

УДК 621.311

**М. Н. Чепурной, к. т. н., доц.; Н. В. Резидент, к. т. н., доц.; Т. М. Олексина;
Ю. К. Возиян**

ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ С БИНАРНЫМ ЦИКЛОМ

Определены показатели работы бинарных теплоэнергетических установок с низкотемпературным рабочим телом, созданных на базе промышленных теплоцентралей с противодавленческими турбинами.

Ключевые слова: бинарный цикл, котел, низкотемпературное рабочее тело, противодавленческая турбина, теплоэлектроцентраль.

Введение

Эффективность производства энергии является важной характеристикой топливоиспользующих установок. Её оценивают при помощи коэффициента использования теплоты топлива ($K_{ит}$), который равен отношению полезно выработанной мощности к мощности сжигаемого топлива. Комбинированная выработка теплоты и электроэнергии на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) является перспективной технологией, которая в значительной мере позволяет решать вопросы энергосбережения. Именно поэтому она признана одним из главных направлений развития энергетики Украины и отображена на законодательном уровне [1]. Понятно, что нормальная работа ТЭЦ может быть обеспечена при наличии постоянных тепловых нагрузок. Однако теперь сложилась ситуация, когда вследствие спада производства или его переориентации уменьшилось потребление технологического пара и на ТЭЦ промышленных предприятий стало невозможно вырабатывать проектные электрические мощности. Но прогнозируемая выработка электроэнергии к 2030 году должна увеличиться в 1,5 – 2 раза по сравнению с 2010 годом [2]. Кроме того, нельзя не учитывать, что в связи с нехваткой энергетического топлива снабжение горячей водой многих потребителей будет осуществляться от электродогревательных.

Одним из приоритетных направлений модернизации отечественной теплоэнергетики является применение новых эффективных технологий. К таким технологиям относится использование бинарных циклов, работающих на низкотемпературных рабочих телах (НРТ). К сожалению, в литературе освещены лишь общие принципы использования бинарных установок с НРТ [3 – 5].

Учитывая вышеизложенное, мы предприняли попытку определить основные показатели работы бинарных циклов с НРТ, созданных на базе типовых паровых турбин с невысоким противодавлением.

Основные результаты

В качестве базовых выбраны типовые противодавленческие турбины с противодавлением 0,294 МПа, основные характеристики которых приведены в табл. 1. Методика расчетов тепловых схем паротурбинных установок (ПТУ) изложена в [6].

При определении показателей работы противодавленческой паротурбинной установки с указанным типом турбин принято: температура обратного конденсата 104 °С; температура питательной воды 105 °С, коэффициент полезного действия (КПД) паровых котлов 0,92. Схема бинарных установок на базе типовой ПТУ показана на рис. 1.

Таблица 1

Основные характеристики базовых противодавленческих турбин

Показатели	Тип турбины/номер варианта				
	P-6-35/3	P-4-35/3	P-2,5-35/3	P-2,5-15/3	P-1,5-15/3
	1	2	3	4	5
Температура пара перед турбиной, °C	435	435	435	350	350
Давление пара перед турбиной, МПа	3,43	3,43	3,43	1,47	1,47
Температура пара за турбиной, °C	186	192	193	193	190
Расход пара на турбину, т/час	50,5	35,6	22,3	34,3	20,8
Расход условного топлива, т/час	5,357	3,784	2,367	3,445	2,088
Тепловая мощность потребителей пара, МВт	32,91	23,36	14,63	22,40	13,60
Суммарная полезная мощность, МВт	38,91	27,36	17,13	24,96	15,1
Удельный расход условного топлива, кг/ГДж	38,25	38,4	38,4	38,3	38,4
Электрическая мощность собственных нужд, МВт	0,463	0,328	0,212	0,178	0,111
Удельная теплота, затраченная на перегрев пара из турбины до 350 °C, кДж/кг	335	323	306	321	327
Коэффициент использования теплоты топлива	0,892	0,888	0,888	0,89	0,888

В качестве НРТ выбран бензол (C_6H_6) в связи с наличием фирмы, проектирующей и изготавливающей турбины, которые работают на паре бензола [7]. На схеме также приведены обозначения параметров теплоносителей:

P – давления; t – температуры; h – энтальпии пара; h' – энтальпии жидкости, а также расходов: D – пара; G – жидкости. Выбраны следующие начальные параметры пара бензола на входе в турбину [8]: $P_6=0,6$ МПа; $t_6=327$ °C; $h_6=656$ кДж/кг. Параметры пара на выходе из бензоловой турбины (на входе в конденсатор) приняты равными: $P_k=0,0135$ МПа; $t_k=25$ °C; $h_k=183$ кДж/кг. В связи с тем, что температура водяного пара на выходе из противодавленческих (базовых) турбин ниже температуры пара бензола на входе в бензоловую турбину, предложен частичный или полный перегрев этого пара в паровом котле. Вторичный перегрев водяного пара позволяет также несколько снизить температуру отходящих газов из парового котла, и соответственно, повысить его КПД.

