

УДК 621.311.22

ОПТИМИЗАЦИЯ ДАВЛЕНИЙ В ТРЕХКОНТУРНЫХ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПГУ С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

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

Приведены результаты численных исследований параметров паротурбинного цикла в парогазовых установках с газовыми турбинами SGT5-4000F и GT26.

Ключевые слова: парогазовые установки, газовые турбины, коэффициент полезного действия.

PRESSURE OPTIMIZATION IN THREE-CIRCUIT DISPOSAL CCP SUBJECT TO ENGINEERING LIMITATION

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

The work represents the computational investigation results of steam-turbine cycle parameters in SGT5-4000F and GT26 combined-cycle plants (CCP).

Key words: combined-cycle plants, gas turbines, efficiency factor.

Термодинамическая эффективность утилизационной ПГУ в условиях заданной газовой турбины в значительной степени определяется тепловой эффективностью паротурбинного цикла. Особенно это важно при использовании трехконтурных тепловых схем с котлами-утилизаторами трех давлений.

В процессе проектирования таких парогазовых установок возникает необходимость решения оптимизационной задачи поиска максимума функции – КПД ПГУ от трех переменных (давлений в контурах паротурбинного цикла). При этом на значения давлений в контурах ПГУ накладываются следующие ограничения:

- давление в первом контуре должно быть меньше 19 МПа по условию надежности циркуляции [1] (в случае использования испарительного контура высокого давления с барабаном);

- абсолютное давление в третьем контуре во всех режимах работы ПГУ должно быть выше атмосферного [2].

Исходными данными для разработки ПГУ является заданный тип ГТУ, под который проектируется котел-утилизатор (КУ) и паротурбинная установка (ПТУ). В ряде случаев ПТУ выбирается из числа тех, которые предлагаются на рынке. В связи с этим практический интерес представляет не столько оптимальное сочетание давлений, соответствующее максимальному значению КПД, а область из множества таких сочетаний, на основе которых можно получить минимальное снижение КПД от абсолютного максимума. При этом важным моментом является учет ограничений, накладываемых на эти области режимными характеристиками ПГУ и технико-экономическими соображениями.

В Инвестиционной программе РАО «ЕЭС России» 2006–2014 гг. [3] запланировано строительство 15-ти парогазовых конденсационных энергоблоков ПГУ-400к и ПГУ-800к на природном газе на основе ГТУ верхнего класса мощности (свыше 270 МВт). Итоги тендеров на поставку мощных ГТУ для теплоэлектростанций ОАО «Мосэнерго» (ТГК-3) и для Киришской ГРЭС ОАО «ОГК-6» позволяют сделать вывод о том, что главными конкурентами на российском рынке мощных ГТУ будут европейские компании «Siemens» (ГТУ SGT5-4000F) и

«Alstom» (ГТУ GT26). Поэтому проведение оптимизационных исследований на примере парогазовых блоков на основе этих машин представляет особый интерес.

Расчетные исследования проводились на основе численного поиска оптимальных соотношений давлений в контурах паротурбинного цикла по техническим характеристикам ГТУ SGT5-4000F и GT26 (табл. 1) для трех уровней начальных давлений 20, 14,5 и 9 МПа. Тепловая схема блока ПГУ-400к для обеих ГТУ принята идентичной (рис. 1).

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

Значения внутренних относительных КПД частей паровой турбины приняты следующие: $\eta_{oi}^{ЧВД} = 0,86$; $\eta_{oi}^{ЧСД} = 0,9$; $\eta_{oi}^{ЧНД} = 0,87$, а значение избытка воздуха в выхлопных газах ГТУ – 2,7.

Значения температурных напоров в котле-утилизаторе приняты по опыту проектирования парогазовых установок российскими и зарубежными фирмами (табл. 2).

Температура перегретого пара контуров высокого давления и промперегрева принята 550 °С.

