УДК 621. 536. 438

М. Н. Чепурной, к. т. н., доц.; С. И. Ткаченко, д. т. н., проф.; И. Н. Дымнич

ГАЗОТУРБИННЫЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ С ТЕПЛОНАСОСНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Проанализирована целесообразность использования теплонасосных установок на газотурбинных теплоэлектроцентралях с более глубокой утилизацией теплоты отработанных в ГТУ продуктов сгорания.

Ключевые слова: *газовая турбина, котел-утилизатор, теплоэлектроцентраль, теплонасосная установка, газоохладитель, компрессор, испаритель, конденсатор.*

Введение

На сегодняшний день в условиях подорожания органического топлива, особенно импортного природного газа, приоритетной задачей является энергосбережение. Необходимость разработки эффективных энергосберегающих технологий определяется, с одной стороны, наличием в энергетике Украины достаточно высокого потенциала для внедрения таких технологий, а с другой – стойкой тенденцией к увеличению стоимости топлива.

Наиболее эффективным средством энергосбережения в теплоэнергетике является комбинированное производство теплоты и электроэнергии [1 – 3]. При этом все больше внимания уделяется использованию газотурбинных установок (ГТУ) [4 – 6]. В Украине создана необходимая материальная база для применения газотурбинных технологий (фирма „Заря” г. Николаев; НПО „Турбоатом” г. Харьков; ОАО „Моторсич” г. Запорожье). На этих предприятиях разработаны и серийно выпускаются ГТУ мощностью 2,5 – 135 МВт с коэффициентами полезного действия (КПД) до 0,36. Современные типоразмеры ГТУ предусматривают работу как на газообразных, так и на разных видах топлива.

Опыт сооружения и эксплуатации первых ГТУ-ТЭЦ [2] подтвердил, что они отличаются надежностью, простотой управления, низкой себестоимостью выработанной энергии. Оборудование таких ТЭЦ имеет небольшие габаритные размеры, а его монтаж осуществляется без значительных финансовых и трудовых затрат. В большинстве случаев обеспечивается дистанционное управление работой оборудования, а также программирование режимов его работы.

Существует два основных варианта применения ГТУ-ТЭЦ. Первый вариант предусматривает, что потребность в электроэнергии полностью обеспечивается ГТУ, а потребность в теплоте – частично за счет утилизации теплоты отработанных в ГТУ газов, а остальная – отопительными котельными. В другом варианте потребность в теплоте полностью обеспечивается за счет утилизации теплоты отработанных в ГТУ газов, а электроэнергия, которая вырабатывается в ГТУ, используется на собственные нужды и на снабжение энергосистемы [7].

Особенностью комбинированного производства электроэнергии на ГТУ-ТЭЦ является то, что тепловая мощность, которая направляется потребителям, связана с электрической мощностью. Отметим также, что повышение коэффициента полезного действия ГТУ при заданной электрической мощности N приводит к уменьшению выработки тепловой энергии, а уменьшение КПД ГТУ при условии N = const – к увеличению выработки теплоты и к перерасходу топлива. Выработка теплоты зависит от степени утилизации теплоты отработанных в ГТУ газов, которая, в свою очередь, зависит от температуры газов на выходе из котла-утилизатора. В зависимости от температуры обратной сетевой воды,

температура газов за котлом-утилизатором может быть сравнительно высокой, а коэффициент утилизации соответственно низким. Поэтому дополнительное охлаждение газов за котлом-утилизатором способствует увеличению выработки теплоты и эффективности использования теплоты топлива.

Задача снижения температуры газов за котлом-утилизатором может быть реализирована с помощью дополнительного газоохладителя и теплонасосной установки (ТНУ).

