

УДК 621.311.22

Анализ показателей работы ПГУ-325 на частичных нагрузках

Мошкарин А.В., д-р техн. наук, Мельников Ю.В., асп., Торгов В.В., студ.

Приведены результаты численных исследований отечественной ПГУ-325 с газовыми турбинами ГТД-110. Показаны зависимость показателей нижнего цикла ПГУ от нагрузки ГТУ и температуры наружного воздуха и сравнительная эффективность работы ПГУ с одной ГТУ вместо двух в режимах глубокой разгрузки.

Ключевые слова: Парогазовая установка, режимы работы, численные исследования.

The analysis of indicators of the CCGT-325 MW on partial loadings

Melnikov Y.V., Torgov V.V., Moshkarin A.V.

Results of numerical researches of parameters of the Russian CCGT-325 MW with GTE-110 gas turbines are resulted. Dependence of indicators of the bottoming cycle on gas turbine loading and on external air temperature is discussed. Comparative efficiency of an CCGT operating mode with one gas turbine instead of two on small loadings is shown.

Key words: Combined cycle with gas turbine, operating modes, numerical researches.

В инвестиционных программах генерирующих компаний РФ в 2009–2012 г. предусмотрен ввод одноцелевых моно- и дубль-блоков ПГУ на природном газе мощностью 325, 400 и 800 МВт.

В условиях неопределенности будущей объемов спроса на электроэнергию вероятной становится ситуация, при которой энергоблоки, запроектированные на работу с базовой электрической нагрузкой, после ввода в эксплуатацию будут работать на частичной нагрузке. Так, в 70–80-х годах прошлого века в отечественной энергетике была актуальной проблема повышения маневренности блоков СКД 300 и 800 МВт, спроектированных как базовые. В аналогичных условиях могут оказаться и вновь вводимые парогазовые энергоблоки. Поэтому оценка показателей их работы на частичных нагрузках весьма актуальна.

ПГУ обладают лучшими показателями маневренности по сравнению с ПТУ, хотя экономичность последних более устойчива к изменению нагрузки энергоблока. Так, на относительной нагрузке 60 % КПД моноблока ПГУ-400 с ГТУ Alstom и Siemens меньше номинального на 3,5–5 %, в то время как КПД паротурбинного блока К-300-23,5 меньше всего на 1,5 % [4, 5, 6]. Главная причина более резкого падения КПД ПГУ со снижением нагрузки – уменьшение КПД ГТУ из-за падения ее полезной мощности.

Обеспечение экономичности ПГУ на частичных нагрузках может дать парогазовым энергоблокам дополнительное преимущество по сравнению с ПТУ и позволит энергокомпаниям максимизировать прибыль, особенно в условиях работы на балансирующем сегменте оптового рынка электроэнергии и мощности.

Блоки ПГУ-325 и ПГУ-800 сконструированы по схеме 2xГТУ+2xКУ+1xПТУ и поэтому относятся к дубль-блокам. Цель предлагаемого исследования – сравнение снижения экономичности дубль-блоков ПГУ (на примере ПГУ-325) и моноблоков [6] в режимах глубокой разгрузки.

Тепловая схема ПГУ-325 представлена на рис. 1. Энергоблок сконструирован по трехвальтовой схеме с двумя котлами-утилизаторами (КУ) двух давлений без промпрегрева. Предусмотрена рециркуляция питательной воды для поддержания безопасной температуры на входе в ЭНД. Паровая турбина состоит из ЦВСД и ЦНД, между которыми

предусмотрен сепаратор. Конденсат отводится в конденсатосборник конденсатора.

Испытания головных образцов ПГУ-325 проводились 20 мая 2008 г. персоналом «Ивановских ПГУ» совместно с представителями ВТИ. В работу были запущены обе ГТУ.

Показатели работы установки приведены в табл. 1.

Для оценки режимов работы реального объекта – энергоблока ПГУ-325 в г. Комсомольске – использована математическая модель этого энергоблока, созданная в программе Boiler Designer [2].

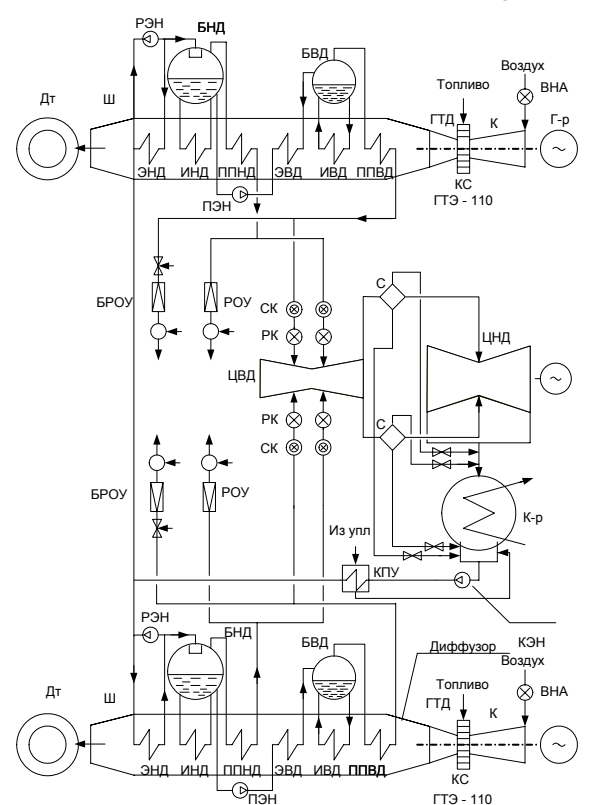


Рис. 1. Тепловая схема ПГУ-325: К – компрессор; ГТД – газотурбинный двигатель; ПЕ – пароперегреватель; Э – экономайзер; И – испарительный пакет; Б – барабан; ВД, СД, НД – контуры высокого, среднего и низкого давления

