

М. Н. Чепурной, к. т. н., доц.; Н. В. Резидент, к. т. н.; Т. М. Олексина

ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ НА БАЗЕ ПРОТИВОДАВЛЕНЧЕСКИХ ПАРОВЫХ ТУРБИН И ТУРБИН С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

Определены показатели работы комбинированных бинарных установок на базе противоавленческих турбин и турбин, работающих с низкотемпературным рабочим телом.

Ключевые слова: противоавленческая турбина, бинарный цикл, теплоэлектроцентрль, низкотемпературное рабочее тело, конденсатор, условное топливо.

Введение

Общеизвестным является факт, что более 90% теплоэнергетического оборудования на тепловых электростанциях Украины исчерпали нормативный ресурс работы, а около 70% его – двойной. В соответствии с перспективным планом развития энергетики до 2030 года выработка электроэнергии в стране должно увеличиться в 2 – 2,5 раза по сравнению с 2005 г. [1]. Приращение электрогенерирующих мощностей за счет реконструкции старых или введения в действие новых энергоблоков требует значительных капиталовложений, которых в Украине сегодня нет. Отметим также, что в связи с ухудшением газоснабжения из России отопление и горячее водоснабжение в отдельных районах может осуществляться от электродотельных.

Одним из приоритетных направлений модернизации отечественной энергетики считается комбинированное производство электроэнергии и теплоты на базе имеющегося теплоэнергетического оборудования небольшой мощности. Именно здесь существуют реальные возможности применения новых эффективных технологий за средства отечественных, а не иностранных инвесторов. Среди таких технологий актуальным является применение бинарных циклов, работающих на низкотемпературных рабочих телах (НРТ) [2 – 4]. На территории Украины работает много промышленных теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) небольшой мощности с противоавленческими турбинами, снабжающими водяным паром промышленные перерабатывающие предприятия. Однако сейчас сложилась ситуация, когда вследствие сокращения производства или его переориентации сократилось или полностью прекратилось потребление пара заданного давления. В первую очередь, это относится к турбинам с противоавлением 1,5 – 1,8 МПа. Использование таких турбин для нужд теплофикации нецелесообразно в связи со значительными потерями теплоты в процессах дросселирования и охлаждения пара.

Поскольку в литературе приведены лишь некоторые общие принципы применения бинарных циклов с НРТ, то на основании вышеизложенного ставили задачу определения показателей работы бинарных установок, созданных на базе противоавленческих турбин небольшой мощности и пристроенных паротурбинных установок (ПТУ), работающих на НРТ.

Основные результаты

Базовыми выбраны типовые противоавленческие турбины с противоавлением 1,5 МПа. Методика расчетов тепловых схем паротурбинных установок изложена в [5]. Для расчетов выбраны: температура водяного пара перед турбинами $t_o = 435$ °С; начальная энтальпия пара $h_o = 3305$ кДж/кг; температура обратного конденсата $t_{ок} = 103$ °С; температура питательной воды $t_{не} = 104,8$ °С; коэффициент полезного действия (КПД) паровых котлов – 0,92. Некото-

рые показатели работы ПТУ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Некоторые характеристики и показатели работы базовых ПТУ

Показатели	Тип турбины / номер варианта			
	P-6-35/15	P-4-35/15	P-2,5-35/15	P-1,5-35/15
	1	2	3	4
Мощность электрогенератора, МВт	6	4	2,5	1,5
Температура пара в противодавлении, °С	335	338	342	345
Расход пара на турбину, т/ч	123,5	85,4	56,3	35,5
Тепловая мощность промышленных потребителей, МВт	89,21	61,81	40,90	25,87
Электрическая мощность собственных нужд, кВт	652	473	378	226
Расход условного топлива, т/ч	13,272	9,178	6,052	3,815
Удельный расход условного топлива на производство электрической и тепловой энергии, кг/ГДж	38,72	38,73	38,735	38,74

Принципиальная тепловая схема бинарной установки на базе типовой ПТУ и пристроенной ПТУ с низкотемпературным циклом показана на рис. 1, где также приведены обозначения параметров теплоносителей: P – давление; t – температура; h – энтальпия пара; h' – энтальпия жидкости; а также расходов D и G в характерных точках циклов. В качестве НРТ выбран бензол (C_6H_6), поскольку существует фирма, которая проектирует и изготавливает турбины, работающие на пару бензола [6].

Паровой котел 1 генерирует водяной пар с параметрами P_o , t_o , h_o и расходом D_o . Этот пар поступает в противодавленческую (базовую) турбину 2. Пар из противодавления турбины может поступать как к промышленным потребителям по линии 4, так и в бензоловый котел 9, который генерирует пар с параметрами P_{δ} , t_{δ} , h_{δ} и расходом D_{δ} .

