

Влияние определяющих факторов на изменение мощности ПГУ-325

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

Представлены аналитические и графические зависимости статических характеристик энергоблока при различных нагрузках ГТУ и температур наружного воздуха. Приведен сравнительный анализ показателей работы ПГУ-325 в режимах моноблока и дубль-блока.

Ключевые слова: парогазовая установка (ПГУ), газотурбинная установка (ГТУ), температура наружного воздуха, КПД, электрическая мощность, котел-утилизатор, моноблок, дубль-блок.

Influence of Major Factors on CCGT-325 MW Power Changing

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

Analytical and graphic dependences of power unit static characteristics at various loadings of GT and external air temperatures are presented. The comparative analysis of CCGT-325 MW operating parameters in modes of a monoblock and two-boiler single-turbine unit is resulted.

Keywords: CCGT, gas turbo unit (gas turbine), outdoor temperature, coefficient of efficiency, electric power, HRSG, monoblock, two-boiler single-turbine unit.

Используя АСУ энергоблока, в зависимости от изменяющихся исходных условий ($N_{ГТУ}$ и $t_{нар}$), оперативно определяются значения выходных технологических характеристик рабочих процессов энергоустановки [1].

Статические характеристики получены применительно к энергоблоку ПГУ-325 ОАО «Ивановские ПГУ», в состав которого входит следующее основное оборудование:

- две газотурбинные установки ГТЭ-110 производства ОАО «НПО САТУРН» [2];

- котел-утилизатор (КУ) марки «П-88» (Е-155/35-7,2/0,7-501/231) производства ОАО «ИК ЗиОМАР» [3];

- конденсационная паротурбинная установка К-110-6,5 производства ОАО «Силовые машины ЛМЗ» [4].

Исследование проводилось в интервале относительных нагрузок ГТУ $(0,3 \div 1)N_{ном}$ для диапазона температур наружного воздуха $t_{нар} = -38 \div +38$ °С при использовании в качестве топлива природного газа с теплотой сгорания $Q_{н.р}^P = 49,4$ МДж/кг [5]. Регулирование мощности паровой турбины (ПТ) осуществлялось либо с помощью регулирующих клапанов, либо с помощью регулятора давления ПТ путем изменения давления пара в контуре ВД.

При работе одной ГТУ и пониженном расходе газов уменьшаются паропроизводительность контуров ВД и НД и соответствующие значения давления пара. В зависимости от $t_{нар}$, при предельных электрических нагрузках $N_{ГТУ} = 90 \div 130$ МВт расходы пара составляют $D_{ВД} = 65 \div 75$ т/ч и $D_{НД} = 23 \div 36$ т/ч.

Так как температура газов на входе в КУ $t_{ку}$ от количества ГТУ практически не зависит, то температура пара ВД близка к значениям $t_{ВД}$ для дубль-блочного режима ПГУ. Температура $t_{НД}$, по сравнению с дубль-блочным режимом, на $15 \div 20$ °С выше. Параметры пара ВД и НД оказывают влияние на

нагрузку ПТ $N_{ПТ}$ и, как следствие, на общую электрическую мощность ПТУ $N_{ПТУ}$. Для дубль-блочного режима ПГУ при $t_{нар} = -38 \div +38$ °С максимальные значения $N_{ПТ} = 95 \div 115$ МВт соответствуют нагрузкам ГТУ $N_{ГТУ} = 100 \div 130$ МВт (рис. 1).

При уменьшении $N_{ГТУ}$ в результате падения значений расхода, давления и температуры пара ВД и НД электрическая мощность ПТ, МВт, снижается пропорционально величине $D_{ВД}$ согласно зависимости (рис. 1)

$$N_{ПТ} = 24 - 0,024(38 - t_{нар})^{1,51} + k_1(N_{ГТУ} - 28)^{0,81}, \quad (1)$$

где $k_1 = 2,7 - 0,001(38 - t_{нар})^{1,93}$.

