УДК 621.438

М. Н. Чепурной, к. т. н., доц.; Н. В. Резидент, к. т. н., доц.; С. В. Полищук

ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ НА БАЗЕ ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ И ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Проанализирована энергетическая эффективность работы водогрейных котельных и теплоэлектроцентралей, созданных за счет газотурбинных надстроек.

Ключевые слова: *водогрейный котел, газовая турбина, газотурбинная установка, котел-утилизатор, химводоочистка.*

Введение

Эффективность производства энергии является важной характеристикой топливоиспользующих установок и оценивается значением удельного расхода условного топлива на единицу выработанной энергии. Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии, как известно, является перспективной технологией, которая в значительной мере позволяет решать задачи энергосбережения и нашла отображение на законодательном уровне [1]. Несмотря на это, централизованное теплоснабжение большого количества потребителей в Украине осуществляется не от теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), а от водогрейных котельных.

В последнее время мировые тенденции развития энергетики предусматривают создание множества электростанций небольшой мощности (рассредоточенная генерация), в том числе и для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, позволяющих решить проблему энергоснабжения в каждом конкретном регионе.

Около 70% прироста электрогенерирующих мощностей планируют осуществить за счёт газотурбинных установок (ГТУ) [2]. Рассредоточенная генерация электроэнергии не только позволяет повысить надежность электроснабжения в регионе, но и избавляет от необходимости оплачивать потери электроэнергии в линиях электропередач при ее транспортировке на большие расстояния.

В областных и районных центрах Украины работает еще довольно большое количество водогрейных (отопительных) котельных, расположенных в черте города. В Украине также создана материальная база ГТУ с мощностями 6 – 160 МВт и коэффициентами полезного действия (КПД) до 0,37. Создание газотурбинных теплоэлектроцентралей (ГТУ-ТЭЦ) на базе отопительных котельных не только повышает надежность энергоснабжения в регионе, но и способствует уменьшению резервных мощностей и повышению гибкости регулирования энергосистемы. Автономные ГТУ комплектуют отдельными модулями, они имеют небольшие габариты, монтаж которых осуществляют без значительных финансовых и трудовых затрат. В большинстве случаев обеспечивают дистанционное управление, а также программирование режимов работы ГТУ.

Особенностью комбинированного производства энергии на ГТУ-ТЭЦ является то, что выработка тепловой мощности Q зависит от выработки электрической мощности ГТУ N. Условия работы водогрейных котельных отличаются диспропорциями тепловой нагрузки в отопительный и неотопительный периоды. Относительно постоянной является мощность системы горячего водоснабжения. Известно, что наиболее эффективная работа ГТУ достигается в случае её номинальной электрической мощности [3, 4], поэтому оптимальный режим работы ГТУ-ТЭЦ достигается, когда тепловая мощность, вырабатываемая за счёт утилизации теплоты продуктов сгорания ГТУ (дымовых газов) в котле-утилизаторе, соответствует режиму работы ГТУ с номинальной электрической мощностью. Таким образом, в отопительный

период на ГТУ-ТЭЦ должны работать и водогрейные котлы, и ГТУ с котлом-утилизатором, а в неотопительный период – только ГТУ с котлом-утилизатором.

Учитывая вышеизложенное, предпринята попытка сравнительной оценки основных показателей эффективности работы водогрейных котельных и ГТУ-ТЭЦ одинаковой тепловой мощности.

Основные результаты

Для создания ГТУ-ТЭЦ на базе отопительных котельных выбран ряд газотурбинных установок с КПД не менее 0,32. Характеристики выбранных ГТУ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики ГТУ

Показатели	Тип ГТУ или двигателя				
	ГТУ-9,5	ГТГ-16	ГТ-20	НК-37-1	ГТД-60
Электрическая мощность, МВт	8,8	17	20	30	60
Температура газов перед турбиной, °С	1120	1000	1133	1220	1170
Степень повышения давления	21,7	17,8	17	23,4	15
Температура газов за турбиной, °С	480	420	520	455	500
Коэффициент полезного действия	0,32	0,35	0,36	0,37	0,35
Расход условного топлива, кг/с	0,938	1,657	1,896	2,767	5,85
Мощность котла-утилизатора, МВт	13,27	21,06	26,05	35,25	80,40

Принципиальная схема ГТУ-ТЭЦ на базе водогрейной котельной с двухтрубной закрытой системой теплоснабжения показана на рис. 1.