Таблица 1. Показатели работы ПГУ-325 во время испытаний 20.05.2008

Наименование величин	Значение
ГТУ	
Температура наружного воздуха, °С	22,7
Барометрическое давление, кПа	99,9
Относительная влажность воздуха, %	61,3
Мощность ГТУ, МВт	103,2
КПД ГТУ, %	34,5
Расход газов, кг/с	347,8
Температура газов, °С	501,3
КУ (суммарно)	
Расход пара из КВД, кг/с	68,7
Давление на выходе из КВД, МПа	6,58
Температура пара на выходе из КВД, °С	485,8
Расход пара на выходе из КНД, кг/с	20,4
Давление на выходе из КНД, МПа	0,63
Температура пара контура НД, °С	235,8
Температура газов на выходе КУ, °С	119,4
ПТУ	
Расход пара в ЦВД, кг/с	69,4
Давление пара на входе в ЦВД, МПа	6,60
Температура пара перед СК ЦВД, °С	481,8
Объемный расход пара на выходе из КВД, тыс. м³/ч	12,4
Расход пара в ЦНД, кг/с	79,5
Давление пара в перемычке НД, МПа	0,60
Температура пара перед СК ЦНД, °С	233,0
Объемный расход пара на входе в ЦСД, тыс. м³/ч	108,9
Мощность ПТУ, МВт	95,4
ПГУ	
Мощность ПГУ, МВт	301
КПД ПГУ, %	50,3

На рис. 2 приведено изображение модели ПГУ-325.

Предварительные расчеты показали, что модель описывает свойства реального объекта с недостаточной степенью точности. Так, расчеты для давления в контурах 6,58 / 0,63 МПа, расхода газов ГТУ 348 кг/с и температуры газов на выходе ГТУ 501 °С (см. табл. 1) показывают мощность ПТУ при-

мерно 99,7 МВт против 95,4 МВт, полученных в ходе испытаний. В результате расчетный КПД ПГУ брутто составляет 51,2 % против фактического 50,5 %.

Главной причиной такого расхождения явилось завышение расчетной паропроизводительности контура высокого давления КУ примерно на 10 % при 3 %-м занижении паропроизводительности контура низкого давления. Очевидно, на реальном объекте средние коэффициенты теплопередачи в поверхностях нагрева контура ВД оказались ниже запроектированных. В результате фактическая температура газов на входе в ПЕНД оказалась выше проектной, что, в свою очередь, привело к увеличению средних температурных напоров в поверхностях нагрева контура НД и, как следствие, к увеличению паропроизводительности контура НД.

В ходе наладки модели ПГУ-325 в соответствии с результатами испытаний была принята гипотеза о том, что значения коэффициентов эффективности и коэффициентов использования поверхностей нагрева [3] котлов-утилизаторов ПГУ, которые учитывают ухудшение теплопередачи из-за неравномерного омывания поверхности нагрева дымовыми газами, частичного перетекания газов помимо нее, образования застойных зон и загрязнений, оказались ниже проектных величин.

Настройка модели производилась итерационно. В итоге со значениями коэффициентов использования и эффективности на 10–30 % ниже проектных величин математическая модель ПГУ-325 дала полную сходимость на номинальном режиме и удовлетворительную сходимость в режимах «полублока», в том числе на частичных нагрузках при различных температурах наружного воздуха.

