

УДК 621.311

М. Н. Чепурной, к. т. н., доц.; С. И. Ткаченко, д. т. н., проф.; Н. В. Пишенина**ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК ДЛЯ СОВМЕСТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОВОЙ И
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Проанализировано влияние эксплуатационных факторов на эффективность работы энергетических установок различного типа, предназначенных для комбинированного производства электроэнергии и теплоты.

Ключевые слова: парогенератор, паровая турбина, газовая турбина, условное топливо, удельный расход.

Введение

Общеизвестно, что комбинированное производство тепловой и электрической энергии является перспективной технологией, которая в значительной мере решает задачу энергосбережения и нашла отражение на законодательном уровне [1]. Применение теплоэнергетических установок для совместного производства отмеченных видов энергопродукции обуславливает экономию топлива в энергосистеме. Что касается оценки этой экономии, то предложено много методов ее определения [2 – 7]. Во многих случаях оценивать эффективность работы теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) предлагают при помощи удельных расходов условного топлива на производство электроэнергии и теплоты. Анализ методов оценки эффективности работы комбинированных установок осуществлен в [8], где показана несостоятельность таких методов в связи с невозможностью четкого определения долей общей затраты топлива на производство электроэнергии и теплоты.

В [3,5] подчеркивалось, что основным показателем эффективности работы комбинированных установок на ТЭЦ является величина (коэффициент) производства электроэнергии на тепловом потреблении, т.е.

$$E = N/Q, \quad (1)$$

где N и Q – электрическая и тепловая мощность, которая соответственно, вырабатывается на комбинированной установке.

В отмеченных выше работах подчеркивалось, что чем выше величина E , тем более эффективно должна работать теплоэнергетическая установка, эффективность работы которой предлагалось оценивать по величине экономии условного топлива в сравнении с отдельной схемой энергоснабжения. Однако закономерности влияния E на величину экономии топлива не было выявлено.

Между тем, в [8] установлено, что, кроме E , показателем эффективности работы комбинированных энергоустановок является величина, которая характеризует долю тепловой мощности сожженного топлива $Q_{\text{п}}$, которая израсходована на производство теплоты, т.е.

$$\alpha_{\text{т}} = \frac{Q}{Q_{\text{п}}} = \frac{Q}{B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \quad (2)$$

где B – затрата топлива; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания топлива.

В [8] также определено, что все коэффициенты полезного действия, которые применялись для оценки эффективности работы ТЭЦ и когенерационных установок являются функцией переменных E и $\alpha_{\text{т}}$. Однако конкретное влияние E и $\alpha_{\text{т}}$ на эффективность работы комбинированных установок осталось не выясненным.

В связи с этим ставилась задача предложить показатель эффективности работы

паротурбинных (ПТУ) и газотурбинных (ГТУ) установок, которые работают на теплоэлектроцентралях, и определить его зависимость от коэффициентов E и α_t .

Основные результаты

В отличие от [2, 4 – 6] в качестве показателя эффективности и работы комбинированных и когенерационных установок предлагается удельный расход условного топлива на совместное производство электрической и тепловой энергии – b , кг/МДж.

Для выяснения влияния на этот показатель коэффициентов E и α_t , которые по сути являются эксплуатационными характеристиками, выполнены расчеты серийных ПТУ и ГТУ, которые могут эксплуатироваться на ТЭЦ. В расчетах предполагалось, что теплоэнергетические комбинированные установки работают с номинальной электрической мощностью. Что касается тепловой мощности установок, то она изменяется согласно с особенностями эксплуатации конкретной установки. Методика расчетов комбинированных установок различных типов изложена в [9]. Результаты расчетов некоторых установок приводятся ниже.

