар}$  выше  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  расход пара за пароперегревателем НД с увеличением значения  $\varphi$  снижается на  $3+4 \text{ т/ч}$  согласно зависимости, т/ч,

$$D_{НД} = 32,5 - 0,14\varphi - 0,13t_{нар}. \quad (20)$$

В случаях снижения нагрузки ГТУ с увеличением угла открытия ВНА температура  $t_{НД}$  мало зависит от величины  $\varphi$  (абсолютная погрешность составляет менее  $1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). С увеличением  $t_{нар}$  в пределах  $-30+30 \text{ } ^\circ\text{C}$  температура пара контура НД возрастает на  $5+7 \text{ } ^\circ\text{C}$  согласно зависимости,  $^\circ\text{C}$ ,

$$t_{НД} = 208,5 + 0,11(30 - t_{нар}). \quad (21)$$

Эффективность КУ определяется отношением его тепловосприятия на выработку пара ВД и НД к теплосодержанию уходящих из ГТУ газов в КУ [4].

Так как изменение значений теплоемкости газов за ГТУ в интервале температур 90+560 °С не превышает 2% [7], то КПД КУ можно оценить по формуле, %

$$\eta_{КУ} = 100 \frac{\vartheta'_{КУ} - \vartheta_{уХ}}{\vartheta_{КУ}}, \quad (22)$$

где  $\vartheta'_{КУ}$ ,  $\vartheta_{уХ}$  – температуры соответственно на входе и выходе из КУ, °С.

Для дубль-блочного режима ПГУ максимальные значения температуры уходящих из КУ газов составляют  $\vartheta_{уХ} = 99+101$  °С.

Применительно к моноблочному режиму ПГУ температура  $\vartheta_{уХ}$  за КУ, по сравнению с дубль-блочным режимом, на 1,5+11 °С ниже за счет пониженного давления рабочей среды.

При снижении нагрузки ГТУ до минимально допустимой (80 МВт), когда значение  $\varphi$  достигает 30 град., температура уходящих газов в зависимости от  $t_{нар}$  и  $\varphi$  может рассчитываться согласно зависимости (рис. 9), °С,

$$\vartheta_{уХ} = 94,6 - 0,0005\varphi^{2,3} - 0,033(30 + t_{нар})^{1,04}. \quad (23)$$

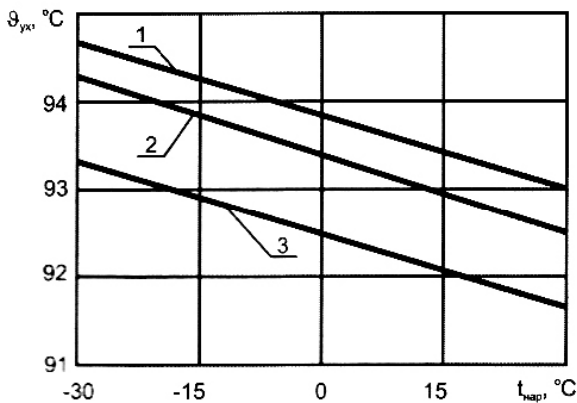


Рис. 9. Изменение температуры уходящих газов из КУ при моноблочном режиме ПГУ в зависимости от температуры наружного воздуха при различных углах открытия ВНА  $\varphi$ : 1 – 0 град.; 2 – 15 град.; 3 – 30 град.

Если  $t_{нар}$  снижается от 30 до –30 °С, то значения  $\vartheta_{уХ}$  увеличиваются на 1,5+2,0 °С. При снижении нагрузки ГТУ, когда величина  $\varphi$  возрастает в пределах 0+30 град., значение  $\vartheta_{уХ}$  понижается в той же мере.

Применительно к рабочему диапазону нагрузок одной ГТУ (80+130 МВт), в зоне эффективного действия ВНА, когда  $\varphi = 0+30$  град., в зависимости от  $t_{нар}$ , температуры газов на входе в КУ находятся в пределах 466+546 °С. Тогда возможные значения КПД КУ равны  $\eta_{КУ} = 79+83$  % (рис. 10).

В диапазоне  $t_{нар} = -30+0$  °С с увеличением  $\varphi$  от 0 до 30 град., когда температура  $\vartheta''_{ГТ}$  составляет 455+510 °С, КПД КУ изменяется согласно зависимости (рис. 7), %

$$\eta_{КУ} = 81,9 - k_{10}(0,1 - t_{нар})^{1,1}, \quad (24)$$

где  $k_{10} = 0,037 + 0,00035\varphi^{1,33}$ .