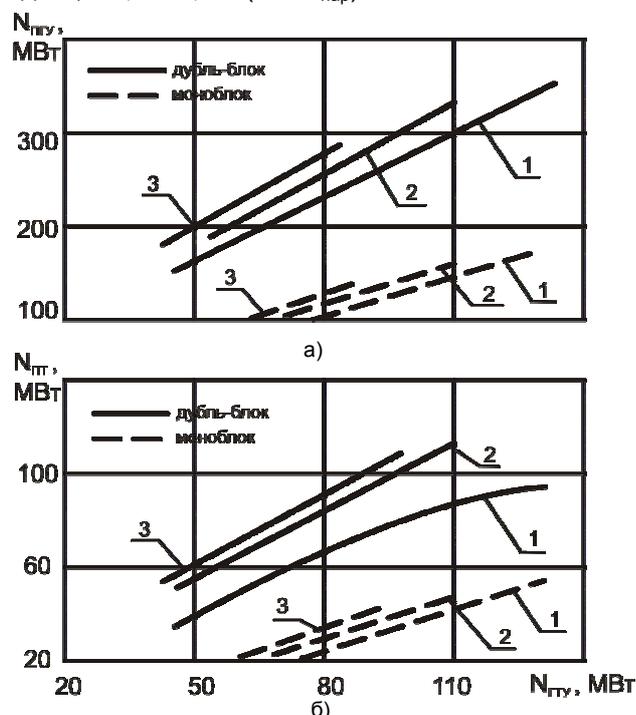


Рис. 1. Изменение мощности ПГУ(а) и ПТ(б) и в зависимости от режима работы ПГУ, электрической мощности ГТУ и температуры наружного воздуха $t_{нар}$: 1 – -38 °С; 2 – 15 °С; 3 – 38 °С

С ростом температуры $t_{нар}$ возрастает тем-

пература газов за ГТУ и значение $t_{вд}$. Поэтому наибольшие значения $N_{пт}$ характерны для высоких температур: $t_{нар} = 15 \div 38$ °С. Для минимально допустимых нагрузок ГТУ (60÷75 МВт) мощность ПТ составляет 45÷85 МВт.

Мощность ПГУ, МВт, изменяется согласно зависимости (рис. 1)

$$N_{пгу} = 145 - 1,33(38 - t_{нар})^{0,69} + 3,43(N_{гту} - 45)^{0,96}. \quad (2)$$

В диапазоне нагрузок $N_{гту} = 85 \div 130$ МВт с увеличением $t_{нар}$ от -38 до $+38$ °С значения $N_{пгу}$ снижаются с 360 до 280 МВт. Значения минимальной нагрузки составляют 160÷190 МВт.

Для моноблочного режима ПГУ закономерности измерения $N_{пт}$ и $N_{гту}$ аналогичны характеристикам дубль-блочного режима (рис. 1). Обратный характер зависимости расхода и температуры пара НД не оказывает существенного влияния на величину мощности ПТ, которая не превышает 55 МВт. Максимальная нагрузка ПГУ (170÷180 МВт) достигается при температурах ниже -25 °С. При этом мощность ПТ уменьшается из-за снижения расхода и температуры пара ВД.

Для дубль-блочного режима ПГУ характер изменения температуры уходящих газов аналогичен зависимости температуры $t_{нд}$ от $N_{гту}$ (рис. 2). Максимальные значения $\vartheta_{ух}$ = 99÷101 °С, в зависимости от $t_{нар}$, соответствуют номинальной мощности ГТУ 100÷130 МВт.

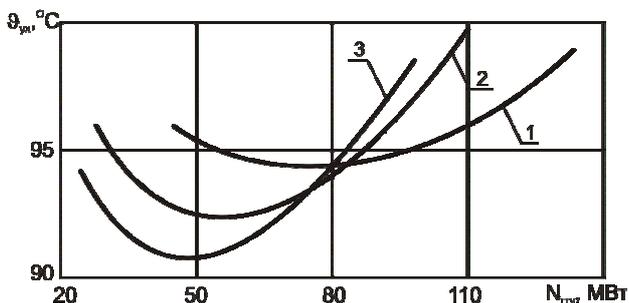


Рис. 2. Изменение температуры уходящих газов при дубль-блочном режиме работы ПГУ в зависимости от электрической мощности ГТУ и температуры наружного воздуха $t_{нар}$: 1 – -38 °С; 2 – 15 °С; 3 – 38 °С