Исходя из вышеизложенного, ставилась задача оценить эффективность работы ГТУ-ТЕЦ с дополнительным охлаждением газов в ТНУ для отечественных ГТУ небольшой мощности, которые серийно выпускаются на предприятии „Заря” (г. Николаев). Характеристики ГТУ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики ГТУ

Показатели	Тип ГТУ / № варианта			
	ГТД-2,5	ГТД-6	ГТД-16	ГТД-25
	1	2	3	4
Электрическая мощность, МВт	2,85	6,7	17	27,5
Температура газов, ^{0}С:				
перед турбиной	950	4000	1100	1250
за турбиной	445	420	420	490
Коэффициент полезного действия	0,285	0,315	0,35	0,36
Расход условного топлива, кг/с	0,3413	0,7260	1,6577	2,6070

Основные результаты

Принципиальная схема ГТУ-ТЭЦ с дополнительным охлаждением газов за котлом-утилизатором и ТНУ показана на рис. 1.

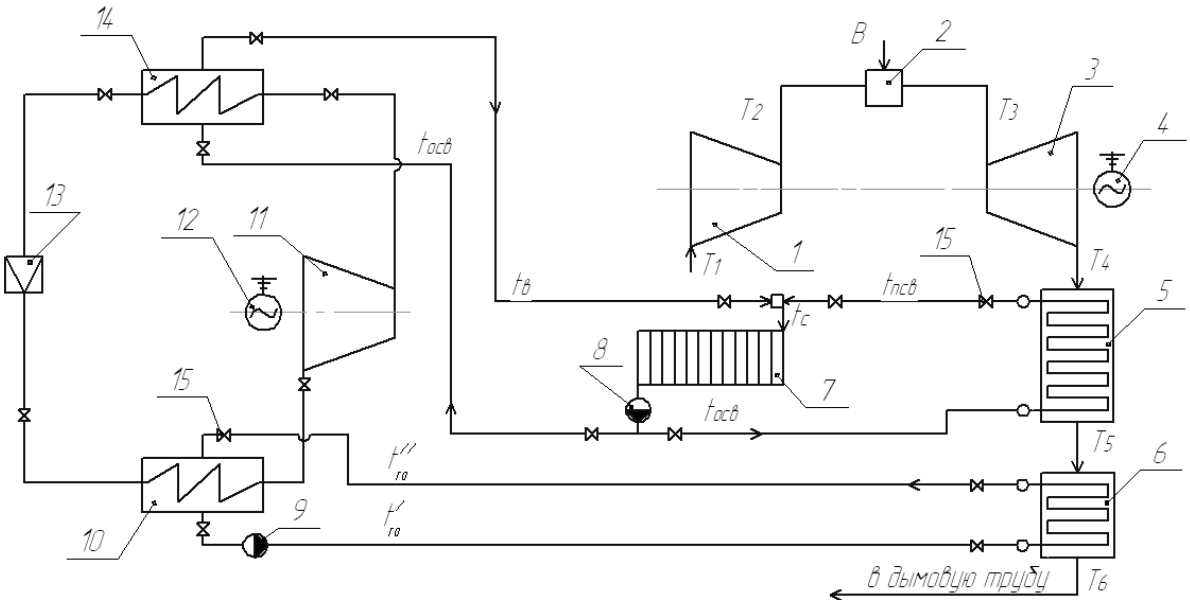

Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ГПУ-ТЕЦ с теплонасосной установкой: 1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – газовая турбина; 4 – электрогенератор; 5 – котел-утилизатор; 6 – газоохладитель; 7 – тепловые потребители; 8 – сетевой насос; 9 – циркуляционный насос; 10 – испаритель; 11 – компрессор ТНУ; 12 – электродвигатель; 13 – дроссельное устройство; 14 – конденсатор; 15 – запорная арматура

Через дополнительный газоохладитель 6 циркуляционным насосом 9 прокачивается вода, охлаждающая дымовые газы от температуры T_5 до температуры T_6. При этом циркуляционная вода подогревается от температуры $t'_{го}$ до температуры $t''_{го}$. Подогретая

вода направляется в испаритель ТНУ 10, где выпаривает хладоагент ТНУ. Отработанные в ГТУ продукты сгорания (дымовые газы) поступают в котел-утилизатор 5, где подогревают сетевую воду от температуры $t_{осв}$ до температуры $t_{псв}$. Часть обратной сетевой воды направляется в конденсатор ТНУ 14. В конденсаторе обратная сетевая вода подогревается до температуры $t_и$, после чего направляется в линию прямой сетевой воды. Смесь воды с температурой $t_с$ поступает к тепловым потребителям 7. Для утилизации теплоты дымовых газов используются эффективные утилизаторы [8, 9].