Результаты оптимизационных расчетов иллюстрируются графиками (рис. 2).

Анализ полученных результатов показывает, что для каждого значения давления во втором контуре имеет место явно выраженный оптимум, соответствующий давлению в третьем контуре. Оптимальные значения давлений в контурах среднего и низкого давлений увеличиваются с ростом значений давления в первом контуре. Однако относительные значения оптимальных давлений снижаются с ростом давления пара в первом контуре (табл. 3).

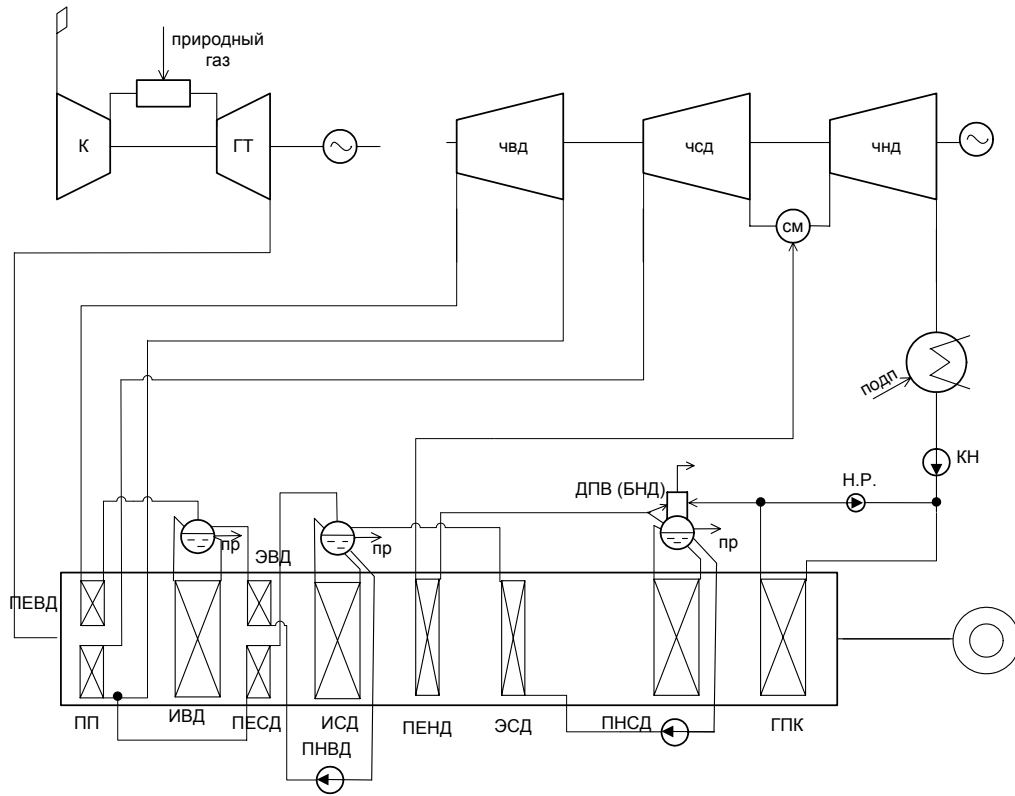


Рис. 1. Принципиальная схема ПГУ-400к: К – компрессор; ГТ – газовая турбина; ПЕ – пароперегреватель; Э – экономайзер; И – испарительный пакет; ВД, СД, НД – контуры высокого, среднего и низкого давления, соответственно; ГПК – газовый подогреватель конденсата; КН – конденсатный насос; ПН – питательный насос; ЧВД – часть высокого давления; ЧСД – часть среднего давления; ЧНД – часть низкого давления; ПП – промежуточный пароперегреватель