При снижении нагрузки до минимально допустимой (65 МВт) температура уходящих газов снижается до $91 \div 93$ °С согласно зависимости

$$\vartheta_{ух} = 91,5 + k_2(N_{гту} - 65)^{1,1}, \quad (3)$$

$$\text{где } k_2 = 0,167 - 0,0083(38 - t_{нар})^{0,55}.$$

С увеличением $t_{нар}$ от -38 до $+38$ °С возрастают температуры газов на входе в КУ, а температура $\vartheta_{ух}$ увеличивается на $8 \div 10$ °С (рис. 2). В моноблочном режиме значения $\vartheta_{ух}$ на $1,5 \div 11$ °С ниже из-за более низкого давления рабочей среды.

С понижением $t_{нар}$ от $+38$ до -38 °С значение $\vartheta_{ух}$ возрастает на $1,5 \div 2,5$ °С из-за ухудшения тепловосприятия поверхностей нагрева КУ при минимальных температурных напорах.

Для нагрузок одной ГТУ (55÷110 МВт) температуры газов на входе в КУ находятся в пре-

делах $400 \div 550$ °С. При этом возможные значения КПД КУ равны $\eta_{ку} = 75 \div 83$ % (рис. 3).

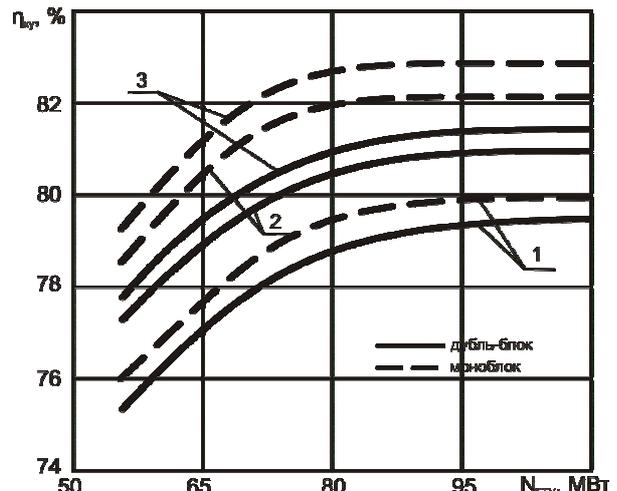


Рис. 3. Изменение КПД КУ в зависимости от режима работы ПГУ, электрической мощности ГТУ и температуры наружного воздуха $t_{нар}$: 1 – -38 °С; 2 – 15 °С; 3 – 38 °С

Максимальные значения КПД КУ ($79 \div 83$ %) характерны для нагрузок ГТУ выше 82,5 МВт. С ростом $t_{нар}$ в пределах от -38 до $+38$ °С значения КПД КУ, %, возрастают согласно зависимости

$$\eta_{ку} = \kappa_{реж}[79,3 + 0,23(38 + t_{нар})^{0,5}]. \quad (4)$$

Для дубль-блочного режима $\kappa_{реж} = 1$, для моноблочного – $\kappa_{реж} = 1,03$. В моноблочном режиме ПГУ значения КПД КУ выше за счет более низких температур $\vartheta_{ух}$. При нагрузках ГТУ менее 80 МВт существенно снижаются температуры $\vartheta_{ку}$ из-за повышенных значений $\alpha = 4,5 \div 5,5$, что заметно снижает КПД КУ до $75 \div 79$ %.

Изменение КПД ПГУ брутто $\eta_{пгу}$ повторяет характер зависимости КПД ГТУ от ее мощности. При падении нагрузки от 120 до 65 МВт КПД ГТУ $\eta_{гту}$ снижается с $34 \div 37$ до $21 \div 24$ %.

