

УДК 621.311.22

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ПГУ ТРЕХ ДАВЛЕНИЙ В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

МОШКАРИН А.В., д-р техн. наук, МЕЛЬНИКОВ Ю.В., асп.

Изложена методика получения характеристик газотурбинной установки в различных режимах работы, приведены результаты исследований работы конденсационного энергоблока парогазовой установки трех давлений в различных установившихся режимах.

Ключевые слова: парогазовая установка, коэффициент полезного действия, температура наружного воздуха.

READINGS EVALUATION OF THREE-PRESSURE STEAM-TO-GAS SUPPLY UNIT OPERATING IN STEADY-STATE REGIMES

MOSHKARIN A.V., Ph.D., MELNIKOV Yu.V., postgraduate

The work represents the method gas-turbine unit characteristic obtaining in different operating regimes. There are also the investigation results of three pressure steam-to-gas supply unit steam power unit operating in different steady-state regimes.

Key words: steam-to-gas supply unit, efficiency factor, outdoor air temperature.

Одной из важных отличительных особенностей парогазовых установок (ПГУ), по сравнению с паротурбинными (ПТУ), является ярко выраженная зависимость энергетических показателей (мощность, КПД) ПГУ от параметров окружающего воздуха и от относительной нагрузки газотурбинной установки (ГТУ), входящей в ее состав. В результате изменения нагрузки ГТУ или параметров наружного воздуха меняются КПД ГТУ и характеристики уходящих газов, что обуславливает изменение паропроизводительности котла-утилизатора и давлений в его контурах. В свою очередь, изменение расхода пара меняет внутренний относительный КПД паровой турбины, параметры пара по всей проточной части и внутреннюю мощность цилиндров турбины.

Для определения характеристик работы ПГУ в различных статических режимах необходимо проводить поверочные расчеты всей установки. Одна из главных трудностей, возникающих при этом, заключается в сложном характере изменения характеристик ГТУ в различных режимах ее работы. Для получения этих зависимостей нужно детально знать конструкцию ГТУ, характеристики ее проточной части, камеры сгорания, конфигурацию входного направляющего аппарата компрессора и т.п. В силу того что в настоящее время на мировом рынке представлены несколько сотен энергетических ГТУ (различного типа и мощности, нескольких десятков производителей [2]), задача сбора информации об их конструкции представляется неразрешимой.

Потому единственным достоверным источником информации о характеристиках ГТУ в различных режимах являются данные компаний-производителей. Часто они имеют вид корреляционных зависимостей, полученных в результате испытаний стендовых образцов ГТУ.

В ходе разработки проекта утилизационной ПГУ-285К трех давлений на основе ГТУ Siemens SGT5-3000E (V94.2A) [1] авторами было проведено исследование режимов работы энергоблока, отличных от номинального. Для этого у компании Siemens были получены зависимости температуры и расхода газов за турбиной, начального давления, мощности и КПД ГТУ для ГТУ V94.3A и V94.2. Эти зависимости имеют общий вид

$$f_i = k_i \times f_i(p_1, p_2, t_{\text{нв}}, n),$$

где f_i – функция (температура газов за турбиной/ их расход/мощность ГТУ/КПД ГТУ); k_i – коэффициент пропорциональности; $p_{1,2}$ – потери давления на входе в компрессор и на выходе из турбины; $t_{\text{нв}}$ – температура наружного воздуха; n – относительная нагрузка ГТУ.

Два выражения (применительно к ГТУ V94.3A и V94.2) для какой-либо из четырех функций f_i различаются только коэффициентом пропорциональности k_i , что может объясняться конструктивным сходством V94.3A и V94.2. Исходя из этого, а также из того, что SGT5-3000E является модификацией ГТУ V94.3A, выполненной Siemens с целью снижения параметров рабочего тела и мощности при одновременном увеличении надежности, был сделан вывод, что для получения характеристик ГТУ SGT5-3000E в зависимости от параметров окружающей среды необходимо лишь правильно подобрать коэффициенты k_i . Этот подбор осуществлялся методами регрессионного анализа (с использованием принципа максимального правдоподобия [3]) на основе табличных данных о работе реальной ГТУ SGT5-3000E при различных температурах наружного воздуха, полученных нами у партнеров компании Siemens (см. таблицу).