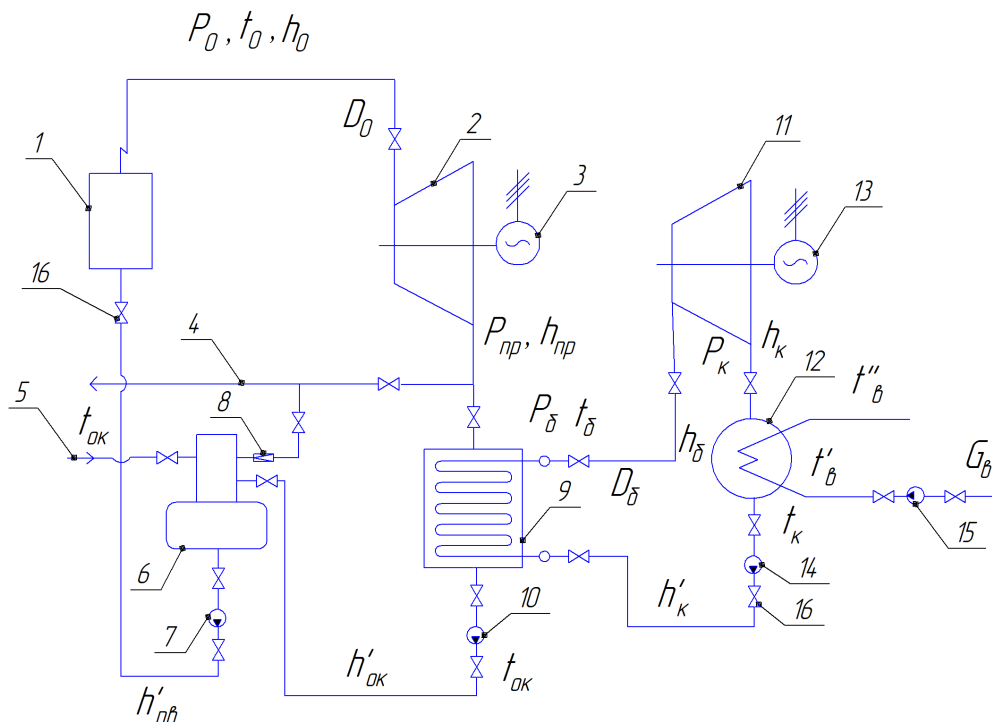


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема бинарной установки: 1 – паровой котел; 2 – противодавленческая турбина; 3 – электрогенератор; 4 – линия подачи пара промышленным потребителям; 5 – линия обратного конденсата; 6 – деаэрация; 7 – питательный насос; 8 – редуктор; 9 – котел бензолового пара; 10 – насос обратного конденсата; 11 – бензоловая турбина; 12 – конденсатор; 13 – электрогенератор; 14 – конденсатный насос; 15 – циркуляционный (сетевой) насос; 16 – запорная арматура

Если обозначить долю пара, поступающего к промышленным потребителям через α , то расходы водяного пара, поступающие к промышленным потребителям и в бензоловый котел

будут равны соответственно:

$$D_{nn} = \alpha \cdot D_0; D_{ок} = (1 - \alpha) \cdot D_0. \quad (1)$$

Обратный конденсат водяного пара с температурой $t_{ок}$ возвращается по трубопроводу 5 и по напорной линии насоса обратного конденсата 10. Пар бензола из котла 9 поступает в турбину 11, а затем в конденсатор 12. Через конденсатор насосом 15 прокачивается охлаждающая вода, которая подогревается от температуры $t'_в$ до температуры $t''_в$. Конденсат бензолового пара с параметрами t_k и h'_k при помощи насоса 14 возвращается в котел 9. Если конденсацию бензола осуществлять с давлением $P_k \geq 0,2$ МПа, то температура конденсата превышает 100 °С. В этом случае конденсатор может работать как источник теплофикации, подогревая обратную сетевую воду. Такая комбинированная установка будет называться установкой с теплофикационным бинарным циклом, поэтому следует различать два типа комбинированных установок: 1) с чисто конденсационным бинарным циклом; 2) с теплофикационным бинарным циклом.

Методика расчетов бинарных циклов освещена в [7]. Рассмотрим сначала особенности работы бинарных установок первого типа для случая, когда бензоловая ПТУ вырабатывает только электроэнергию. Для этого выбраны такие параметры бензолового пара: $P_0 = 0,6$ МПа; $t_0 = 327$ °С; $h_0 = 656$ кДж/кг; $P_k = 0,0135$ МПа; $t_k = 25$ °С; $h'_k = 183$ кДж/кг [8]. Перепад температуры воды в конденсаторе составляет 12 °С. Результаты расчетов установок первого типа при $\alpha = 0$ (весь пар из противодействия базовой турбины направляется в бензоловый котел) приведены в табл. 2, где нумерация вариантов соответствует нумерации вариантов турбин в табл. 1.