Газотурбинная установка с котлом-утилизатором. Выбрана ГТД-25000, с такими основными характеристиками: электрическая мощность $N = 25$ МВт; коэффициент полезного действия – $\eta = 0,36$; степень повышения давления – $\lambda = 21,8$; температура газов перед турбиной 1250°C ; температура газов за турбиной $t_t = 490^\circ\text{C}$

Отработанные в ГТУ газы поступают в котел-утилизатор (КУ), в котором подогревается обратная вода системы теплофикации от 60 до 120°C . Понятно, что производство тепловой мощности в КУ зависит от температуры газов за котлом-утилизатором $t_{\text{кв}}$. Таким образом, тепловая мощность КУ прямо пропорциональна разности температур $(t_t - t_{\text{кв}})$ при условии $N = \text{const}$ и $G = \text{const}$, где G – расход продуктов сгорания (дымовых газов). Результаты расчетов основных показателей работы ГТУ с котлом-утилизатором приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные показатели работы ГТУ-ТЭЦ

Наименование	Температура за котлом-утилизатором				
	120	140	160	180	200
Расход условного топлива, кг/с	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37
Мощность утилизированной теплоты, МВт	34,602	32,746	30,870	29,011	27,112
Доля теплоты топлива, затраченного на выработку теплоты (α_t)	0,498	0,417	0,444	0,417	0,391
Коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении (E)	0,722	0,760	0,811	0,862	0,922
Удельный расход условного топлива брутто на совместную выработку энергии, кг/МДж	0,0397	0,0411	0,0422	0,0438	0,0455

Из табл. 1 видно, что наименьшая величина удельного расхода условного топлива на выработку тепловой и электрической энергии наблюдается при наибольших значениях α_t и наименьших значениях E . Следовательно, утверждение [3, 5] о том, что эффективность работы комбинированных установок должна возрастать с увеличением E для ГТУ-ТЭЦ не подтверждается. При условии одновременного уменьшения α_t и увеличение E , эффективность работы ухудшается.

Паротурбинная ТЭЦ с противодавленческой турбиной. Эта ПТУ включает парогенератор, паровую турбину, электрогенератор, промышленные потребители пара, деаэратор, питательный насос, насос обратного конденсата [9]. Пар после турбины (из противодавления) направляется к промышленным потребителям, а обратный конденсат насосом обратного конденсата перекачивается в деаэратор. Деаэратор атмосферного давления (ДСА) запитан паром из противодавления турбины при помощи дроссельного устройства. В качестве примера приводим результаты расчетов основных показателей работы ПТУ с противодавленческой турбиной Р-6-35/6 с основными характеристиками: номинальная электрическая мощность – $N = 6$ МВт; давление и температура пары перед турбиной – $P_0 =$

3,5 МПа; $t_0 = 435^\circ\text{C}$; давление и температура пара за турбиной (в противодавлении) $P_n = 0,6$ МПа; $t_n = 250^\circ\text{C}$. Давление пара за турбиной регулируемое и может изменяться от 0,4 МПа до 0,7 МПа. Понятно, что при условии $N = \text{const}$ увеличение давления за турбиной обуславливает увеличение расхода пара на турбину вследствие уменьшения рабочего теплоперепада (удельной работы) в турбине. Повышение расхода пара на турбину обуславливает, в свою очередь, увеличение тепловой мощности отработанного в турбине пара, который направляется к промышленным потребителям. Именно поэтому, расчеты показателей работы такой ПТУ выполнялись для разных значений давления пара за турбиной. При этом температура обратного конденсата составляла 100°C , температура питательной воды – 104°C , коэффициент полезного действия парогенератора – 0,91. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные показатели работы ПТУ с противодавленческой турбиной

Наименование	Давление пара за турбиной, МПа			
	0,4	0,5	0,6	0,7
Мощность, которая отдана промышленным потребителям, МВт	34,808	41,112	45,212	47,408
Расход условного топлива, кг/с	1,575	1,805	1,935	2,078
Доля теплоты топлива, затраченного на выработку теплоты (α_r)	0,7539	0,7652	0,7971	0,804
Коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении (Е)	0,172	0,151	0,133	0,124
Удельный расход условного топлива брутто на совместную выработку энергии, кг/МДж	0,040	0,0404	0,0411	0,0414

В этом случае наиболее эффективные режимы работы комбинированной установки свойственны для более высоких значений Е и меньших значений α_r , т.е. совсем иначе, чем для ГТУ. В пределах возможных эксплуатационных изменений давлений пара за турбиной, эффективность работы ПТУ изменяется незначительно (на 3,5%). Расчеты показали, что подобный характер изменений эффективности работы свойственен и для турбин с промышленным отбором пара. Последние, однако, работают с большими расходами условного топлива вследствие потерь энергии в конденсаторе.