Параметры ГТУ SGT5-3000E при различных значениях температуры наружного воздуха

Температура наружного воздуха, °С	-15	-5	0	5	15	25
Мощность ГТУ нетто, МВт	212,6	202,3	197,5	192,8	184	170,7
КПД ГТУ нетто, %	36,9	36,5	36,3	36,1	35,6	34,9
Расход уходящих газов, кг/с	563	544	534	525	504	480
Температура уходящих газов, °С	551	559	564	570	583	593

В итоге были получены следующие зависимости:

$$\eta = 36,565n(1-0,0055p_2)(1-0,006p_1) \times \sqrt{\frac{0,9981547-16,845509t^2+76,205025t^4+28,907438t^6}{1-17,741335t^2+88,63288t^4+5,8565087t^6}} \times \begin{cases} n > 0,53; & e^{-0,9284702+2,230308n-1,8197754n^2+0,51739463n^3} \\ n \leq 0,53; & \frac{0,0012524219+4,8795553n}{1+3,5979418n+0,68804739n^2} \end{cases}$$

$$N = 186,365n(1-0,0055p_2)(1-0,0155p_1)(1,79062 - 10,403986t^{2,0706071})$$

$$G = 513,603(1-0,01p_1)(-15,57067t^2 + 5,699622t + 0,650511) \times \begin{cases} n \leq 0,53, & 0,69+0,018868n \\ 0,53 < n \leq 1, & 0,2351n^2 + 0,27778n + 0,487657 \\ n > 1, & 1 \end{cases}$$

$$T = 567,44(1+0,003p_1)(1+0,003p_2)(217,9986t^4 - 109,6977t^3 + 7,362248t) \times \begin{cases} n = 1,1 \\ 0,53 < n < 1, & 0,099389n^2 + 0,881591n + 0,502131 \\ n > 1, & 1+0,25(n-1) \end{cases}$$

где N – мощность ГТУ; η – КПД ГТУ; G – расход газов за ГТУ; T – температура газов за ГТУ; p_{1,2} – потери давления на входе в компрессор и на выходе из турбины, кПа; t – температура наружного воздуха кельвин; n – относительная нагрузка ГТУ.

Проверка адекватности полученных уравнений регрессии проводилась с использованием критерия Фишера [3]. Установлено, что у всех четырех моделей критерий Фишера больше табличного (при данной степени свободы и уровне значимости), а значит, они адекватно описывают табличные данные (см. таблицу).

Многовариантные поверочные расчеты тепловой схемы энергоблока на основе полученных характеристик ГТУ проводились с использованием компьютерной программы «Boiler Designer» после определения всех конструктивных характеристик котла-утилизатора (КУ) и параметров тепловой схемы в номинальном режиме (n = 100 %, t_{нв} = 5 °С).

Модель была настроена на работу КУ со скользящими давлениями в контурах при полностью открытых регулирующих клапанах паровой турбины. При пересчете давлений в контурах учитывалось изменение паропроизводительности контуров котла и, как следствие, изменение давлений в проточной части цилиндров турбины. Также уточнялись КПД цилиндров паровой турбины. Давление в конденсаторе принималось постоянным для любого режима (5 кПа), температура питательной воды за счет рециркуляции поддерживалась на уровне 60 °С во избежание конденсации водяных паров на внешней поверхности трубок газового подогревателя конденсата (ГПК).

По результатам вариантных расчетов был проведен анализ зависимости определяющих параметров работы ПГУ от t_{нв} и n в установившихся ре-

жимах работы. В качестве определяющих параметров были выбраны следующие: мощность и КПД ПГУ нетто; температура уходящих газов; влажность пара на выходе ЧНД турбины; скорости газов, пара и воды в характерных точках; значения давлений и расходов пара в контурах ПГУ (рис. 1–5).

На графиках (рис. 1–5) просматриваются два излома кривых: при относительных нагрузках 53 и 100 %. Они объясняются технологией регулирования ГТУ. При сбросе нагрузки от номинальной мощность ГТУ регулируется, в основном, количественным методом (изменением положения входного направляющего аппарата компрессора ГТУ уменьшают расход воздуха и, как следствие, расход уходящих в КУ газов при небольшом изменении их температуры). При нагрузке 53 % расход воздуха минимален и дальнейшая разгрузка идет только с использованием качественного метода регулирования (воздействием на топливные клапаны) с резким снижением температуры уходящих в КУ газов.

При снижении нагрузки ниже 53 % происходит более резкое падение давления генерируемого пара (рис. 1). При одновременном резком снижении температуры пара, вызванном уменьшением значений температуры газов, происходит увеличение его плотности, что ведет к росту скорости пара в перегревателе пара высокого давления и промежуточном перегревателе пара (рис. 3).

При резком снижении температуры газов на входе в КУ (на малых нагрузках ГТУ) температура уходящих газов резко растёт; при перегрузке газовой турбины, наоборот, – температура в ее газовом тракте растет, а температура уходящих газов КУ снижается (рис. 4).

