

УДК 621.311.22

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ МОЩНЫХ ОДНОЦЕЛЕВЫХ ПАРОГАЗОВЫХ И ПАРОСИЛОВЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ НА ЧАСТИЧНЫХ НАГРУЗКАХ

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

Приведены результаты исследований работы мощных паросиловых и парогазовых энергоблоков на частичных нагрузках.

Ключевые слова: парогазовые и паросиловые энергоблоки, номинальная нагрузка, показатели экономичности энергоблоков.

READINGS EVALUATION OF SINGLE-TASKING STEAM-TO-GAS AND STEAM-POWER SUPPLY UNITS OPERATING UNDER PARTIAL LOAD

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

The work represents the results of research of steam-to-gas and steam-power supply units operating under partial load.

Key words: steam-to-gas and steam-power supply units, rated load, supply units efficiency readings.

Развитие российской электроэнергетики в ближайшие годы будет основано на строительстве мощных парогазовых (комбинированных) энергоблоков утилизационного типа, в том числе одноцелевых. Логично предположить, что в целях снижения капитальных затрат такое строительство будет вестись на уже существующих ГРЭС с частичным сохранением существующего основного и вспомогательного оборудования. Таким образом, очень вероятной становится ситуация, при которой одной генерирующей компании будут принадлежать как паросиловые энергоблоки (например, К-300 или К-800), так и парогазовые. Следовательно, возникнет необходимость оптимизации их параллельной работы по критерию минимального удельного расхода топлива.

Известно, что современные ПГУ конденсационного типа в номинальном режиме работают гораздо экономичнее ПТУ на сверхкритических параметрах пара. Однако понятие «номинальный режим ПГУ» во многом условно, в силу того что характеристики ГТУ и ПГУ сильно зависят от температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$, а этот параметр в течение года подвержен значительным колебаниям.

К 2010 г., когда, по утвержденной программе Правительства РФ и РАО «ЕЭС России», 100 % электроэнергии в России будет продаваться на рыночной основе, загрузка каждого агрегата на каждой электростанции будет определяться большим количеством факторов, в числе которых соотношение спроса и предложения, конкурентные преимущества, технологические ограничения и т.д. [1]. Поэтому даже в условиях дефицита электроэнергии гарантировать номинальную загрузку энергоблоков нельзя, а значит, необходим анализ их работы на частичных нагрузках.

Цель данного исследования – оценка эффективности ПГУ и ПТУ на частичных нагрузках.

На основе многовариантных расчетов нами была получена [2] зависимость удельного расхода условного топлива b [кг у.т./кВт·ч] на выработку электроэнергии от мощности $N_{\text{э}}$ [МВт] для моноблока К-300 на частичных нагрузках в режиме работы на скользящем давлении

$$b = 0,3023 + 2,25 \cdot 10^{-7} (300 - N_{\text{э}})^{2,24},$$

которая хорошо согласуется с опытными данными, полученными на ряде крупных ГРЭС России.

Ранее нами проводилось расчетное исследование энергетических показателей парогазового блока мощностью 285 МВт (в условиях ISO 2314) с ГТУ Siemens SGT5-3000E [3]. Представляет интерес продолжить исследования с иным составом основного оборудования, которое может обеспечить более высокие показатели.

Для наиболее современных проектов мощных парогазовых ТЭС за рубежом используют ГТУ Siemens SGT5-4000F. За несколько лет, прошедших с момента запуска этой ГТУ в серию, было проведено большое количество доработок, приведших к повышению показателей надежности и экономичности этой машины [4]. В последние 10 лет строительство ТЭС на базе SGT5-4000F велось по всему миру: в ОАЭ (Аль Тавеела), Австрии (Донаштадт, Тейсс), Аргентине (Генельба, Лухан де Куйо), Таиланде (IPT), Германии (Майнц-Висбаден), Новой Зеландии (Отохуху), Великобритании (Питерхед, Сибэнк), Бельгии (Антверпен). В ближайшие несколько лет география их использования существенно расширится. Это позволяет признать SGT5-4000F одной из лучших энергетических ГТУ большой мощности на мировом рынке.

Конкурентом SGT5-4000F выступает ГТУ Alstom GT26. Список ее референций не менее обширен и включает ТЭС в Новой Зеландии, Аргентине, Сингапуре, Германии, Великобритании, Испании. ГТУ этого типа будет установлена на ТЭЦ-26 ОАО «ТГК-3».

Две этих ГТУ (табл. 1) можно рассматривать как наиболее вероятные варианты для строительства в России современных парогазовых ТЭС. Появление этих машин в России – вопрос нескольких лет.