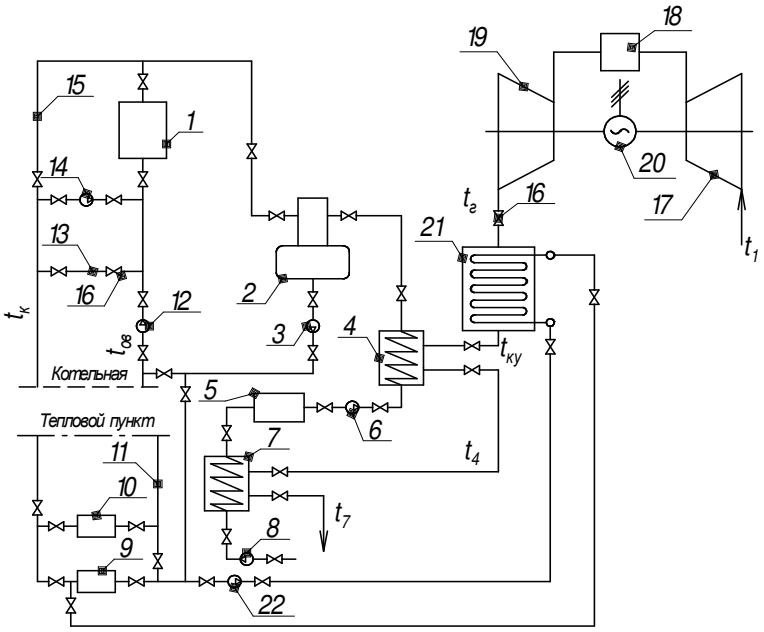

Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ГТУ-ТЭЦ: 1 – водогрейный котел; 2 – вакуумный деаэратор; 3 – деаэраторный насос (насос подпитки); 4 – подогреватель химочищенной воды; 5 – химводоочистка (ХВО); 6 – насос ХВО; 7 – подогреватель сырой воды; 8 – насос сырой води; 9 – подогреватель воды на горячее водоснабжение; 10 – подогреватель воды на отопление; 11 – магистраль обратной сетевой воды; 12 – сетевой насос; 13 – линия перетока; 14 – насос рециркуляции; 15 – магистраль котловой воды; 16 – запорная арматура; 17 – компрессор ГТУ; 18 – камера сгорания топлива; 19 – газовая турбина; 20 – электрогенератор; 21 – котел-утилизатор; 22 – циркуляционный насос; t_1 – температура воздуха на входе в компрессор ГТУ; $t_г$ – температура продуктов сгорания за турбиной; $t_{ку}$ – температура газов за котлом-утилизатором; t_4 – температура газов за подогревателем воды из ХВО; t_7 – температура газов за подогревателем сырой воды; $t_к$ – температура котловой воды; $t_{ов}$ – температура обратной сетевой воды

По сравнению с тепловой схемой водогрейной котельной добавлена ГТУ (поз. 17 – 20), котел-утилизатор 21, а водоводяные подогреватели 4 и 7, которые обогревались котловой водой из магистрали 15, заменены на газоводяные, как показано на рис. 1. Они обогреваются дымовыми газами из котла-утилизатора. Расчеты показателей работы котельных выполняли по методике, которая подробно изложена в [4]. В расчетах температурный режим работы водогрейных котлов принят 130/70 °С, а теплового пункта – 120/60 °С. В котельной температура воды на выходе из деаэратора и водоводяных подогревателей 4 и 7 была равна 70°С. При работе ГТУ-ТЭЦ температура воды на входе в деаэратор составляла 65 – 67°С в отопительный период и 70°С в неотопительный период. Потери воды в схеме приняты 2%. Мощность системы горячего водоснабжения выбирали почти равной мощности котла-утилизатора в табл. 1.

Температура сырой воды равна 5 °С, а температура воздуха на входе в компрессор ГТУ t_1 принята 15°С в соответствии с международными правилами ISO 2314. Рабочее топливо – природный газ с теплотой сгорания на сухую массу $Q^c_н$=33,4 МДж/м^3 и теоретическими объемами: V^0 = 9,52 м^3/м^3; $V_г^0$ = 10,6 м^3/м^3. Температура газов за котлом-утилизатором принимали равной 150 – 160 °С. КПД водогрейных котлов составляли 0,92 и 0,9 для отопительного и неотопительного периодов соответственно. Расходы котловой, сетевой добавочной и сырой воды, а также расходы рабочего и условного топлива, электрической мощности приводов насосов и тягодутьевых установок определяли в процессе расчетов тепловых схем котельных и ГТУ-ТЭЦ по методике [5].