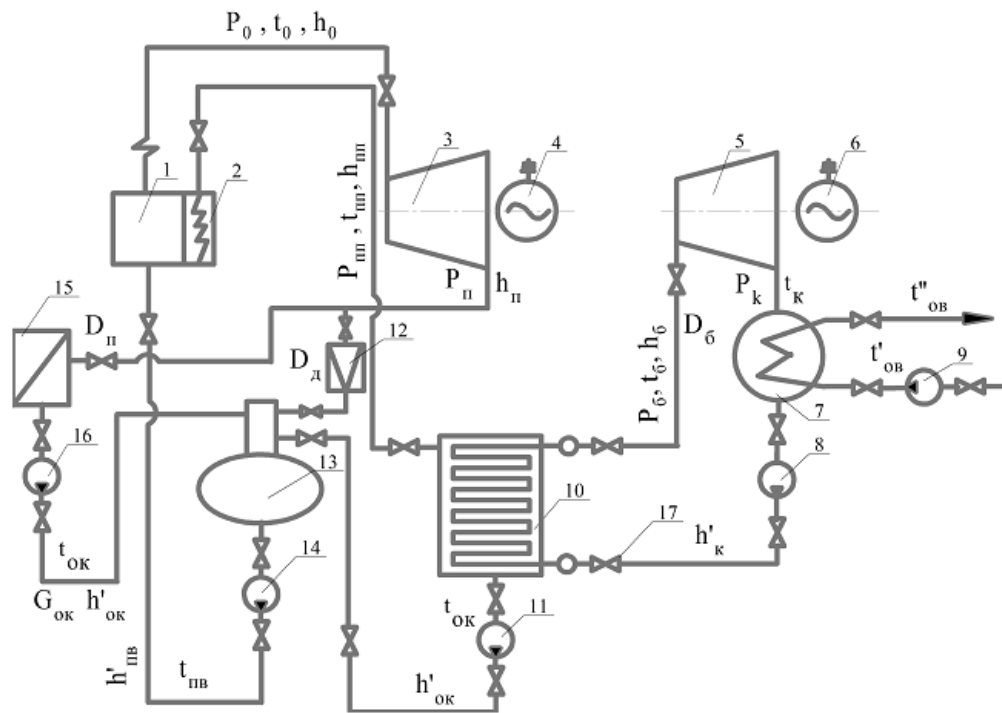


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема бинарной установки: 1 – пароводяной котел; 2 – вторичный пароперегреватель; 3 – противоаварийная паровая турбина; 4 – электрогенератор; 5 – бензоловая паровая турбина; 6 – электро-генератор; 7 – конденсатор; 8 – конденсатный насос; 9 – циркуляционный насос; 10 – котёл бензолового пара; 11 – дренажный насос; 12 – паровой редуктор; 13 – атмосферный деаэрактор; 14 – питательный насос; 15 – потребитель водяного пара; 16 – насос обратного конденсата; 17 – запорная арматура

Вследствие незначительной разницы между температурами питательной воды и обратного конденсата расходом пара в деаэрактор с достаточной степенью точности можно пренебречь. Если обозначить расход водяного пара на турбину через D_o , а долю пара, которая отдается промышленному или теплофикационному потребителю через α , то расход пара потребителям будет равен αD_o , а расход пара на вторичный перегрев и бензоловый котел – $(1 - \alpha) D_o$. Понятно, что при $\alpha=0$ весь пар из противоаварийной базовой турбины расходуется на генерацию пара бензола, а при $\alpha=1$ низкотемпературный цикл не работает. Методика расчетов тепловых схем бинарных установок описана в [6]. Результаты расчетов показателей работы ТЭЦ с бинарным циклом для вариантов базовых турбин приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные показатели работы установок при $\alpha=0$