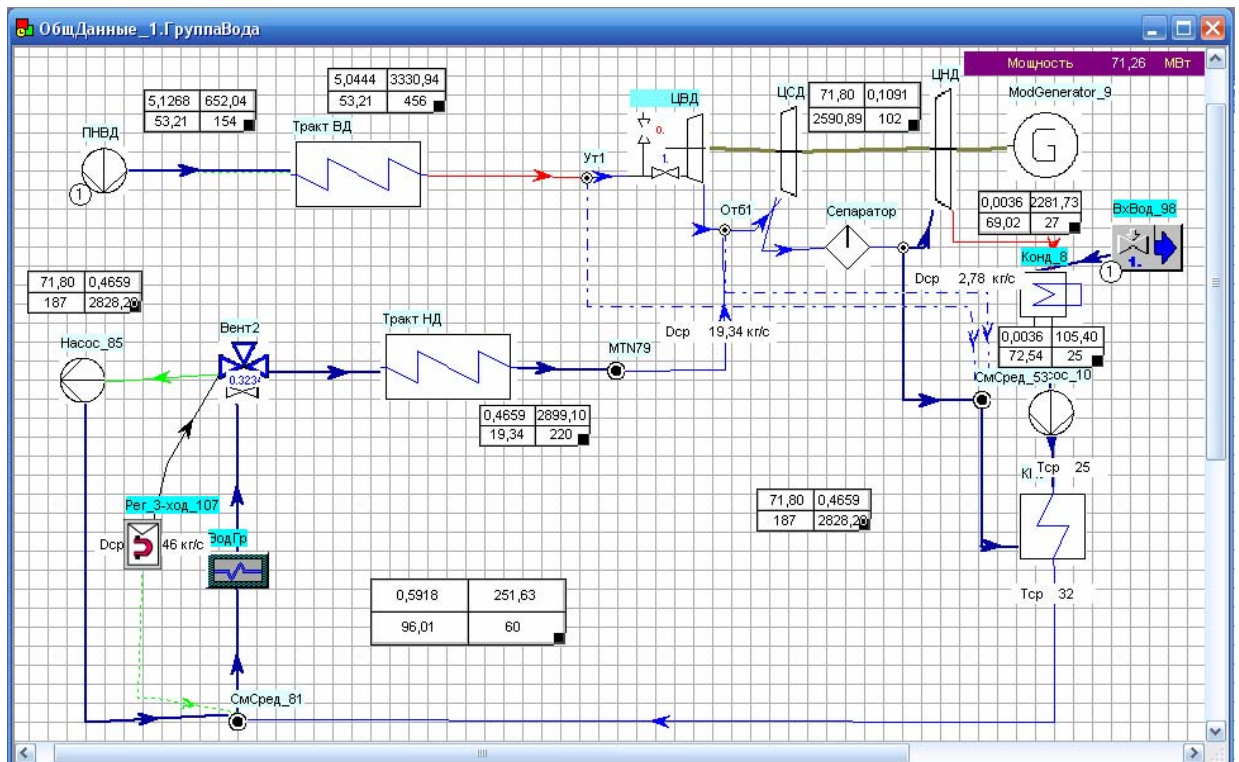


Рис. 2. Изображение модели тепловой схемы ПГУ-325 в программе Boiler Designer

Сравнение фактических энергетических показателей ПГУ с рассчитанными по модели представлено в табл. 2.

Таблица. 2. Сравнение фактических энергетических показателей ПГУ-325 с расчетными

$t_{н.в},$ °C	Мощность ПГУ, МВт		КПД ПГУ, %		Относительное отклонение, %
	факт	модель	факт	модель	
-1,0	131	131,0	47,9	48,0	0,3
-1,9	129	130,0	47,5	47,8	0,6
-2,4	140	139,4	48,8	48,7	-0,2
8,0	140	139,7	48,8	48,8	0,1
8,6	140	140,1	48,6	48,6	-0,1
2,2	109	109,4	47,4	47,6	0,5
0,1	109	109,9	47,2	47,5	0,6
0,6	109	109,7	47,2	47,5	0,7
6,0	109	109,5	47,5	47,7	0,5
6,9	128	127,9	49,3	49,3	0,1
7,6	128	128,5	49,3	49,6	0,5
22,7	302	301,9	50,5	50,5	0,0

Среднее отклонение показателей составило 0,3 %.

Полученная модель ПГУ-325 использована для расчетной оценки показателей энергетической установки в режимах глубокой разгрузки.

В первой серии расчетов предполагалось, что разгрузка энергоблока осуществляется за счет параллельного сброса нагрузки на обеих работающих ГТУ (режим «блока»).

Для расчетов ПГУ были использованы данные о работе ГТД-110 при различных значениях относительной нагрузки и температуры наружного воздуха (рис. 3, 4), предоставленные производителем машины – ОАО «Сатурн – Газовые турбины» [1].

Согласно полученным зависимостям (рис. 3, 4), КПД ГТУ чувствителен к изменению мощности. На 50 %-й нагрузке при $t_{н.в} = 5$ °C он составляет 28,5 против 35,5 % на номинальной нагрузке. Номинальная мощность линейно растет с уменьшением $t_{н.в}$ до -15 °C, после чего поддерживается постоянной (133 МВт). КПД ГТУ при этом остается постоянным, а расход выхлопных газов снижается с одновременным увеличением их температуры.

При работе ГТУ на нагрузке 59 % температура выхлопных газов резко падает с уменьшением $t_{н.в}$, а расход газов увеличивается.

Результаты расчетов ПГУ-325 в режиме «блока» (обе ГТУ в работе) на частичных нагрузках при различных значениях $t_{н.в}$ показаны на рис. 5–10. Характер зависимостей параметров ПГУ-325 от n и $t_{н.в}$ подобен полученному ранее для ПГУ-400 с ГТУ фирм Alstom и Siemens [4, 5, 6]. Отличия определяются специфическими особенностями ГТД-110.

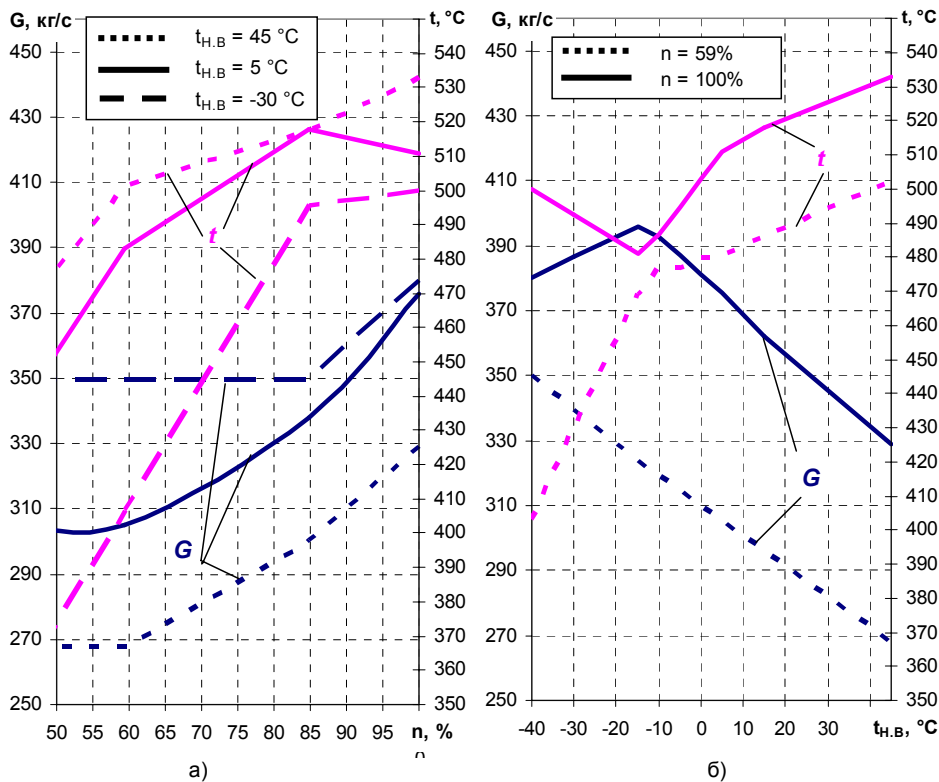


Рис. 3. Зависимость расхода и температуры газов за ГТД-110: а – от n ; б – от $t_{н.в}$