Аналогичным образом в случае дубль-блочного режима КПД ПГУ, %, снижается в $1,3 \div 1,5$ раза согласно зависимости (рис. 4)

$$\eta_{пгу} = 31,4 - 0,03(38 + t_{нар})^{1,3} + 1,95(N_{гту} - 25)^{0,54}. \quad (5)$$

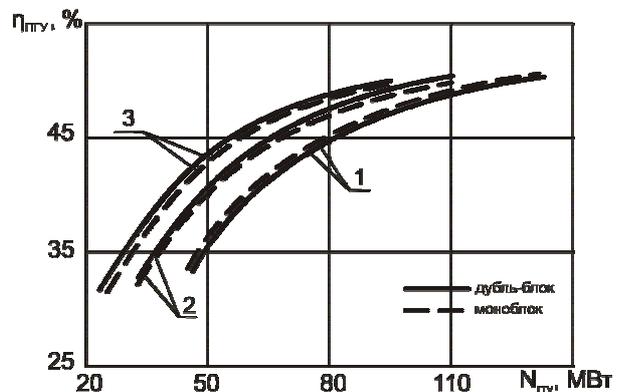


Рис. 4. Изменение КПД ПГУ в зависимости от режима работы ПГУ, электрической мощности ГТУ и температуры наружного воздуха $t_{нар}$: 1 – -38 °С; 2 – 15 °С; 3 – 38 °С

Максимальные значения КПД ПГУ (50÷51,5 %) достигаются при высоких нагрузках $N_{\text{ГТУ}} = 85\div 130$ МВт, когда обеспечиваются оптимальные значения коэффициента избытка воздуха (3,0÷4,0). С увеличением $t_{\text{нар}}$ от -38 до 38 °С величина $\eta_{\text{ПГУ}}$ возрастает на 4–6 %. Для диапазона возможных нагрузок энергоустановки удельный расход условного топлива в камеру сгорания (КС) ГТУ составляет $b_y = 0,25\div 0,34$ кг/(кВт·ч).

При снижении нагрузки ПГУ до минимальной возможны два режима:

1) дубль-блочный (при снижении нагрузки каждой ГТУ до минимально допустимого значения $N_{\text{ГТУ}}^{\text{МИН}} = 55$ МВт);

2) моноблочный (при останове одной и повышении нагрузки другой ГТУ до номинального значения $N_{\text{ГТУ}}^{\text{НОМ}} = 110$ МВт).

Сравнительный анализ проводился при расчетных температурах наружного воздуха 15 и 0 °С, т.е. при средних значениях исследуемого диапазона $t_{\text{нар}}$. Расчетные характеристики сведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Показатели работы дубль-блока ПГУ-325 при электрической нагрузке каждой ГТУ $N_{\text{ГТУ}} = 55$ МВт

Наименование характеристики	$t_{\text{нар}} = 0^\circ\text{C}$	$t_{\text{нар}} = 15^\circ\text{C}$
Температура газов на входе в КУ $\vartheta_{\text{КУ}}, ^\circ\text{C}$	400	410
Расход газов в КУ $G_{\text{КУ}}, \text{кг/с}$	668	640
Суммарная электрическая мощность двух ГТУ $N_{\text{ГТУ}}, \text{МВт}$	110	110
КПД ГТУ $\eta_{\text{ПГУ}}, \%$	29,6	28,9
Температура газов на выходе из КУ $\vartheta_{\text{УХ}}, ^\circ\text{C}$	94,0	92,1
Электрическая мощность ПТ $N_{\text{ПТ}}, \text{МВт}$	53	58
Электрическая мощность ПГУ $N_{\text{ПГУ}}, \text{МВт}$	163	168
КПД КУ $\eta_{\text{КУ}}, \%$	77,5	78,0
КПД ПГУ $\eta_{\text{ПГУ}}, \%$	43,0	42,6
Удельный расход условного топлива в камеру сгорания ГТ $b_y, \text{кг/(кВт·ч)}$	0,286	0,288

В обоих вариантах суммарная электрическая нагрузка газовых турбин составляет 110 МВт. Для моноблочного режима и неизменной $N_{\text{ГТУ}}$ постоянство общей мощности ПГУ (159÷163 МВт) при $t_{\text{нар}} = 0\div 15$ °С в случае снижения $\vartheta_{\text{КУ}}$ на 21 °С обеспечивается повышением расхода газов от 365 до 376 кг/с.