Таблица 1. Характеристики ГТУ SGT5-4000F и GT26 в условиях ISO 2314

ГТУ	Мощность нетто, МВт	КПД нетто, %	Температура выхлопных газов, °С	Расход выхлопных газов, кг/с
SGT5-4000F	279,1	38,7	583,5	682,9
GT26	286,4	38,6	620,9	644,6

Для сравнения характеристик парогазовых ТЭС на базе этих турбин на частичных нагрузках была принята тепловая схема (рис. 1). При использовании названных ГТУ такая схема позволит получить энергоблок мощностью 400 МВт. Котел-утилизатор (в англоязычной терминологии принято более корректное определение – теплоутилизационный парогенератор, heat recovery steam generator [4]) – трехконтурный, горизонтальный, с раздельным пи-

танием контуров среднего и низкого давления и промежуточным пароперегревателем. Турбины могут компоноваться как по двухвальной, так и по одновальной схеме (для анализа статических режимов компоновка не важна).

Расчеты проводились с использованием программы «Boiler Designer» фирмы «Optsim-K». Конструкция котла-утилизатора (КУ) была принята одинаковой применительно к двум ГТУ. Конструкция паровой турбины не задавалась, значения давлений пара на входе в цилиндры ВД, СД и НД приняты 11,87; 2,84 и 0,36 МПа, соответственно, внутренние относительные КПД – 0,86; 0,9; 0,84. Давление в третьем контуре было выбрано большим, чем его оптимальное значение [5], чтобы исключить попадание барабана НД на пониженных нагрузках под вакуум. Результаты расчета энергоблоков на условия ISO 2314 (табл. 2) позволяют сделать вывод, что ПГУ-400к с ГТУ GT26 обеспечивает более высокий КПД в номинальном режиме работы, хотя в целом показатели двух энергоблоков близки.

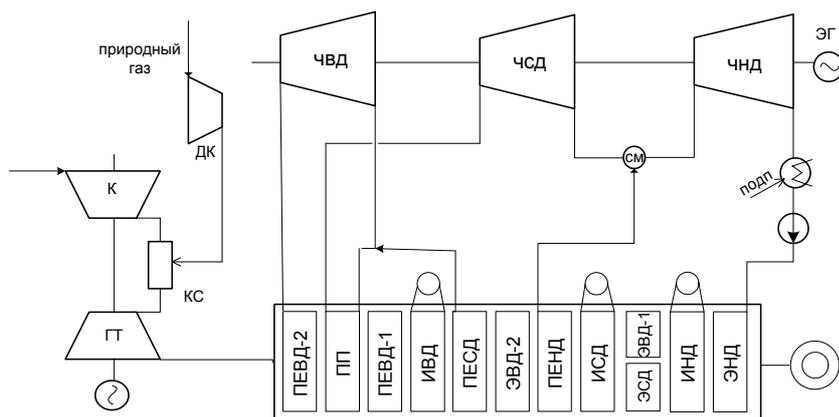


Рис. 1. Принципиальная схема ПГУ-400к: ПЕВД, ПЕСД, ПЕНД – перегреватели высокого, среднего и низкого давления, соответственно; И – испарительные пакеты; Э – экономайзер; КС – камера сгорания; К – компрессор; ГТ – газовая турбина; ДК – дожимной компрессор

Таблица 2. Номинальные параметры (ISO 2314) энергоблоков ПГУ-400к с ГТУ SGT5-4000F и GT26

Параметр, размерность	ГТУ	
	SGT5-4000F	GT26
Температура наружного воздуха, °С	15	15
Атмосферное давление, бар	1,013	1,013
Теплота сгорания топлива, МДж/кг	50,012	50,012
Относительная влажность, %	79	79
Суммарное сопротивление на выхлопе газовой турбины, мбар	35	35
Давление пара на входе в ЦВД, МПа	11,87	11,87
Температура пара на входе в ЦВД, °С	520,47	540
Расход пара в ЦВД, кг/с	72,54	77,67
Давление пара на входе в ЦСД, МПа	2,84	2,84
Температура пара на входе в ЦСД, °С	526,48	541
Расход пара в ЦСД, кг/с	90,05	94,11
Давление пара на входе в ЦНД, МПа	0,36	0,36
Температура пара на входе в ЦНД, °С	260,18	268,56
Расход пара в ЦНД, кг/с	102,44	103,33
Давление в конденсаторе, МПа	0,005	0,005
Мощность на клеммах генератора ПТУ, МВт	130,96	137,98
Мощность собственных нужд ПТУ, МВт	1,99	2,06
Мощность дожимного топливного компрессора, МВт	6	6
Температура уходящих газов, °С	109,5	104,5
Мощность ПГУ нетто, МВт	402,07	416,32
КПД ПГУ нетто, %	55,8	56,11
Расход условного топлива на выработку электроэнергии, г/кВт·ч	220,3	218,9

Для анализа показателей работы блоков на частичной нагрузке использовались данные фирм-производителей ГТУ, обработанные с помощью регрессионного анализа (рис. 2). Математическая модель энергоблока, построенная в программе «Boiler Designer», основывалась на расчете номинального режима работы (табл. 2). Снижение нагрузки ГТУ вызывает снижение тепловой производительности котла-утилизатора и параметров пара разных контуров.