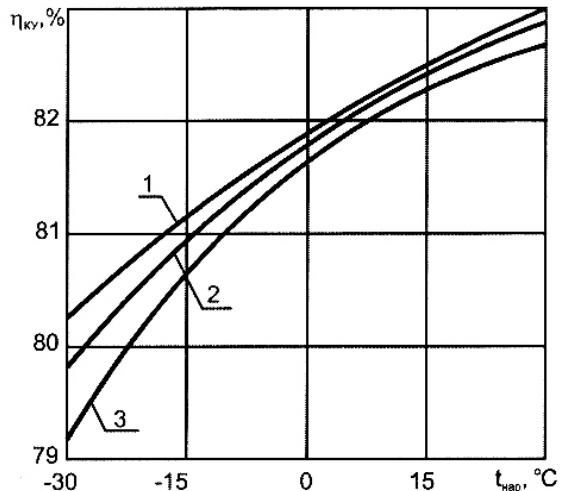


Рис. 10. Изменение КПД КУ при моноблочном режиме ПГУ в зависимости от температуры наружного воздуха при различных углах открытия ВНА  $\varphi$ : 1 – 0 град.; 2 – 15 град.; 3 – 30 град.

При минимальной  $t_{нар} = -30$  °С величина  $\eta_{КУ}$  снижается на 1,3 %. С увеличением  $t_{нар}$  до 30 °С, когда  $\varphi$  возрастает от 0 до 30 град.,  $\eta_{КУ}$  снижается в пределах 81,7+83 % согласно зависимости, %

$$\eta_{КУ} = 81,8 + k_{11}t_{нар}^{0,98}, \quad (24)$$

где  $k_{11} = 0,037 + 0,0002\varphi$ .

Параметры пара ВД и НД оказывают влияние на нагрузку ПТ  $N_{ПТ}$  и, как следствие, на общую электрическую мощность ПГУ.

Для моноблочного режима ПГУ максимальное значение мощности ПТ соответствует температурам  $t_{нар} = -5+5$  °С. Когда  $t_{нар} = -30+30$  °С, величина мощности ПТ с увеличением  $\varphi$  в пределах 0+30 град. снижается согласно зависимости, МВт,

$$N_{ПТ} = 57 - 0,068\varphi^{1,4} - 0,033(0,1 - t_{нар})^{1,47}. \quad (25)$$

Значение  $N_{ПТ}$  снижается, преимущественно, за счет понижения  $\vartheta''_{ГТ}$ , на 3+7 МВт.

Наивысшее значение  $N_{ПТ}$  соответствует максимальной нагрузке ГТУ, когда  $\varphi = 0+5$  град.

При более высоких температурах  $t_{нар}$  нагрузка ПТ снижается от 50+56 до 43+48 МВт согласно зависимости, МВт,

$$N_{ПТ} = 57 - 0,068\varphi^{1,4} - 0,91t_{нар}^{0,63}. \quad (26)$$

Несмотря на высокие значения  $\vartheta''_{ГТ}$ , снижение  $N_{ПТ}$  обусловлено пониженным расходом газов и ухудшением тепловосприятия рабочих поверхностей нагрева.

Для  $t_{нар} = 0+30$  °С изменение мощностей всей ПГУ аналогично изменению  $N_{ПТ}$  (рис. 11).

С увеличением угла открытия ВНА в пределах  $\varphi = 0+30$  град. электрическая мощность ПГУ снижается на 20+25 МВт согласно зависимости, МВт,

$$N_{ПГУ} = 177 - 1,1\varphi^{0,98} - 1,25t_{нар}^{0,83}. \quad (27)$$

Минимальные значения  $N_{ПГУ} = 124+156$  МВт характерны для  $t_{нар} = 20+30$  °С. В случаях низких температур величина  $N_{ПГУ}$  меняется незначительно (на 4+7 МВт) согласно зависимости, МВт,

$$N_{ПГУ} = 177 - 1,1\varphi^{0,98} + k_{12}(0,1 - t_{нар}), \quad (28)$$

где  $k_{12} = 0,17 + 0,011\varphi$ .