КПД ГТУ имеет максимальное значение (34,1÷35,1 %). В случае одинаковых температур уходящих газов (93,5÷94,0 °С) КПД КУ постоянен (80,7÷81,0 %).

Мошкарин Андрей Васильевич,

Ивановский государственный энергетический университет,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Шельгин Борис Леонидович,

Ивановский государственный энергетический университет,
кандидат технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Таблица 2. Показатели работы моноблока ПГУ-325 при электрической нагрузке одной ГТУ $N_{\text{ГТУ}} = 110$ МВт

Наименование характеристики	$t_{\text{нар}} = 0^\circ\text{C}$	$t_{\text{нар}} = 15^\circ\text{C}$
Температура газов на входе в КУ $\vartheta_{\text{КУ}}, ^\circ\text{C}$	503	524
Расход газов в КУ $G_{\text{КУ}}, \text{кг/с}$	376	365
Суммарная электрическая мощность двух ГТУ $N_{\text{ГТУ}}, \text{МВт}$	110	110
КПД ГТУ $\eta_{\text{ПГУ}}, \%$	35,1	34,1
Температура газов на выходе из КУ $\vartheta_{\text{УХ}}, ^\circ\text{C}$	94,0	93,5
Электрическая мощность ПТ $N_{\text{ПТ}}, \text{МВт}$	49	53
Электрическая мощность ПГУ $N_{\text{ПГУ}}, \text{МВт}$	159	163
КПД КУ $\eta_{\text{КУ}}, \%$	80,7	81,0
КПД ПГУ $\eta_{\text{ПГУ}}, \%$	51,9	51,0
Удельный расход условного топлива в камеру сгорания ГТ $b_y, \text{кг/(кВт·ч)}$	0,237	0,241

Наибольшее значение КПД ПГУ (51÷51,9 %) достигается при работе в моноблочном режиме.

Применительно к дубль-блочному режиму мощность каждой ГТУ составляет минимальную величину – 55 МВт. По сравнению с моноблочным режимом, расход газов возрастает в 1,7÷1,8 раза за счет заметного роста коэффициента избытка воздуха α до 4,5÷5,5. При снижении температуры $\vartheta_{\text{КУ}}$ до 400÷410 °С КПД ГТУ уменьшается на 4,5÷5,5 %, а КПД КУ – на 3÷3,5 % (до значений 77,8÷78,0 %).

Заключение

По сравнению с моноблочным режимом, КПД ПГУ при неизменной мощности 163÷168 МВт на 8,4÷8,9 % ниже и составляет 42,6÷43,0 %. Таким образом, по условию эффективности при пониженной нагрузке дубль-блочный режим выглядит менее предпочтительным.

Список литературы

1. **Ольховский Г.Г.** Энергетические газотурбинные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **Газотурбинная** энергетическая установка ГТЭ-110 для ПГУ-325. Руководство по эксплуатации. Ч. 1. Описание и работа (097108000 РЭ). – НПК «Зоря»–«Машпроект», 2004.
3. **Котел-утилизатор** паровой Е-155/35-7,2/0,7-501/231 (П-88) для ПГУ-325 ОАО «Ивановские ПГУ». Инструкция по эксплуатации. – ОАО «Испытательный стенд Ивановской ГРЭС», г. Комсомольск. ОАО «Ивановские ПГУ», 2005.
4. **Турбина** паровая К-110-6,5 для ПГУ-325. Расчетно-справочные данные (8600001 РР 0201). ЛМЗ. – СПб., 2006.
5. **Газотурбинные** и паровые установки тепловых электростанций; под ред. С.В. Цанева. – М.: изд-во МЭИ, 2002.

Жамлиханов Тимур Абдульверович,
Ивановский государственный энергетический университет,
аспирант, ассистент кафедры тепловых электрических станций,
телефон: (4932) 41-60-56,
e-mail: admin@tes.ispu.ru