Показатели	Варианты				
	1	2	3	4	5
Расход бензола, кг/с	36,51	25,92	16,23	24,91	15,09
Электрическая мощность бензоловой ПТУ, МВт	15,5	11,01	6,89	10,59	6,40
Электрическая мощность собственных нужд бензоловой ПТУ, МВт	0,284	0,210	0,131	0,172	0,104
Дополнительный расход условного топлива на перегрев пара противодавления, кг/с	0,16	0,108	0,064	0,104	0,064
Суммарная электрическая мощность бинарной установки, МВт	21,50	15,01	9,39	13,09	7,90
Суммарный расход условного топлива в бинарной установке, кг/с	1,648	1,160	0,722	1,061	0,644
Удельный расход условного топлива: кг/ГДж, кг/(кВт·час)	76,65	77,28	76,89	81,05	81,51
	0,276	0,278	0,277	0,292	0,293
Коэффициент использования теплоты топлива	0,445	0,442	0,443	0,421	0,418
Годовая экономия условного топлива на выработку электроэнергии по сравнению с ее выработкой в энергосистеме, т/год	10238	7079	4490	5510	3274
Сравнительное уменьшение вредных выбросов в атмосферу, т/год: оксида углерода, диоксида углерода, оксидов азота	1,621	1,022	0,698	0,921	0,524
	2870	2030	1180	1720	1030
	3,14	2,21	1,42	1,95	1,12

При условии $\alpha=0$ на бинарной установке вырабатывают только электроэнергию. Из табл. 2 наглядно видно, что при помощи бинарного цикла с НРТ электрические мощности базовых ПТУ могут быть увеличены более, чем в 3,5 раза. При этом расходы топлива, связанные со вторичным перегревом пара, из противодавления турбин увеличиваются всего на 10 – 11%. Следует отметить увеличение электрической мощности собственных нужд. Нельзя не обратить внимание на то, что при нулевой мощности тепловых потребителей общая эффективность работы бинарной установки снижается. Тем не менее, если бы дополнительная электрическая мощность вырабатывалась на электростанциях объединенной энергосистемы с КПД, равным 0,35, то удельный расход условного топлива составлял бы 0,3514 кг/(кВт·час), что в среднем на 25% выше, чем в бинарных установках. Учитывая вышеизложенное, можно говорить о сравнительной экономии топлива и, соответственно, об уменьшении вредных выбросов в атмосферу, значения которых также приведены в табл. 2.

Понятно, что эффективность работы комбинированных установок повышается при загрузке тепловых потребителей. При наличии промышленных или теплофикационных потребителей пара с долей загрузки $\alpha>0$ уменьшается расход топлива на вторичный перегрев пара из противодавления базовой турбины и увеличивается суммарная отпускаемая мощность. В качестве примера в табл. 3 и табл. 4 приведены расчетные значения основных показателей работы бинарных установок в диапазоне $0\leq\alpha\leq 1$ с базовыми турбинами Р-6-35/3 и Р-1,5-15/3 соответственно.

Таблица 3

Показатели работы бинарной установки с базовой турбиной Р-6-35/3

Показатели	Значения α					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Электрическая мощность бензоловой ПТУ, МВт	15,50	12,41	9,30	6,20	3,11	0
Мощность тепловых потребителей, МВт	0	6,58	13,16	19,76	26,32	32,91
Суммарная отпущенная мощность, МВт	21,50	24,99	28,47	31,95	35,43	38,91
Электрическая мощность собственных нужд, МВт	0,75	0,67	0,62	0,56	0,51	0,46
Расход условного топлива на вторичный перегрев пара, кг/с	0,16	0,128	0,095	0,064	0,032	0
Суммарный расход условного топлива, кг/с	1,648	1,616	1,584	1,552	1,520	1,488
Удельный расход условного топлива, кг/ГДж	76,65	64,66	55,61	48,57	42,9	38,25
Коэффициент использования теплоты топлива	0,445	0,527	0,613	0,702	0,792	0,892

Таблица 4

Показатели работы бинарной установки с базовой турбиной Р-1,5-15/3

Показатели	Значения α					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Электрическая мощность бензоловой ПТУ, МВт	6,40	5,31	3,85	2,56	1,28	0
Мощность тепловых потребителей, МВт	0	2,72	5,44	8,16	10,88	13,6
Суммарная отпущенная мощность, МВт	7,90	9,52	10,78	12,22	13,66	15,1
Электрическая мощность собственных нужд, МВт	0,152	0,131	0,112	0,101	0,090	0,085
Расход условного топлива на вторичный перегрев пара, кг/с	0,0644	0,0542	0,0386	0,0256	0,0128	0
Суммарный расход условного топлива, кг/с	0,644	0,634	0,618	0,605	0,593	0,580
Удельный расход условного топлива, кг/ГДж	81,51	66,59	57,28	49,53	43,39	38,4
Коэффициент использования теплоты топлива	0,418	0,512	0,592	0,689	0,788	0,888