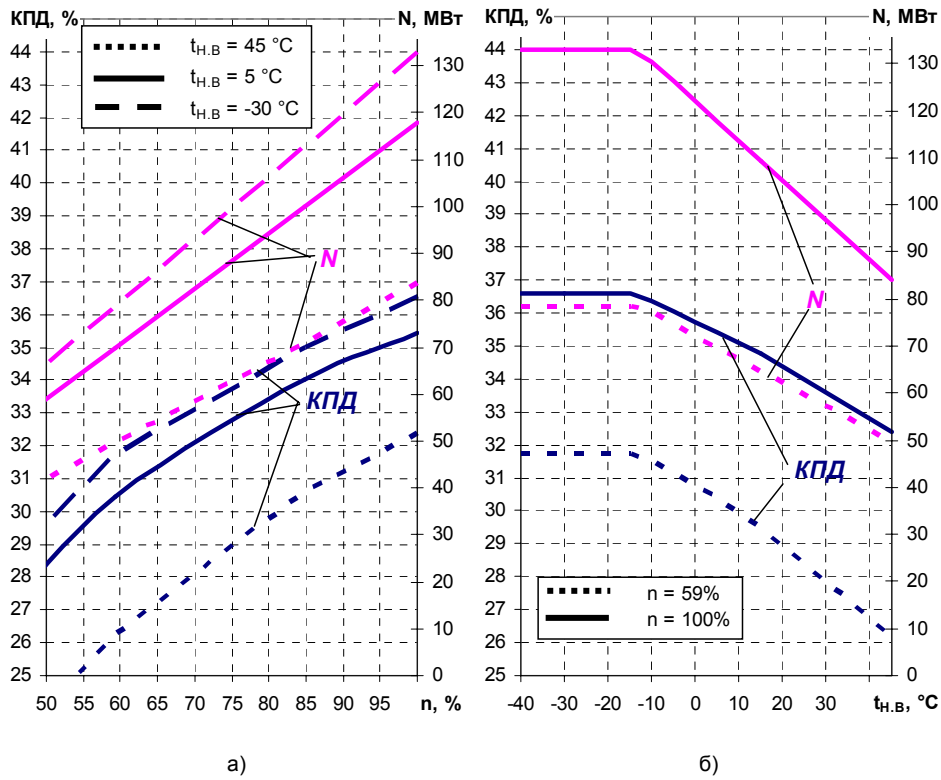


Рис. 4. Зависимость мощности и КПД ГТД-110: а – от η ; б – от $t_{н.в}$

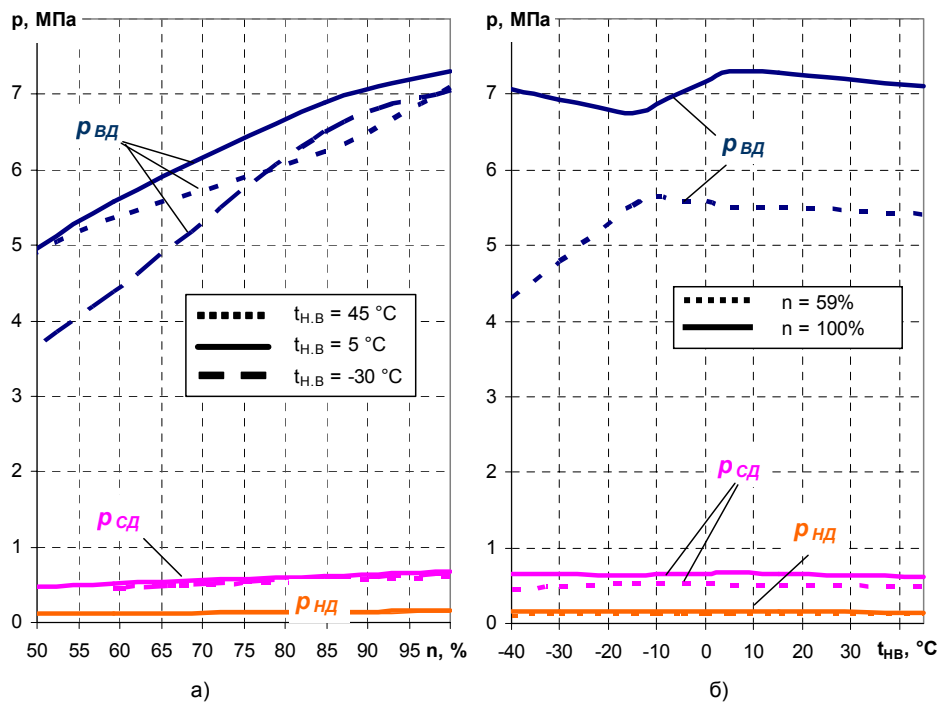


Рис. 5. Зависимость давлений в контурах ПГУ-325: а – от η ; б – от $t_{н.в}$

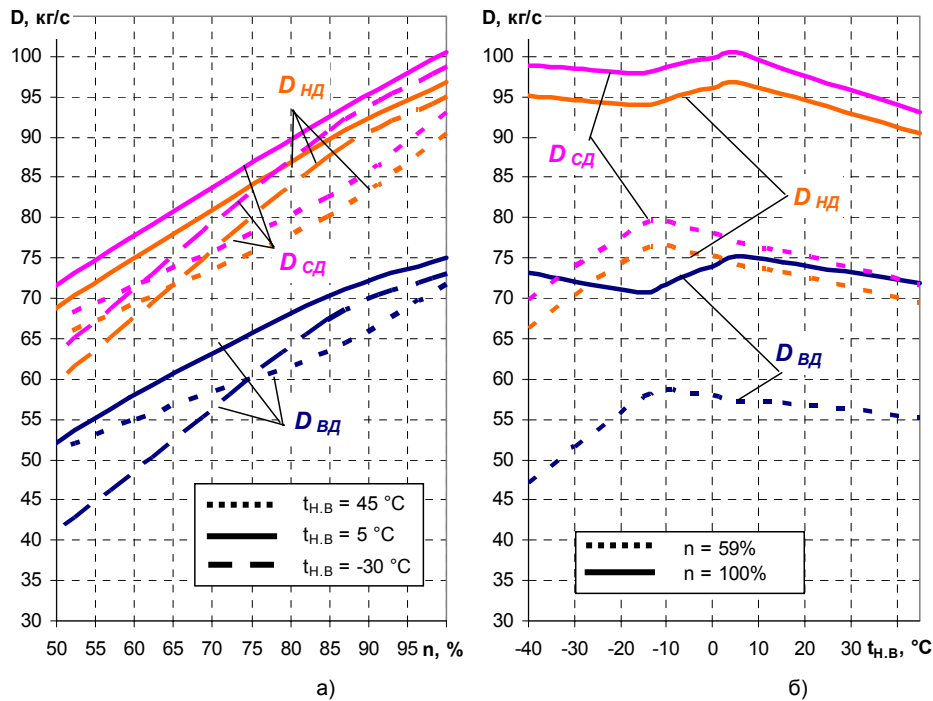


Рис. 6. Зависимость расходов пара на входе в ЦВД, ЦСД и ЦНД ПГУ-325: а – от η ; б – от $t_{н.в.}$

При моделировании принято, что ПТУ работает на скользящем давлении с полностью открытыми регулирующими клапанами турбины.

Изменение давлений в контурах КУ (рис. 5) в значительно большей степени зависит от η , чем от $t_{н.в.}$. Давления во всех контурах при разгрузке до 50 % снижаются на 30–50 %, в зависимости от температуры наружного воздуха. Это связано с уменьшением теплоты, отводимой от ГТУ в КУ, вследствие существенного снижения расхода и температуры выхлопных газов.

Расчеты показали, что расходы пара в цилиндры ПТУ (рис. 6) также в основном определяются величиной η и расходом выхлопных газов. Увеличение расхода выхлопных газов при наборе нагрузки и при снижении $t_{н.в.}$ вызывает увеличение расходов пара.

Графики зависимостей расходов и давлений пара от $t_{н.в.}$ имеют изломы в точках $t_{н.в.} = 5^\circ\text{C}$ и $t_{н.в.} = -15^\circ\text{C}$, которые объясняются изменением теплоты выхлопных газов ГТУ (см. рис. 8). На номинальной нагрузке при снижении $t_{н.в.}$ с 45 до 5°C тепловой выброс от ГТУ растет за счет значительного увеличения расхода выхлопных газов. При снижении $t_{н.в.}$ с 5 до -15°C тепловой выброс незначительно уменьшается из-за интенсивного снижения температуры газов. Дальнейшее падение $t_{н.в.}$ сопровождается ростом температуры выхлопных газов, сохранением Q_T почти на постоянном уровне, ростом КПД КУ и теплоты, передаваемой пару и воде.