Паротурбинная ТЭЦ с теплофикационной турбиной. Такая ПТУ включает парогенератор, теплофикационную паровую турбину типа Т; электрогенератор; конденсатор; сетевой подогреватель воды системы теплофикации; регенеративный подогреватель питательной воды; деаэрактор; конденсационный, циркуляционный, дренажный насосы; насос питательной воды [9]. В турбине есть теплофикационный отбор пара с давлением 0,12 МПа, от которого запитаны: подогреватель сетевой воды, регенеративный подогреватель и деаэрактор. В табл. 3 приведены результаты расчетов основных показателей работы ПТУ с турбиной Т-6-35, которая имеет такие характеристики: номинальная электрическая мощность – $N = 6$ МВт; давление и температура пара перед турбиной – $P_0 = 3,5$ МПа; $t_0 = 435^\circ\text{C}$; давление пара в конденсаторе 5 кПа, внутренний относительный КПД турбины 0,82. Как и в предыдущем случае считалось, что температура питательной воды 104°C , коэффициент полезного действия парогенератора 0,91. Расчеты выполнялись при условии $N = \text{const}$, при этом варьировалась доля пара из отбора турбины β , которая поступала в сетевой подогреватель воды системы теплофикации, т.е. изменялся расход пара на турбину.

Таблица 3

Основные показатели работы ПТУ с теплофикационной турбиной

Наименование	Значения β			
	0,2	0,4	0,6	0,8
Мощность теплофикационных потребителей, МВт	3,468	7,091	11,663	17,195
Расход условного топлива, кг/с	0,8195	0,8377	0,9182	1,0151
Доля теплоты топлива, затраченного на выработку теплоты (α_t)	0,144	0,288	0,434	0,578
Коэффициент выработки электроэнергии на тепловом потреблении (Е)	1,731	0,857	0,514	0,348
Удельный расход условного топлива брутто на совместную выработку энергии, кг/МДж	0,0865	0,0641	0,0522	0,0455

Здесь, как и в первом варианте с ГТУ-ТЕЦ более эффективные режимы работы наблюдаются в случае максимальных значений α_t и минимальных значений Е. Аналогичные результаты характерны и для теплофикационных турбин большей мощности. Отметим также, что работа ПТУ с теплофикационной турбиной характеризуется более высокими значениями удельной затраты условного топлива (меньшей эффективностью), что объясняется потерями теплоты в конденсаторе.

Кроме приведенных выше вариантов, выполнены расчеты работы комбинированных установок бинарного типа: на базе ГТУ с противодавленческими паровыми турбинами; на базе ГТУ с теплофикационными турбинами, которые работают на низкотемпературных рабочих телах. В обоих случаях снижение удельных расходов условного топлива на совместную выработку электроэнергии и теплоты наблюдалось при одновременном увеличении Е и несущественном уменьшении α_t .