Из приведенных таблиц видно, что по мере загрузки тепловых потребителей из противодействия базовой турбины уменьшаются: электрические мощности бензоловой установки и собственных нужд; общие удельные расходы условного топлива. При этом увеличиваются: суммарная (тепловая и электрическая) мощность, вырабатываемая на бинарной установке, и коэффициенты использования теплоты топлива. Более высокий прирост электрической мощности наблюдаем в установках с более низкими параметрами пара перед базовыми турбинами, у которых и больший расход топлива на вторичный перегрев пара из противодействия турбин. Графическую интерпретацию некоторых показателей работы комбинированных установок, по данным таблиц 3 и 4, приведено на рис. 2 и 3 соответственно.

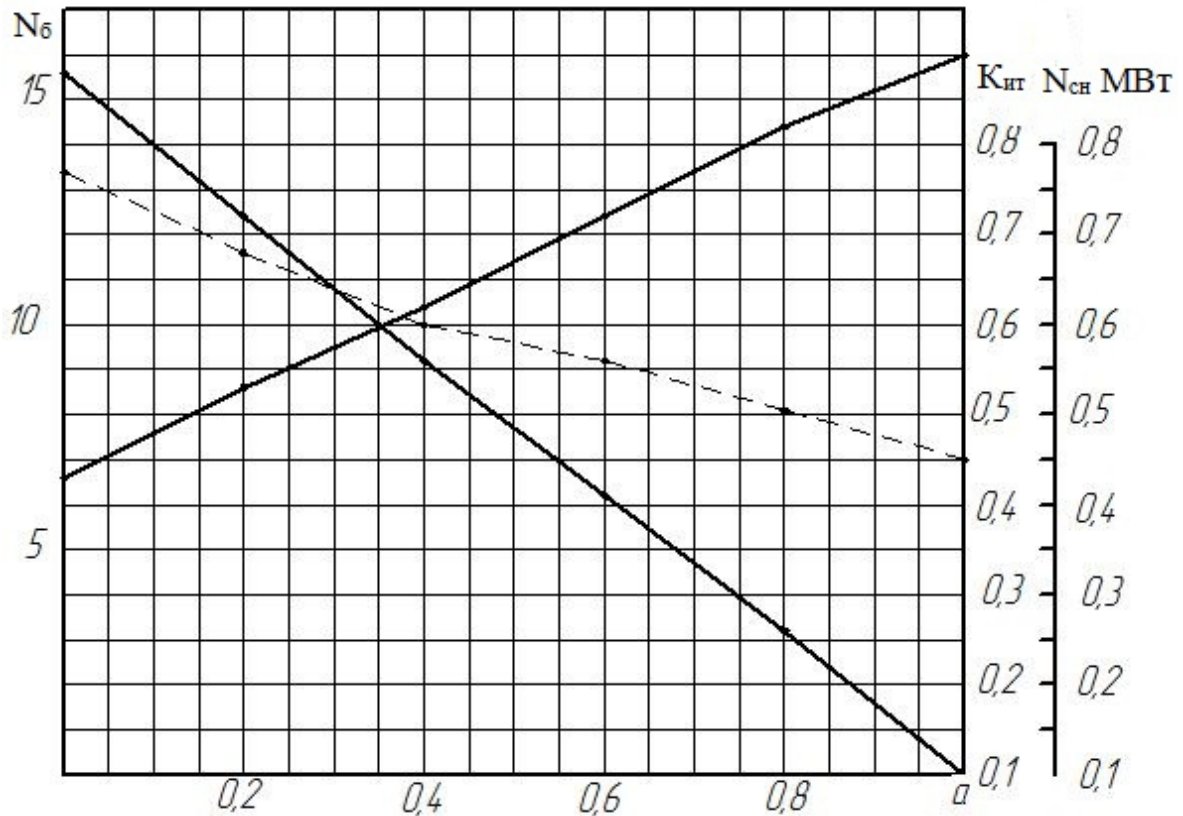


Рис. 2. Характер изменения показателей работы бинарной установки с базовой турбиной Р-6-35/3: 1 – мощность бензоловой турбины N_6 , МВт; 2 – мощность собственных нужд $N_{сн}$, МВт; 3 – коэффициент использования теплоты топлива $K_{ит}$