Изменение скоростей газов по тракту котлоутилизаторов ПГУ-325 таково, что средние коэффициенты теплопередачи (рис. 7) снижаются на 6–10 % с разгрузкой обеих ГТУ до 50 %. С уменьшением $t_{н.в.}$ до -15°C коэффициенты теплопередачи линейно растут вместе с расходом выхлопных газов, а при дальнейшем снижении $t_{н.в.}$ снижаются.

Анализ полученных результатов показывает, что соотношение теплоты, передаваемой газами, и теплоты, воспринятой рабочей средой ПТУ, та-

ково, что КПД КУ растет при снижении нагрузки ГТУ до 85 % и повышении $t_{н.в.}$ от -15°C (рис. 8).

Мощность ПТУ при разгрузке ГТУ до 50 % снижается на 30–50 % (рис. 9) и слабо зависит от температуры наружного воздуха. Так, при номинальной нагрузке ГТУ мощность ПТУ всегда находится в пределах 100–106 МВт. Мощность ПГУ-325 снижается на 47 % с разгрузкой ГТУ до 50 %. Снижение температуры наружного воздуха с $+45$ до -15°C увеличивает мощность ПГУ на 35 % (около 95 МВт). При дальнейшем уменьшении $t_{н.в.}$ мощность ПГУ растет лишь незначительно (на 4 МВт), а на низких нагрузках – даже снижается. Это происходит вследствие упомянутого ранее резкого снижения температуры выхлопных газов при низких значениях $t_{н.в.}$ и η . При низких температурах газа эффективность утилизации в КУ уменьшается (см. рис. 8), а температура генерируемого пара также снижается, что отражается на теплоперепадах (особенно в ЦВД).