Тепловую мощность водогрейных котлов, как известно, определяют по формуле, МВт

$$Q_к = G_{кв} \cdot Cp_в(t_к - t_{ов}), \tag{1}$$

где $G_{кв}$ – расход котловой воды, определяемый из расчетов тепловой схемы для заданной нагрузки котлов; $Cp_в$ – массовая изобарная теплоемкость воды; $t_к$ и $t_{ов}$ – температура котловой и обратной сетевой воды.

Этой мощности (нагрузки) котлов соответствуют определенные расходы рабочего, (м^3/с) и условного, (кг/с) топлива

$$B_{кр} = Q_к(Q^c_н \cdot \eta_к); B_{ку} = Q_к/(Q_у \cdot \eta_к), \tag{2}$$

где $\eta_к$ – КПД котла; $Q_у$ = 29,3 МДж/кг – теплота сгорания условного топлива.

Расход условного топлива на ГТУ, кг/с

$$B_{гу} = N/(Q_у \cdot \eta_г), \tag{3}$$

где N – электрическая мощность ГТУ, МВт; $\eta_г$ – КПД ГТУ.

Удельные расходы условного топлива в отопительный и неотопительный периоды работы котельной, кг/ГДж

$$b^{от}_{ку} = B^{от}_{ку} \cdot 10^3/(Q_{от} + Q_{гв}); b^{но}_{ку} = B^{но}_{ку} \cdot 10^3/Q_{гв}, \tag{4}$$

где $Q_{от}$ и $Q_{гв}$ – тепловая мощность отопления и горячего водоснабжения, соответственно, МВт; $B^{от}_{ку}$ и $B^{но}_{ку}$ – расходы условного топлива, кг/с, определяемые по формулам (1) и (2) для указанных периодов.

Удельные расходы условного топлива на ГТУ-ТЭЦ в эти же периоды, кг/ГДж

$$b^{от}_{гу} = (B'^{от}_{ку} + B_{гу}) \cdot 10^3/(Q_{от} + Q_{гв} + N); b^{но}_{гу} = B_{гу} \cdot 10^3/(Q_{гв} + N). \tag{5}$$

Здесь $B'^{от}_{ку}$ – расход условного топлива на котёл при неполной его загрузке в отопительный период работы ГТУ-ТЭЦ, определяемый по (1) и (2).

Коэффициент использования теплоты топлива [3]

$$k_{итт} = 34,13/b_y, \quad (6)$$

где b_y – соответствующий удельный расход условного топлива.

В табл. 2 представлены расчетные значения основных показателей работы котельных и ГТУ-ТЭЦ одинаковой тепловой мощности. Энергетическую эффективность их работы оценивали при помощи $k_{итт}$.

Таблица 2

Расчетные значения основных показателей работы котельных и ГТУ-ТЭЦ

Показатели	Котельная мощностью 55 МВт	ГТУ-ТЭЦ с ГТУ-9,5	Котельная мощностью 80 МВт	ГТУ-ТЭЦ с ГТД-16	Котельная мощностью 106 МВт	ГТУ-ТЭЦ с ГТ-20	Котельная мощностью 140 МВт	ГТУ-ТЭЦ с НК-37-1	Котельная мощностью 320 МВт	ГТУ-ТЭЦ с ГТД-60
Отопительный период работы										
Мощность системы отопления, МВт	42	42	60	60	80	80	105	150	240	240
Мощность системы горячего водоснабжения, МВт	13	13	20	20	26	26	35	35	80	80
Расход условного топлива, т/год	9,02	10,141	13,08	15,62	17,352	19,73	22,83	26,82	52,416	59,76
Электрическая мощность собственных нужд, МВт	0,569	0,448	0,826	0,735	1,06	0,943	1,395	1,235	3,233	2,725
Мощность, отпускаемая в электросеть, МВт	-	8,352	-	16,265	-	19,057	-	28,765	-	57,275
Удельный расход условного топлива, кг/ГДж	45,55	44,15	45,41	43,72	45,47	43,49	45,30	43,82	45,50	43,68
Коэффициент использования теплоты топлива	0,743	0,773	0,751	0,781	0,750	0,785	0,753	0,789	0,750	0,781
Неотопительный период работы										
Расход условного топлива, т/год	2,184	3,376	3,357	5,746	4,215	6,825	5,922	9,96	13,334	21,6
Электрическая мощность собственных нужд, МВт	0,133	0,075	0,214	0,119	0,268	0,153	0,392	0,211	0,882	0,475
Мощность, отпускаемая в электросеть, МВт	-	8,725	-	16,881	-	19,847	-	29,789	-	59,525
Удельный расход условного топлива, кг/ГДж	46,66	43,03	46,62	43,13	45,04	41,12	47	42,56	46,3	41,92
Коэффициент использования теплоты топлива	0,731	0,795	0,732	0,794	0,757	0,93	0,726	0,8	0,737	0,814