Известно [10], что эффективность работы ТНУ оценивается при помощи коэффициента преобразования энергии (отопительного коэффициента) φ, который равен отношению тепловой мощности конденсатора к мощности компрессора. Значения φ зависят от среднетермодинамических температур теплоносителей в испарителе и конденсаторе [10]. В связи с этим сначала проанализирована эффективность работы аммиачной парокомпрессионной ТНУ при разных температурах циркуляционной воды в испарителе при условии, что температура подогретой воды на выходе из конденсатора равнялась 80 ^{0}С. Расчетные значения показателей работы ТНУ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели работы ТНУ

Показатели	Варианты			
	1	2	3	4
Температура воды, ^{0}С:				
на входе в испаритель	35	40	45	50
на выходе из испарителя	20	25	30	35
Удельная теплота, подведенная в испаритель, кДж/кг	880	880	880	880
Удельная работа компрессора, кДж/кг	342	317	293	258
Удельная теплота, отведенная из конденсатора, кДж/кг	1222	1197	1173	1138
Коэффициент преобразования энергии	3,573	3,776	4,003	4,41

Из табл. 2 видно, что при условии одинаковой теплоты, подведенной в испаритель, и одинаковой температуры воды на выходе из конденсатора, коэффициент преобразования энергии в ТНУ растет с увеличением температуры воды на входе в испаритель.

По методике [7] определены показатели работы ГТУ-ТЭЦ с газовыми турбинами, характеристики которых приведены в табл. 1. Расчеты выполнены для отопительного периода продолжительностью 4500 час. В расчетах принято: топливо – природный газ с теплотой сгорания 33,4 МДж/м^3; температура газов за котлом-утилизатором 170 ^{0}С; температурный режим тепловой сети 120/60 ^{0}С; цена топлива 2000 грн. за 1000 м^3; цена отпущенной теплоты и электроэнергии 250 и 700 грн. за 1 МВт·час соответственно. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели работы ГТУ-ТЭЦ

Показатели	Варианты			
	1	2	3	4
Мощность котла-утилизатора, МВт	4,571	9,0	19,482	32,929
Расход дымовых газов, кг/с	14,67	32,01	69,38	90,38
Отпущенная теплота, МВт·час	20565	40473	87660	140180
Выручка за теплоту, млн. грн.	5,141	10,118	21,915	37,045
Электрическая мощность собственных нужд, кВт	31,125	60,346	130,460	151,802
Отпущенная электроэнергия, МВт·час	12684	29878	75913	123067
Выручка за электроэнергию, млн. грн.	8,879	20,914	53,139	86,116
Расход топлива, тыс. м^3	4860	10319	23538	37049
Расходы на топливо, млн. грн.	10,692	20,638	47,076	74,010
Разница между выручками и расходами, млн. грн.	3,328	10,380	28,013	49,181

Удельный расход условного топлива на единицу выработанной энергии, кг/ГДж	45,99	46,24	45,43	43,12

Расчеты показателей работы ГТУ-ТЭЦ с дополнительным газоохладителем и теплонасосной установкой, работающей по варианту 3 в табл. 2, для примера приведены в табл. 4. Считалось, что температура газов за газоохладителем составляла 105 ^{0}С.