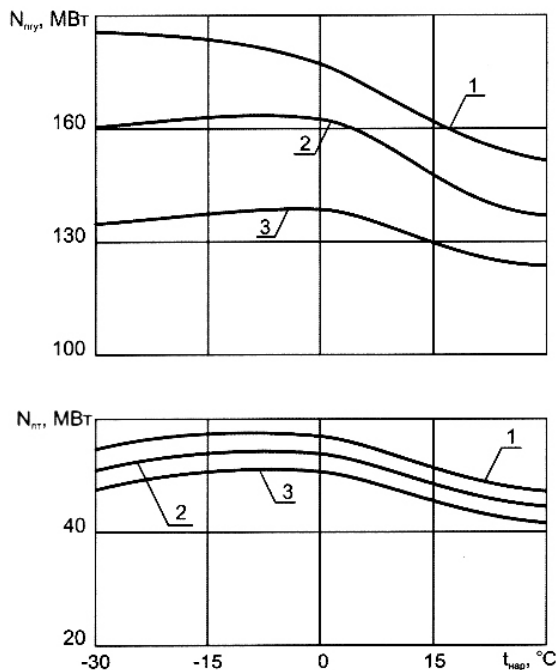


Рис. 11. Изменение мощности ПТ и ПГУ при моноблочном режиме ПГУ в зависимости от температуры наружного воздуха при различных углах открытия ВНА  $\varphi$ : 1 – 0 град.; 2 – 15 град.; 3 – 30 град.

В случаях низких температур  $t_{нар}$  при малой степени открытия ВНА ( $\varphi = 0+5$  град.) нагрузка  $N_{ПГУ}$  увеличивается на 1+6 МВт за счет превышения мощности ГТУ снижения значений  $N_{ПТ}$ .

Изменение КПД ПГУ брутто  $\eta_{ПГУ}$  повторяет характер зависимости  $N_{ПГУ}$  от величины  $t_{нар}$  (рис. 13). Максимальные значения  $\eta_{ПГУ} = 50,3+51,9$  % соответствуют температурам 5+10 °С. При  $t_{нар}$  менее 7 °С

КПД ПГУ снижается согласно зависимости, %,

$$\eta_{ПГУ} = 51,5 - 0,65\varphi^{0,51} + k_{13}(30 + t_{нар})^{0,88}, \quad (29)$$

где  $k_{13} = 0,02 + 0,011\varphi^{0,6}$ .

При всех значениях  $\varphi$  КПД ПГУ уменьшается на 1+1,5 % за счет снижения мощности ПТ из-за существенного понижения температуры газов за ГТУ 9<sup>гг</sup>.

В случаях высоких температур  $t_{нар} = 7+30$  °С за счет повышения КПД КУ на 1+1,3 % и улучшения тепловосприятости его поверхностей нагрева КПД ПГУ рассчитывается по формуле, %,

$$\eta_{ПГУ} = 51,8 - 0,016\varphi^{1,34} - 0,114(t_{нар} - 7)^{0,94}, \quad (30)$$

С увеличением  $\varphi$  в пределах 0+30 град. КПД ПГУ снижается от 50,3+51,9 % до 48+49,7 %. При этом удельный расход условного топлива составляет  $b_y = 0,237+0,284$  кг/(кВт·ч).

В случае дубль-блочного режима ПГУ при максимальном закрытии ВНА ( $\varphi = 30$  град.) и снижении мощности каждой ГТУ до  $N_{ГТУ} = 55+64$  МВт КПД энергоблока равен  $\eta_{ПГУ} = 41+42$  %. Поэтому при минимальной нагрузке энергоустановки (50+60 %) наиболее экономичным является моноблочный режим ее работы при максимальной мощности одной ГТУ, когда  $\eta_{ПГУ}$  оказывается на 7+9 % выше.

#### Список литературы

1. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций; Под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.
3. Демин А.М. Автоматизация технологических процессов на тепловых электрических станциях: Учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2004.
4. Батенко А.В., Тишин К.П., Сладков Н.Е. Перспективный проект отечественной ПГУ-325 // Газотурбинные технологии. – 2009. – № 7. – С. 2–6.
5. Тепловой расчет котлов: нормативный метод: Под. ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора и др. – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998.
6. Турбина паровая К-110-6,5 для ПГУ-325. Расчетно-справочные данные (8600001 РР 0201).
7. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962.

Мошкарин Андрей Васильевич,  
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций,  
 телефон (4932) 41-60-56,  
 адрес: г. Иваново, ул. Голубева, д. 6, кв. 86,  
 e-mail: admin@tes.ispu.ru

Шельгин Борис Леонидович,  
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 кандидат технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,  
 телефон (4932) 41-60-56,  
 e-mail: admin@tes.ispu.ru

Жамлиханов Тимур Абдульверович,  
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 аспирант, ассистент кафедры тепловых электрических станций,  
 телефон: (4932) 41-60-56, 8-915-821-56-26, 8-920-346-44-89,  
 e-mail: admin@tes.ispu.ru