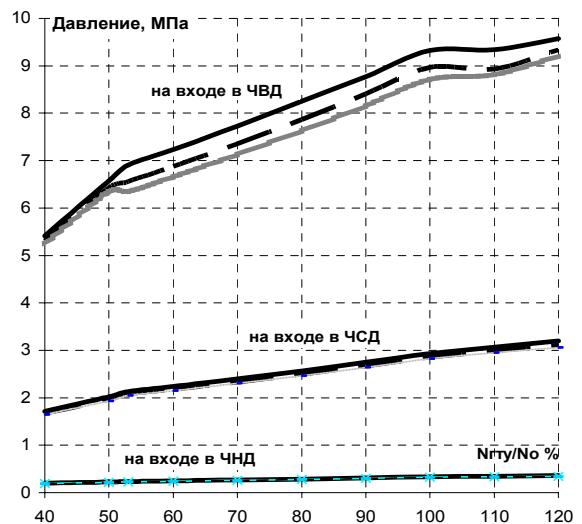


Рис. 1. Зависимость давлений в контурах ПГУ от относительной нагрузки ГТУ и температуры наружного воздуха (здесь и далее при температуре наружного воздуха: — — — -15 °С; — — — +5 °С; — — — +15 °С)

Аналогичный эффект наблюдается при изменении температур наружного воздуха. При отрицательных температурах мощность, расход газов и КПД ГТУ всегда больше, но температура газов на входе в КУ меньше. Поэтому температура уходящих газов при отрицательных температурах, наоборот, больше (рис. 4).

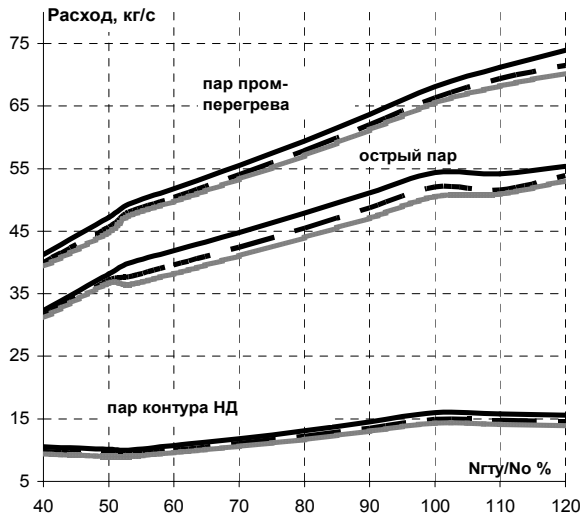


Рис. 2. Зависимость расходов пара в контурах ПГУ от относительной нагрузки ГТУ и температуры наружного воздуха

Установлено, что при увеличении температуры наружного воздуха с -30 до $+30$ °С коэффициент теплопередачи по поверхности снижается в среднем на 9,5 % при почти неизменных среднелогарифмических температурных напорах, что приводит к снижению тепловой мощности КУ на 6,5 %. При этом расход газов из ГТУ снижается более, чем на 15 % и, как результат, газы лучше охлаждаются, что выражается в снижении их температур по всему газовому тракту КУ.

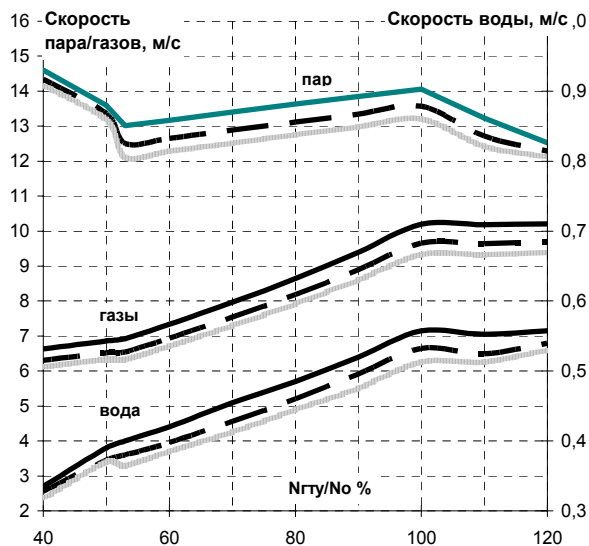


Рис. 3. Зависимости средних скоростей рабочих тел в трактах котла-утилизатора от относительной нагрузки ГТУ и температуры наружного воздуха

Температура наружного воздуха оказывает существенное влияние на энергетические показатели ПГУ (рис. 5, 6). Несмотря на то что ГТУ работает

при отрицательных температурах наружного воздуха экономичнее, КПД всей парогазовой установки в целом относительно низок из-за плохой утилизации теплоты уходящих газов. Обратная ситуация наблюдается при положительных температурах. Из-за того что мощность ГТУ зимой больше, мощность всей ПГУ в целом также выше.