Из табл. 2 видно, что энергетическая эффективность работы всех рассматриваемых вариантов ГТУ-ТЭЦ выше, чем котельных такой же тепловой мощности, особенно в неотопительный период. Наиболее эффективно работают ГТУ-ТЭЦ, которые имеют более высокий КПД газовых турбин и более высокую температуру газов за турбиной. Нетрудно заметить, что при одинаковой тепловой мощности расход топлива на ГТУ-ТЭЦ больше, чем в котельной. Если считать, что этот перерасход топлива затрачен на выработку электрической мощности, то удельный расход условного топлива на эту выработку оказывается вдвое ниже, чем

в энергосистеме. Следует отметить также и уменьшение электрической мощности на собственные нужды ГТУ-ТЭЦ за счет уменьшения мощности тягодутьевых установок котельных в отопительный период, а также их отсутствие в неотопительный период. Учитывая, что стоимость единицы электроэнергии как минимум в 1,5 раза выше стоимости теплоты, создание ГТУ-ТЭЦ на базе существующих водогрейных котельных вполне целесообразно. Такие ТЭЦ способны покрывать как тепловые, так и электрические нагрузки в каждом конкретном регионе, повышая надежность электроснабжения и улучшая условия регулирования региональных энергосистем. Что касается срока окупаемости газотурбинных надстроек, то он зависит, главным образом, от цен на топливо, электроэнергию и теплоту и в каждом конкретном случае определяется на основании технико-экономических расчетов.

Выводы

1. Газотурбинные надстройки на базе существующих водогрейных котельных позволяют когенерационно вырабатывать электроэнергию на тепловом потреблении и уменьшить расход электроэнергии на собственные нужды.

2. Удельный расход условного топлива на ГТУ-ТЭЦ почти вдвое ниже, чем на электростанциях энергосистемы.

3. Применение ГТУ-ТЭЦ позволяет улучшить электроснабжение в отдельных регионах и избежать потерь электроэнергии в процессе её транспортировки из энергосистемы.

4. Энергетическая эффективность ГТУ-ТЭЦ выше по сравнению с раздельной схемой энергоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон України Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії та використання скидного потенціалу / Відомості Верховної Ради, 2005. – № 20. – С. 278 – 285

2. Праховник А. В. Малая энергетика : распределенная генерация в системах энергоснабжения. / А. В. Праховник. – К. : Освіта України, 2009. – 464 с.

3. Клименко В. Н. Когенерационные установки с тепловими двигателями. Часть 2. Газотурбинные когенерационные технологии / В. Н. Клименко, А. И. Мазур, А. И. Сигал. – К. : ИПЦАЛКОН НАН Украины, 2011. – 791 с.

4. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 114 с.

5. Ткаченко С. Й. Розрахунки теплових схем і основи проектування джерел теплопостачання / С. Й. Ткаченко, М. М. Чепурний, Д. В. Степанов. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 137 с.

6. Стратегія розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року. – К. : Вид-во Мін-ва палива та енергетики України, 2013. – 166 с.

Чепурной Марк Николаевич – к. т. н., доцент, профессор кафедры теплоэнергетики.

Резидент Наталия Владимировна – к. т. н., доцент, доцент кафедры теплоэнергетики.

Полищук Сергей Васильевич – студент факультета строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.
Винницкий национальный технический университет.