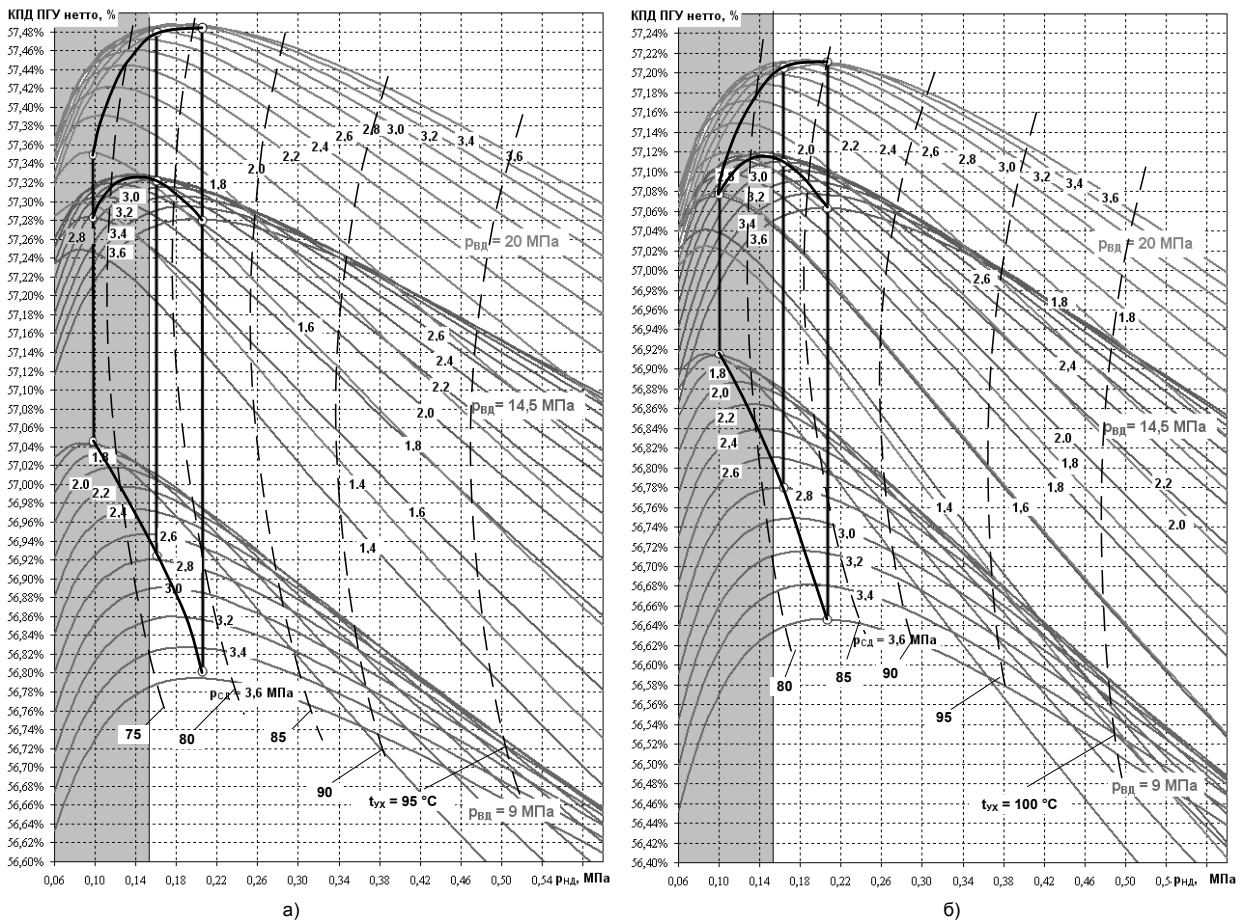


Рис. 2. Результаты оптимизации давлений в контурах ПГУ-400к: а – на основе ГТУ GT26 Alstom; б – на основе ГТУ SGT5-4000E Siemens

Таблица 2. Исходные данные для проведения оптимизации значений давлений в контурах котла-утилизатора