Таблица 4

Показатели работы ГТУ-ТЭЦ с ТНУ

Показатели	Варианты			
	1	2	3	4
Мощность газоохладителя, МВт	1,028	2,266	4,907	6,610
Отпущенная теплота, МВт·час	25191	50670	109741	178105
Выручка за теплоту, млн. грн.	6,297	12,667	27,435	44,526
Мощность компрессора ТНУ, кВт	248	555	1377	1701
Электрическая мощность собственных нужд, кВт	296	654	1601	1968
Отпущенная электроэнергия, МВт·час	11452	27207	69295	114894
Выручка за электроэнергию, млн. грн.	8,016	19,045	48,506	80,425
Расходы на топливо, млн. грн.	10,692	20,638	47,076	74,010
Разница между выручками и затратами, млн. грн.	3,621	11,074	28,865	50,911
Удельный расход условного топлива на единицу выработанной энергии, кг/ГДж	40,03	40,04	40,0	38,80

Из сопоставления показателей работы ГТУ-ТЕЦ, приведенных в таблицах 3 и 4, видно, что ГТУ с теплонасосными установками и дополнительным охлаждением газов за котлом-утилизатором работают более эффективно. Несмотря на увеличение мощности собственных нужд и уменьшение отпускаемой электроэнергии в энергосистему, общая выручка за отпущенные виды энергии возрастает на 10 – 11 % за счет возрастания тепловой мощности и выручки за отпущенную теплоту. Примерно на такую же величину уменьшается удельный расход условного топлива на выработку единицы энергии. Расчеты показали, что в случае работы ГТУ-ТЭЦ с теплонасосной установкой, работающей по четвертому варианту в табл. 2, эффективность работы увеличивается на 15 – 16 %, что позволяет экономить топливо на эту же величину.

Выводы

1. Создание ГТУ-ТЭЦ с дополнительным охлаждением газов и теплонасосными установками повышает эффективность использования топлива.
2. Эффективность работы ГТУ-ТЭЦ увеличивается с увеличением коэффициента преобразования энергии в ТНУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрющенко А. И. Методика предварительного выбора экономически целесообразных альтеративных вариантов тепловых схем ТЭЦ / А. И. Андрющенко, П. Г. Антронов // Изв. вузов. Проблемы энергетики: Казань, 2001, - №1 - 2. – С. 60 - 63.

2. Котлер В. Р. Мини-ТЭЦ: зарубежный опыт / В. Р. Котлер // Теплоэнергетика, 2006. - № 8. – С. 69 - 72.

3. Басок Б. И. Сравнительный анализ решений когенерацционных установок / Б. И. Басок, Д. А. Коломейка // Пром. Теплотехника, 2006. – Т. 28. - № 5. – С. 77 - 82.

4. Ревзин Б. С. О роли теплофикации и о развитии ГТУ и ПГУ в новых условиях / Б. С. Ревзин, О. В. Комаров, А. А. Стяжкин // Газотурбинные технологии, 2007. - № 5. – С. 12 - 13.

5. Жарков В. С. О перспективах оборудования отопительных ТЭЦ в России / С. В. Жарков // Газотурбинные технологии, 2007. - № 2. – С. 15 - 18.

6. Чепурний М. М. До питання ефективності міні-ТЕЦ на базі котелень і газотурбінних установок / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, Є. С. Корженко // Енергозбереження Поділля, 2004. - № 2. – С. 69 - 72.

7. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. -

Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.

8. Гершуни А. Н. Разработка и внедрение эффективных утилизаторов на основе теплопередающих элементов испарительно-конденсационного типа / А. Н. Гершуни, В. П. Нищик // Пром. Теплотехника, 1997. – Т. 19. - № 5. – С. 69 - 73.

9. Фиалко М. М. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа / М. М. Фиалко, Ю. В. Шеренковский, А. И. Степанова // Пром. Теплотехника, 2008. – Т. 30. - № 3. – С. 68 - 75.

10. Чепурний М. М. Аналіз впливу температур на ефективність роботи теплонасосних установок / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, Т. П. Куть // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2001. - № 4. – С. 53 - 56.

Чепурной Марк Николаевич – к. т. н., профессор кафедры теплоэнергетики, институт строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Ткаченко Станислав Иосипович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики, институт строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Дымнич Илона Николаевна – студентка института строительства теплоэнергетики и газоснабжения.

Винницкий национальный технический университет.