b, кг/МДж

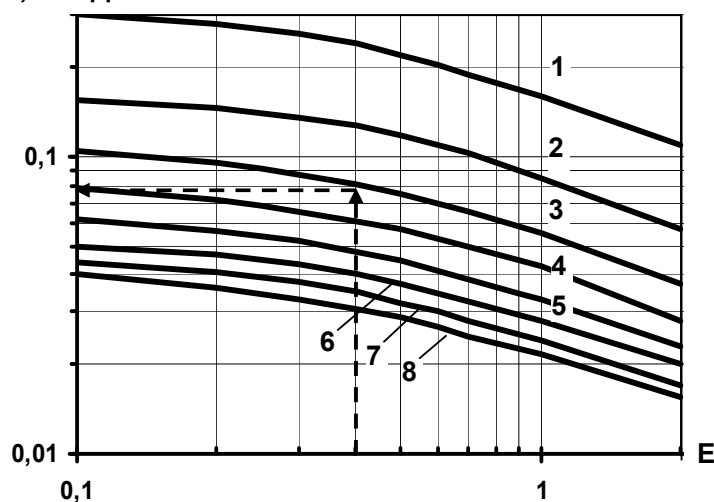


Рис. 1. Значения удельного расхода условного топлива брутто на комбинированных установках: 1 – $\alpha_t=0,1$; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,4; 5 – 0,5; 6 – 0,6; 7 – 0,7; 8 – 0,8

На основании полученных результатов можно констатировать, что ни показатели Е в [3], ни нами введенный показатель α_t порознь не могут характеризовать эффективность работы комбинированных теплоэнергетических установок. Обобщение расчетных данных для разных типов комбинированных установок показаны на рис. 1. Приведенные зависимости аппроксимируются простой и удобной для инженерных расчетов формулой для определения удельного расхода условного топлива:

$$b = \frac{0,03413}{\alpha_T (1 + E)}. \quad (3)$$

Соотношение (3) дает возможность экспресс-оценки эффективности работы существующих и проектирующихся комбинированных установок в зависимости от эксплуатационных характеристик.

Выводы

1. Предложенная величина удельного расхода условного топлива на совместную выработку тепловой и электрической энергии однозначно характеризует эффективность работы комбинированных установок различных типов.

2. Коэффициенты E и α_T порознь не могут оценивать эффективность работы комбинированных установок. Поэтому существующие методы оценки их эффективности нельзя считать удовлетворительными.

3. Полученные результаты являются необходимой предпосылкой для оценки эффективности работы существующих и вновь создаваемых комбинированных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон України про комбінуване виробництво теплової та електричної енергії та використання скидного потенціалу // Відомості Верховної Ради. – 2005. – №20 – С. 278 – 285.
2. Калинов В. Ф. Опыт внедрения новой методики расчета тепловой экономичности ТЭС / В. Ф. Калинов, В. П. Киселев // Энергосбережение и водоподготовка. – 1998. – №1. – С. 24 – 30.
3. Андрищенко А. И. О показателях совершенства проектируемых и эффективности эксплуатации действующих ПТУ-ТЭЦ / А. И. Андрищенко // Изв. вузов и энергообъединения СНГ. Энергетика. – Минск, 2001. – №4. – С. 78 – 85.
4. Вінницький І. П. Спрощений метод визначення витрат палива на відпущену електричну та теплову енергію за їх комбінованого виробництва на теплових електростанціях / І. П. Вінницький, С. М. Герасимов, П. О. Гут // Энергетика и электрификация. – 2004. – №8. – С. 42 – 45.
5. Евенко В. И. Анализ топливной экономичности газотурбинных ТЭЦ / В. И. Евенко, А. С. Стребков // Теплоэнергетика. – 2006. – №10. – С. 74 – 78.
6. Киселев Г. П. О тепловой эффективности теплоэлектроцентралей / Г. П. Киселев, Н. Л. Астахов // Энергетик. – 2006. – №3. – С. 19 – 22.
7. Кузнецов А. М. Экономия топлива при переводе турбины в теплофикационный режим / А. М. Кузнецов // Энергетик. – 2007. – №1. – С. 21 – 22.
8. Чепурний М. М. Ефективність роботи паротурбінних і газотурбінних теплоелектроцентралей / М. М. Чепурний // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2008. – №2. – С. 36 – 40.
9. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.

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

Ткаченко Станислав Иосифович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетик.

Пишенина Надежда Владимировна – аспирант кафедры теплоэнергетики.

Вінницький національний технічний університет.