Наименование величины	Контур давления		
	высокого	среднего	низкого
Недогрев на «горячем конце» ПЕ, °С	–	15	15
Недогрев на «холодном конце», °С	15	15	15
Недогрев в ЭКО до температуры насыщения, °С	15	15	15

Таблица 3. Изменение относительных значений оптимальных давлений в контурах ПГУ с ростом давления в первом контуре

Давление в первом контуре, МПа	Относительные значения давлений в контурах ПГУ	
	$p_{сд} / p_{вд}$	$p_{нд} / p_{вд}$
20,0	0,165	0,0090
14,5	0,166	0,0097
9,0	0,167	0,010

Анализ полученных графиков (рис. 2) показывает, что ПГУ на основе GT26 имеет более высокий КПД нетто, что объясняется большей тепловой эффективностью данной машины, достигаемой ступенчатым сжиганием топлива с промежуточным подогревом выхлопных газов.

Аналогичный характер изменения оптимальных значений давлений в промежуточных перегревателях для блоков на суперсверхкритические параметры пара был получен ранее [4].

Температура уходящих из котла-утилизатора газов снижается с уменьшением давления в третьем контуре КУ (на рис. 2 пунктирными линиями показаны тренды множеств точек, которым соответствуют одинаковые значения температуры уходящих газов). Наиболее высокие значения КПД соответствуют достаточно низким значениям температур уходящих газов (80–85 °С). Как правило, столь глубокое охлаждение выхлопных газов достигается использованием развитых поверхностей нагрева (особенно в контуре низкого давления КУ и газовом подогревателе конденсата). Однако низкая температура газов нежелательна во избежание конденсации водяных паров на низкотемпературных поверхностях нагрева и последующей их коррозии.

Максимальный КПД в ПГУ-400к достигается при низких значениях давления пара в третьем контуре – в пределах 0,08–0,24 МПа в зависимости от давлений в контуре ВД и СД.

Вместе с тем опыт расчетных исследований переменных режимов работы блоков ПГУ-400к [5] показывает,

что разгрузка блока до технического минимума в 55–60 % номинальной мощности на скользящих пара сопровождается снижением давления в контуре НД на 25–30 % от номинального значения (в зависимости от параметров наружного воздуха и типа ГТУ). Это обстоятельство ограничивает нижний предел давления в третьем контуре значением 0,15 МПа (зона недопустимых сочетаний давлений на рис. 2 выделена серым цветом).

Выявление недопустимых сочетаний давлений в контурах утилизационной ПГУ дополняет результаты исследований, проведенных на кафедре тепловых электростанций МЭИ [6].

Несомненный интерес представляет анализ параметров в нижнем цикле существующих блоков ПГУ-400к на основе изученных закономерностей и ограничений. Параметры паровой части цикла энергоблоков ПГУк, введенных в эксплуатацию в течение последних лет, сведены в табл. 4 [6–9] (разброс в мощностях 350–400 МВт объясняется постоянной модернизацией ГТУ с увеличением их мощности и КПД).

Увеличение температуры выхлопных газов выпускаемых ГТУ в течение последних лет сопровождалось одновременным увеличением начальных температур в паровом цикле ПГУ на основе этих ГТУ. Как результат, все указанные (табл. 4) блоки имеют разные температурные напоры в пароперегревателях ВД и ПП. Однако, как было показано в исследованиях Я.Ю. Сигидова [6], изменение температурного напора на входе в котел-утилизатор не оказывает значительного влияния на оптимальные сочетания давлений в его контурах (при прочих равных условиях). Таким образом, сочетания давлений в этих блоках можно считать сопоставимыми, несмотря на различия в начальных температурах пара.

Таблица 4. Характеристики некоторых энергоблоков ПГУ* номинальной (ISO 2314) мощностью 350–400 МВт, введенных в эксплуатацию в 1999–2007 гг.