КПД ПГУ с разгрузкой на 47 % (на 150 МВт) снижается с 51,5 до 45 %. Температура наружного воздуха не так сильно влияет на КПД ПГУ, как на КПД ГТД-110 (см. рис. 4): номинальный КПД сохраняется на уровне 50–52 % в интервале $t_{н.в.}$ от -40 до $+45^\circ\text{C}$. Вместе с тем из-за ухудшения утилизации теплоты при низких значениях $t_{н.в.}$ и η КПД ПГУ падает вместе с мощностью ПТУ.

Таким образом, на нагрузке 50 % удельный расход топлива на ПГУ-325 больше номинального примерно на 13 %, тогда как на ГТД-110 он больше почти на 20 %. Наличие паровой турбины в ПГУ в целом несколько «гасит» эффект значительного уменьшения КПД ГТУ при глубокой разгрузке.

Вторая серия расчетов ПГУ-325 на модели была проделана для случая глубокой разгрузки с отключением одной из ГТУ и КУ, подключенного к ней (режим «полублока»).

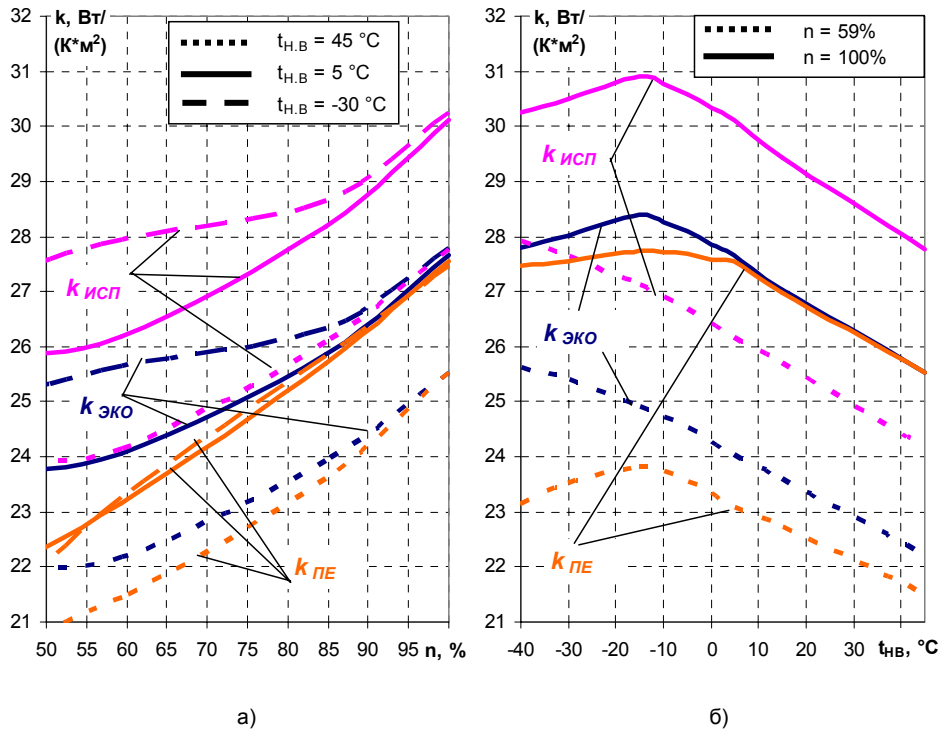


Рис. 7. Зависимость средних коэффициентов теплопередачи в поверхностях нагрева КУ ПГУ-325: а – от n ; б – от $t_{н.в}$

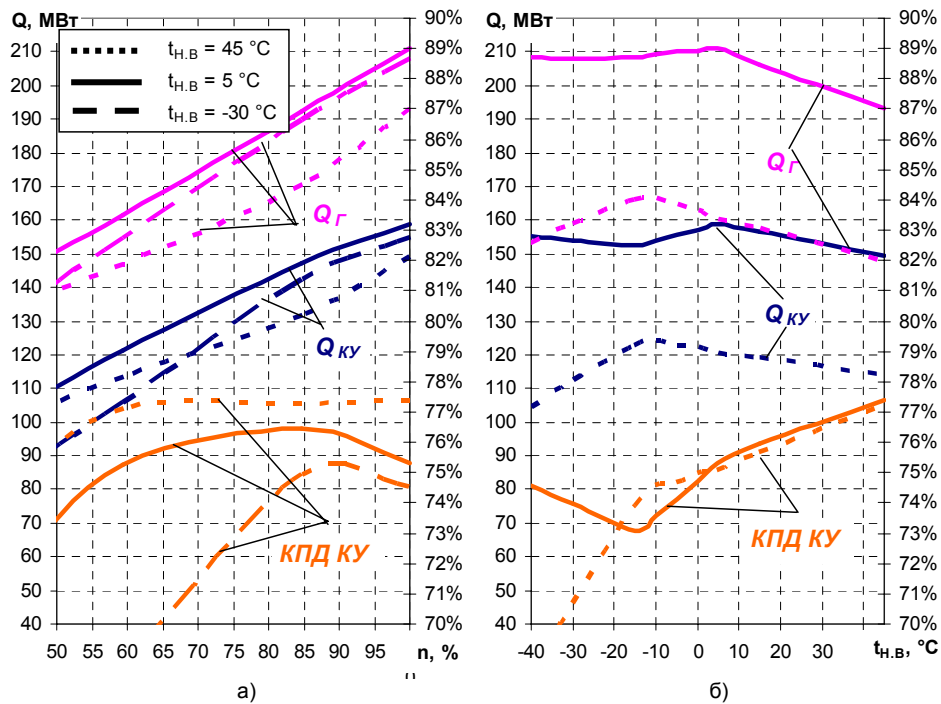


Рис. 8. Зависимость суммарного тепловосприятия КУ, тепловой мощности выхлопных газов ГТУ и КПД КУ ПГУ-325: а – от n ; б – от $t_{н.в}$