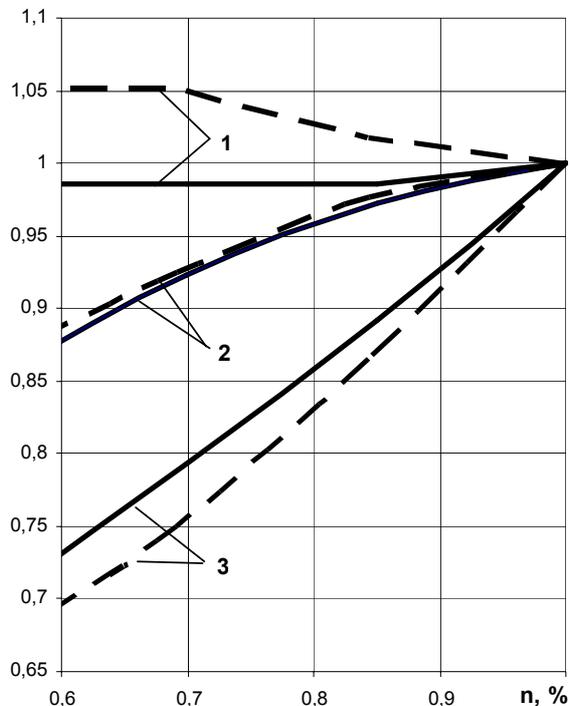


Рис. 2. Относительное изменение параметров ГТУ при разгрузке: 1 – температура продуктов сгорания на выходе; 2 – КПД ГТУ нетто; 3 – массовый расход продуктов сгорания; — — — — Siemens SGT5-4000F; — — — — Alstom GT26

Изменение объемных пропусков пара вызывает изменение внутренних относительных КПД паровой турбины, но при использовании разгрузки на скользящем давлении снижение КПД цилиндров незначительно [6] и изменение их мощности определяется главным образом изменением массовых расходов пара.

Анализ результатов расчетов показателей экономичности энергоблоков ПГУ-400к с ГТУ GT26 и SGT5-4000F при температуре наружного воздуха $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительных нагрузках 55–100 % (рис. 3) показывает, что снижение КПД при разгрузке у паротурбинных блоков в целом меньше, чем у парогазовых, выполненных на основе ГТУ компании Siemens (для сравнения здесь же показаны результаты расчетов ПТУ К-300-23,5 [2] и ПГУ-285к с ГТУ SGT5-3000E [3]).

Блок с GT26 обладает более высокой экономичностью даже при глубокой разгрузке (рис. 4).

Следует отметить, что разгрузка до значений менее 50–55 % от номинальной нагрузки

у большинства ГТУ вызывает резкое снижение КПД. Это связано с исчерпанием возможностей количественного метода регулирования (изменение степени открытия входного направляющего аппарата компрессора) и переходом на качественный (воздействие на топливные клапаны), при использовании которого резко снижаются температура продуктов сгорания (на входе и выходе из газовой турбины) и КПД ГТУ [7].

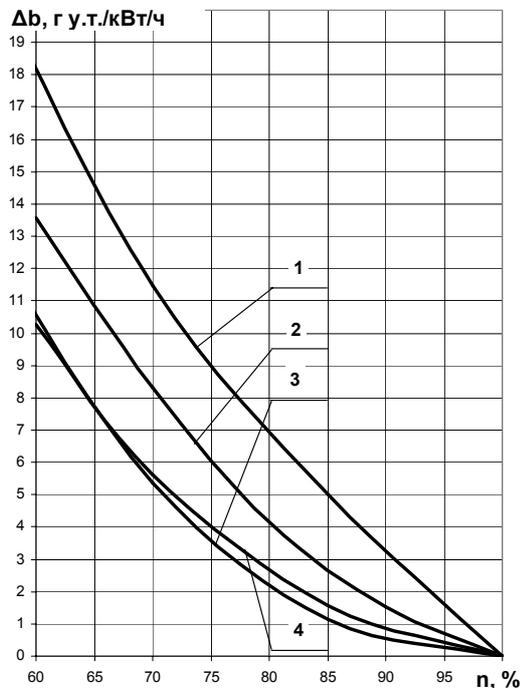


Рис. 3. Увеличение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии при разгрузке ряда мощных энергоблоков ($t_{\text{нв}} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$): 1 – ПГУ-400к с SGT5-4000F; 2 – ПГУ-285к с SGT5-3000E; 3 – ПТУ К-300-23,5; 4 – ПГУ-400 с GT26