ТЭС, год пуска	Тип ГТУ	Параметры пара в контурах давления		
		высокого	среднего	низкого
Токопилья (Чили), 1999	Alstom GT26	11,8 МПа / 568 °С	2,9 МПа / 568 °С	0,5 МПа / 153 °С
Сан Рок (Испания), 2002	Alstom GT26	12,3 МПа / 541 °С	2,9 МПа / 542 °С	0,55 МПа / 156 °С
Кастехон (Испания), 2002	Alstom GT26	11,5 МПа / 568 °С	3,0 МПа / 568 °С	0,5 МПа / 153 °С
Северная (Азербайджан), 2002	Mitsubishi 701F	10,8 МПа	3,8 МПа	0,5 МПа
Бесос (Барселона, Испания), 2002	Alstom GT26	11,8 МПа / 566 °С	2,75 МПа / 566 °С	0,49 МПа / 153 °С
Картахена (Испания), 2003	Alstom GT26	13,3 МПа / 565 °С	2,7 МПа / 565 °С	0,46 МПа / 279 °С
Таллавара (Испания), 2005	Alstom GT26	13,5 МПа / 565 °С	2,8 МПа / 565 °С	0,47 МПа / 287 °С
ЭЗР (Хантли, Новая Зеландия), 2007	Mitsubishi 701F	10,5 МПа	3,5 МПа	0,6 МПа
Отахуту (Новая Зеландия),	Siemens SGT5-4000F	12,8 МПа / 551 °С	3,15 МПа / 551 °С	0,48 МПа / 234 °С
Эмс (Нидерланды)	General Electric 9FA	11,2 МПа / 541 °С	3 МПа / 541 °С	0,49 МПа / 266 °С
Дидкот (Великобритания), 1997	Siemens SGT5-4000F	11,0 МПа / 540 °С	2,9 МПа / 540 °С	0,45 МПа / 235 °С
Тарада до Отуэро (Португалия), 1998	Siemens SGT5-4000F	11,3 МПа / 550 °С	3,0 МПа / 550 °С	0,45 МПа / 233 °С

ПГУк* – парогазовые установки с конденсационной паровой турбиной

Анализ характеристик ПГУ (табл. 4) показывает, что сооружаемые блоки ПГУ-400к имеют давление в нижнем контуре КУ, в 3–4 раза превышающее оптимальное значение при таком же давлении в верхнем контуре. Давление в среднем контуре также завышено по сравнению с оптимальным его значением. Все это приводит к потере в КПД ПГУ от 0,2 % абс., однако позволяет использовать менее развитые поверхности нагрева в хвосте котла-утилизатора (с температурой уходящих газов 95–100 °С), избежать конденсации водяных паров на них и повысить надежность работы контура низкого давления в режимах глубокой разгрузки.

Список литературы

1. **Резников М.И., Липов Ю.М.** Паровые котлы тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат, 1981.
2. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – М.: Омега-Л, 2004.
3. **Инвестиционная** программа тепловых генерирующих компаний Холдинга РАО «ЕЭС России» на 2006–2010 гг. / Ре-

жим доступа: http://www.rao-ees.ru/ru/info/about/invest_inov/inv_programm/.

4. **Анализ** направлений развития отечественной теплоэнергетики / А.В. Мошкарин, М.А. Девочкин, Б.Л. Шельгин и др. – Иваново: ИГЭУ, 2002.

5. **О влиянии** характеристик газовых турбин на показатели работы мощных парогазовых блоков в переменных режимах / А.В. Мошкарин, Ю.В. Мельников // Энергосбережение и водоподготовка. – № 4. – 2007.

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

7. **General Electric Power** / Режим доступа: <http://www.gepower.com/home/index.htm>.

8. **Alstom Power** / Режим доступа: <http://www.power.alstom.com/home/>.

9. **Power Technology Journal. Industry Projects** / Режим доступа: <http://www.power-technology.com/projects>.

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,
телефон (4932) 41-60-56,
e-mail: admin@tes.ispu.ru