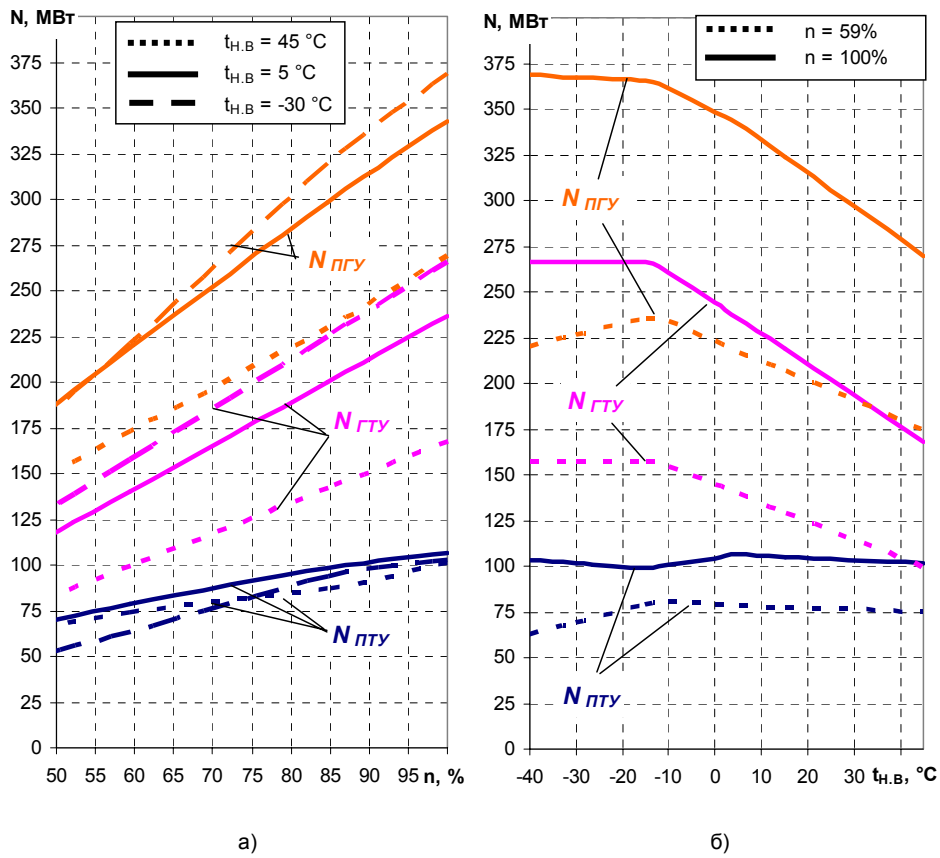


Рис. 9. Зависимость мощностей ГТУ, ПТУ и ПГУ дубль-блока ПГУ-325: а – от η ; б – от $t_{н.в}$

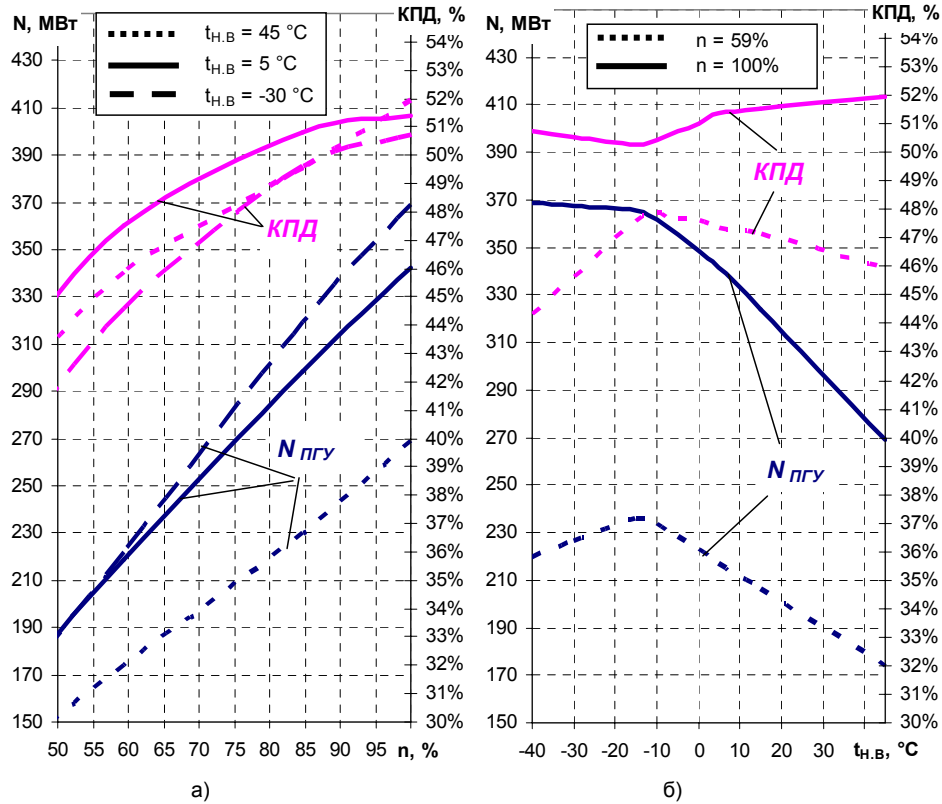


Рис. 10. Зависимость мощности и КПД дубль-блока ПГУ-325: а – от η ; б – от $t_{н.в}$

В этом случае расход пара через цилиндры турбины (при работе одной ГТУ в номинальном режиме) будет примерно в 2 раза меньше проектного. Расчеты по методике А.В. Щегляева [7] показывают, что в режиме работы на скользящих давлениях даже такое резкое снижение расхода практически не влияет на внутренние относительные КПД цилиндров паровой турбины, так как объемные пропуски пара уменьшаются незначительно.