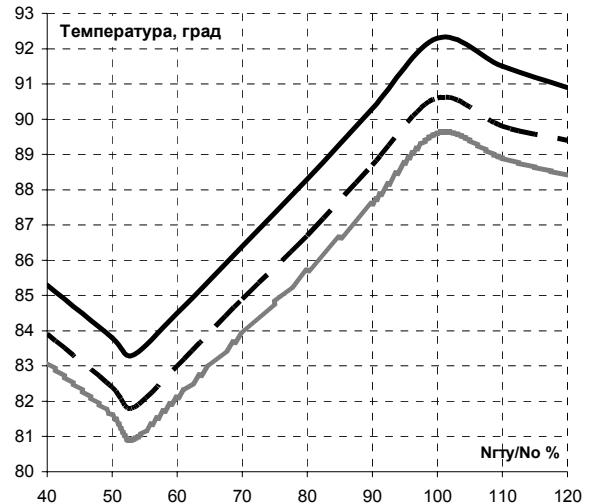


Рис. 4. Зависимость средних температур уходящих газов ПГУ от относительной нагрузки ГТУ и температуры наружного воздуха

КПД ПГУ имеет сезонный экстремум в точке, в которой эффект улучшения утилизации тепла в КУ сводится «на нет» малым значением КПД ГТУ. В нашем случае этот экстремум находится в точке $t_{нв} = 10$ °С. Снижение КПД энергоблока при меньших температурах обусловлено ухудшением утилизации теплоты газов, а при больших – интенсивным снижением КПД ГТУ.

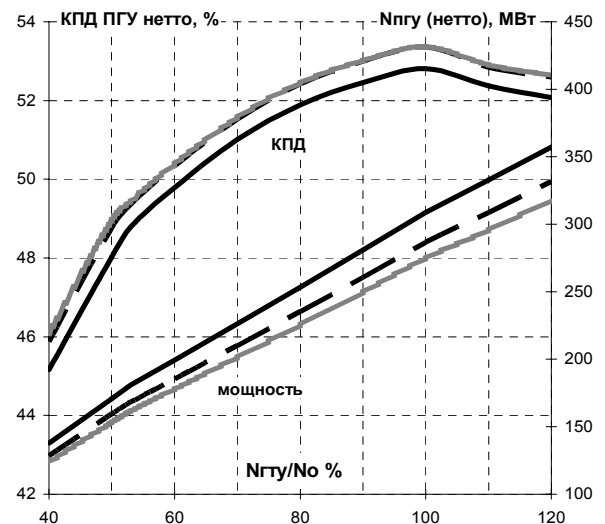


Рис. 5. Зависимости КПД и мощности ПГУ (нетто) от относительной нагрузки ГТУ и температуры наружного воздуха

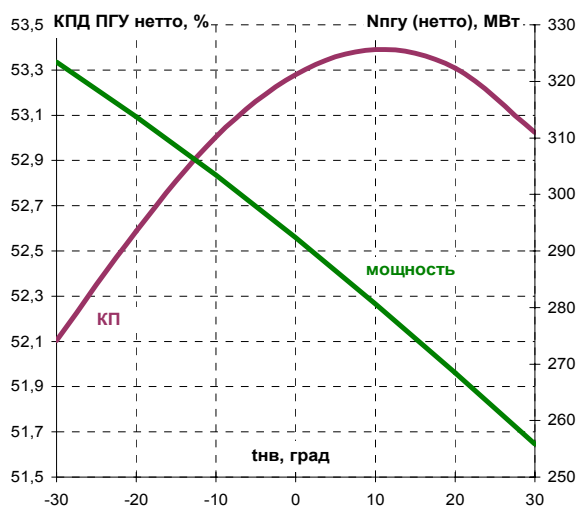


Рис. 6. Зависимости КПД и мощности ПГУ (нетто) от температуры наружного воздуха при 100%-й нагрузке ГТУ

Степень разгрузки ПГУ может ограничиваться двумя факторами: надежностью циркуляции в испарительных поверхностях нагрева КУ и наличием избыточного давления в третьем контуре. Установлено, что при разгрузке до 53 % срыва циркуляции не происходит, а давление в третьем контуре снижается до 0,2 МПа, что допустимо.

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,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Мельников Юрий Викторович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры тепловых электрических станций,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Заключение

Изменение характеристик ПГУ в течение года и при колебаниях нагрузки – важное отличительное свойство парогазовых ТЭС, которое необходимо учитывать при их проектировании. Впервые показано, что парогазовые энергоблоки могут высокоэффективно работать даже при глубокой разгрузке без серьезных технических ограничений.

Список литературы

1. **Каталог** газотурбинного оборудования. – М.: ЗАО «Газотурбинные технологии», 2006.
2. **Техническое предложение** по замене оборудования блока 300 МВт утилизационной ПГУ трёх давлений / Ю.В. Мельников, А.В. Мошкарин, Б.Л. Шельгин // Вестник ИГЭУ. – 2006. – № 2. – С. 3–6.
3. **Шувалов С.И.** Статистические методы обработки результатов измерений: Учеб. пособие / С.И. Шувалов. – Иваново, 2003.