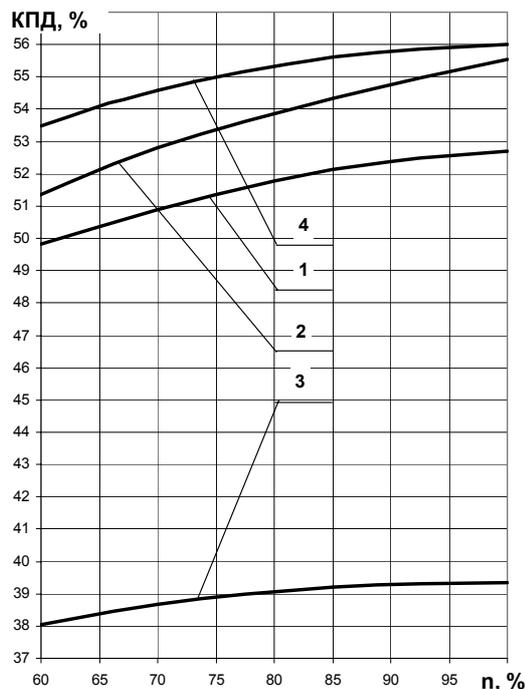


Рис. 4. Снижение КПД нетто при разгрузке ряда мощных энергоблоков ($t_{\text{нв}} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Обозначения см. рис. 3

Снижение температуры газов на входе в КУ вызывает снижение температуры генерируемого пара и, как следствие, теплоперепада на цилиндрах паровой турбины, из-за чего КПД ПГУ резко снижается, а также усложняется циркуляция в испарительных пакетах КУ и т.д. Поэтому регулировочный диапазон ПГУ обычно составляет 50–110 % от номинальной нагрузки, что значительно меньше, чем у паротурбинных блоков.

Таким образом, ПТУ более устойчивы к снижению КПД на частичных нагрузках, чем ПГУ, хотя последние гораздо более экономичны. Это означает, что при разгрузке блоков разных типов приоритет следует отдавать паросиловым, по крайней мере, до 50 % их относительной загрузки.

Приведенный анализ не учитывает динамических особенностей работы ПГУ и ПТУ. Однако данные [7, 8] и нормативных документов позволяют говорить о преимуществе динамических характеристик комбинированных блоков над паросиловыми. Если набор нагрузки со 100 МВт до 300 МВт на блоке К-300-23,5 с котлом ПК-41 происходит примерно за 1 ч [6], то для ПГУ скорость изменения нагрузки в пределах регулировочного диапазона должна составлять 0,1 ННОМ в минуту [8]. Таким образом, скорость обычного изменения нагрузки у ПГУ в несколько раз выше.

Заключение

Таким образом, на основании выполненного анализа показателей работы энергоблоков ПГУ-400к с ГТУ SGT5-4000F и GT26 на частичных нагрузках можно сделать следующие выводы:

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

1. ПГУ на основе Alstom GT26 экономичнее ПГУ на основе Siemens SGT5-4000E как в номинальном режиме, так и на частичных нагрузках.

2. ПСУ более устойчивы к снижению КПД при разгрузке, чем ПГУ.

3. При наличии у одной генерирующей компании энергоблоков разных типов относительную загрузку каждого из них следует планировать с учетом изменения их КПД.

4. Среди энергоблоков разного типа рекомендуется (по критерию экономичности) разгружать ПТУ примерно до 50 % от ее номинальной мощности.

Список литературы

1. Чубайс А.Б. Новая инвестиционная программа Холдинга РАО «ЕЭС России»: стенограмма пресс-конференции / Режим доступа: <http://www.rao-ees.ru/ru/news/speech/confer/show.cgi?prez130207abc.htm>.

2. Анализ перспектив развития отечественной теплоэнергетики / Под ред. А.В. Мошкарин; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002.

3. Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Мельников Ю.В. Проект утилизационной ПГУ трех давлений для замены паротурбинного оборудования энергоблока 300 МВт // Газотурбинные технологии. – 2006. – № 5. – С. 2–7.

4. Boyce Meherwan P. Gas Turbine Engineering Handbook (2nd ed) / M.P. Boyce. – Boston, MA: Gulf Professional Publishing, 2001.

5. Сигидов Я.Ю. Оптимизация структуры и параметров тепловых схем конденсационных парогазовых установок с котлами-утилизаторами трех давлений: Автореф. дис... канд. техн. наук. – М., 2006.

6. Прокопенко А.Г., Мысак И.С. Стационарные, переменные и пусковые режимы энергоблоков ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

7. Цанев С.В., Буров В.Д., Карташев И.Д. Технические решения по регулированию электрической нагрузки энергетических ГТУ. Российский и зарубежный опыт // Электрические станции. – 2005. – № 4. – С. 9–13.

8. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / Под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.