Результаты расчетов энергетических параметров ПГУ-325 в режиме с двумя ГТУ (нагрузки ГТУ 40, 45 и 50 %) и одной (нагрузка ГТУ 100 %) представлены на рис. 11. Анализ результатов показывает, что во всем диапазоне температур наружного воздуха работа с одной ГТУ без ее перегрузки позволяет поддерживать мощность ПГУ не меньше, чем работа в режиме «блока» с загрузкой обеих ГТУ около 45 %.

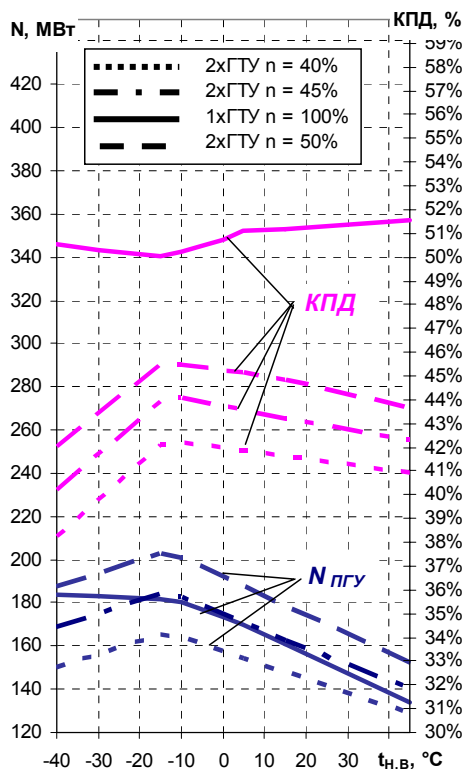


Рис. 11. Зависимость мощности и КПД ПГУ-325: а – от n; б – от t_{н.в.}

В режиме «блока» мощность и КПД ПГУ при низких значениях нагрузки ГТУ падают при снижении t_{н.в.} ниже -15 °C. В режиме «полублока» наблюдается обратный эффект. Если при температурах наружного воздуха выше -15 °C мощность «полублока» и мощность «блока» (n = 45 %) при-

мерно равны, то при меньших t_{н.в.} мощность «полублока» больше. Таким образом, при низких t_{н.в.} эффективность использования режима «полублока» повышается.

КПД «полублока» во всех режимах составляет 50–51,5 % против 38–45 % у «блока».

Перегрузка ГТУ, согласно [1], позволит увеличить мощность ПГУ в режиме «полублока» на 10 МВт и довести ее до величины 50 % мощности в режиме «блока». Следует отметить, что перегрузка отрицательно сказывается на надежности ГТУ.

Таким образом, режим работы с одной ГТУ и одним КУ позволяет получить экономию на удельном расходе топлива около 12 %.

Заключение

Снижение нагрузки на ПГУ-325 путем параллельного уменьшения мощности обеих ГТУ до достижения относительной нагрузки ГТУ в 45–50 % из-за резкого снижения КПД экономически оправдано. Снижение нагрузки ниже 45–50 % может быть осуществлено переводом ПГУ-325 в режим «полублока» с одной ГТУ, работающей на нагрузке, близкой к номинальной.

Перевод ПГУ-325 на малых нагрузках в режим «полублока» позволяет сохранить КПД ПГУ на высоком уровне (50–51,5 %) и получить экономию в удельном расходе топлива около 12 %, по сравнению с работой в режиме «блока».

При температурах наружного воздуха ниже -15 °C эффективность использования режима «полублока» повышается.

Список литературы

1. **Каталог** газотурбинного оборудования. – М.: ЗАО «Газотурбинные технологии», 2007.
2. **Расчет** котельных агрегатов с использованием современных программных продуктов: Учеб. пособие / Г.И. Доверман, Б.Л. Шельгин, А.В. Мошкарин, Ю.В. Мельников. – Иваново, 2007.
3. **Тепловой** расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского, Э.С. Карасиной. – М.: Энергия, 1973.
4. **Мошкарин А.В., Мельников Ю.В.** О влиянии характеристик газовых турбин на показатели работы мощных парогазовых блоков в переменных режимах // Энергосбережение и водоподготовка. – № 4. – 2007. – С. 32–35.
5. **Мошкарин А.В., Мельников Ю.В.** Оценка показателей работы мощных одноцелевых парогазовых и паросиловых энергоблоков на частичных нагрузках // Вестник ИГЭУ. – 2007. – № 2. – С. 3–6.
6. **Мельников Ю.В., Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л.** Анализ характеристик энергоблока ПГУ-400 на частичных нагрузках // Газотурбинные технологии. – № 9. – 2008. – С. 2–6.
7. **Щегляев А.В.** Паровые турбины. – М.: Энергоатомиздат, 1993.

Мошкарин Андрей Васильевич,

Ивановский государственный энергетический университет, зав. кафедрой тепловых электрических станций, доктор технических наук, профессор, адрес: г. Иваново, ул. Голубева, д. 6, кв. 86.

Торгов Владимир Викторович,

Ивановский государственный энергетический университет, студент, группа 5-2, тел. +7 920 345 1174

Мельников Юрий Викторович,

Ивановский государственный энергетический университет, аспирант кафедры тепловых электрических станций, тел. +7 903 888 3664