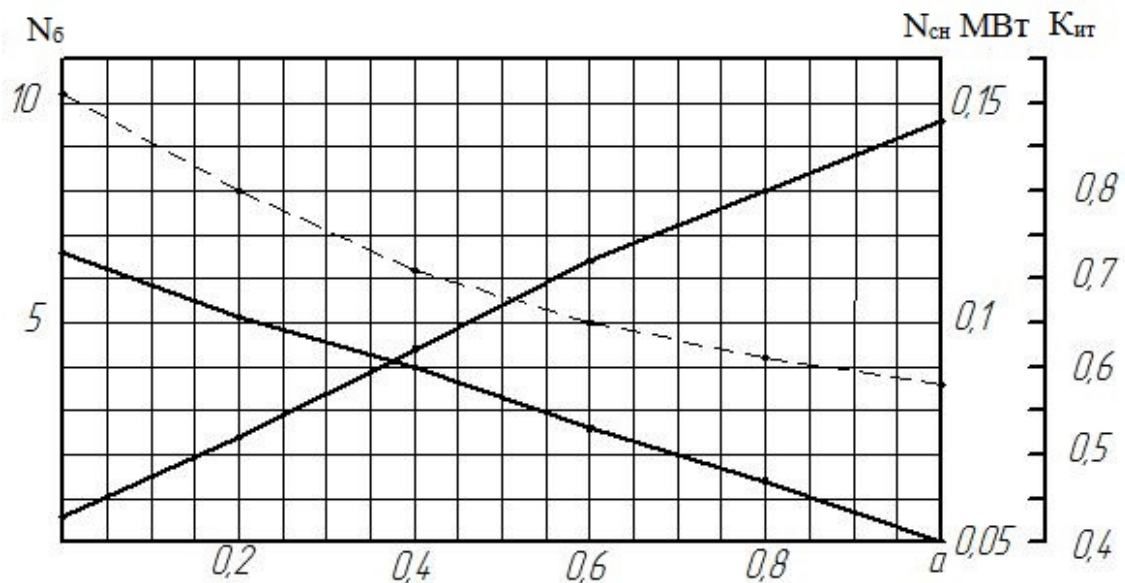


Рис. 3. Характер изменения показателей работы бинарной установки с базовой турбиной Р-1,5-15/3: 1 – мощность бензоловой турбины N_6 , МВт; 2 – мощность собственных нужд $N_{сн}$, МВт; 3 – коэффициент использования теплоты топлива $K_{ит}$

Закономерности изменения основных показателей работы бинарных установок с НРТ, работающими с различными параметрами водяного пара перед базовыми противодавленче-

скими турбинами, аналогичны. Электрические мощности бензоловых турбогенераторов линейно возрастают по мере снижения загрузки тепловых потребителей из противодействия базовых турбин. При этом почти линейно возрастают коэффициенты $K_{\text{ит}}$, характеризующие эффективность использования топлива в комбинированных установках.

Выводы

1. Применение бинарных циклов на ТЭЦ с противодействующими турбинами, имеющими невысокое давления водяного пара за турбиной, позволяет увеличить выработку электроэнергии более, чем в три раза.
2. Эффективность производства электроэнергии на ТЭЦ указанного типа в среднем на 25% выше, чем на электростанциях в энергосистеме, что позволяет получить экономию топлива и уменьшение вредных выбросов в атмосферу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон України про комбінуване виробництво теплової та електричної енергії та використання скидного потенціалу // Відомості Верховної Ради, 2005, – № 20. – С. 275 – 285.
2. Стратегія розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року. – К. : Вид-во Мін-ва палива та енергетики України, 2012. – 156 с.
3. A power general by low-temperature heat recovery // CADDET energy efficiency. Caddet Centre. September, 2002. – 42 p.
4. Сапожников М. Б. Электрические станции на низкотемпературных рабочих телах / М. Б. Сапожников, М. И. Тимошенко // Теплоэнергетика, 2005. – № 3. – С. 73 – 77.
5. Чепурний М. М. Теплоелектроцентрالی на базі газотурбінних установок і парових турбін з низькотемпературним робочим тілом / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 4. – С.21 – 25.
6. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці. / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.
7. ORMAT ENERGY CONVERTER. Technical bulletin, ORMAT JNK, 1990. – 11 p.
8. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1982. – 720 с.

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

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

Олексина Татьяна Михайловна – студентка института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Возиян Юлия Константиновна – студентка института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Винницкий национальный технический университет.