Таблица 2

Показатели работы установок с чисто конденсационным бинарным циклом ($\alpha = 0$)

Показатели	Варианты			
	1	2	3	4
Расход бензола, кг/с	98,83	68,47	45,31	28,86
Электрическая мощность бензоловой ПТУ, МВт	43,11	29,81	19,75	12,49
Электрическая мощность собственных нужд бензоловой ПТУ, кВт	385	267	175	112
Электрическая мощность собственных нужд бинарной установки, кВт	1037,2	739,8	553	337,6
Общая электрическая мощность, произведённая бинарной установкой, МВт	49,1	33,8	22,25	13,995
Удельный расход условного топлива: кг /ГДж; кг /(кВт·ч)	75,07	75,42	75,55	75,74
	0,2673	0,271	0,272	0,2725
Годовая экономия условного топлива на выработку электроэнергии по сравнению с ее выработкой в энергосистеме, т /год	31609	20996	11650	8954
Годовое уменьшение выбросов, т/год: окиси углерода; двуокиси углерода; оксидов азота	3,87	2,484	1,378	1,11
	6757	4378	2408	1915
	7,652	4,948	2,725	2,169

В первую очередь, привлекает внимание восьмикратное приращение электрической мощности за счет осуществления бинарного цикла. Вместе с тем, при отсутствии промышленных потребителей пара возрастает удельный расход условного топлива на единицу выработанной электроэнергии, хотя дополнительную электрическую мощность и вырабатывают без дополнительного расхода топлива.

Однако если бы эту дополнительную мощность вырабатывали на электростанциях энергосистемы с КПД 0,35, то удельный расход условного топлива составлял бы 97,6 кг/ГДж или 0,3154 кг/(кВт·ч). В этом случае годовая экономия условного топлива по сравнению с выработкой электроэнергии в энергосистеме должна составлять, т/год.

$$\Delta B = (0,3514 - b) \cdot N_b \cdot \tau_p, \quad (2)$$

где b – удельный расход условного топлива на комбинированной бинарной установке; N_b – мощность бензоловой ПТУ, МВт; τ_p – годовое количество рабочих часов.

В соответствии с этой экономией топлива должны были бы уменьшиться вредные выбросы в атмосферу. При условии, что рабочим топливом является природный газ с теплотой сгорания на сухую массу 33,4 МДж/м³ и теоретическими объемами воздуха $V^o=9,52$ м³/м³ и газов $V^g=10,6$ м³/м³, величины этих выбросов рассчитаны по ГДК 34.02.305–2002 «Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок» и также приведены в табл. 2.

К недостаткам работы бинарных циклов в рассмотренных вариантах при $\alpha = 0$ следует отнести очень большие расходы НРТ, которые обуславливают неоправданную громоздкость оборудования бензоловой ПТУ, увеличение затрат электроэнергии на собственные нужды, уменьшение эффективности работы по сравнению с базовым циклом. Этих недостатков в некоторой мере можно избежать в случае загрузки промышленных потребителей пара из противодействия базовой турбины, т.е. при работе $0 < \alpha < 1$. На рис. 2 в качестве примера приведены закономерности изменения основных показателей бинарной установки с базовой турбиной Р–4–35/15 (вариант 2 в табл. 1) в зависимости от значений α .

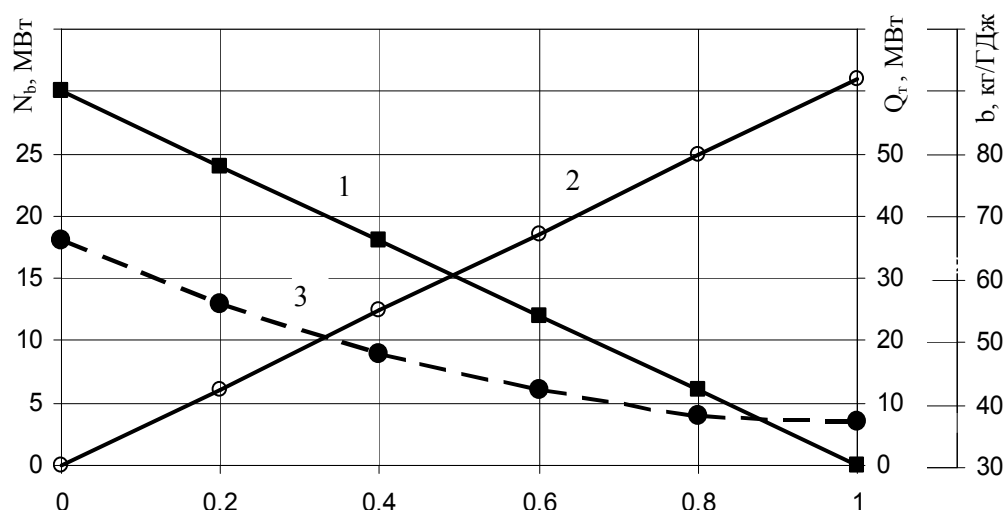


Рис. 2. Текущие значения: электрической мощности бензоловой ПТУ – N_b (линия 1); тепловой мощности, отпущенной промышленным потребителям – Q_m (линия 2); удельного расхода условного топлива – b (линия 3)

На рис. 2 наглядно видно, что с увеличением доли пара, поступающего к промышленным потребителям, электрическая мощность бензоловой ПТУ линейно уменьшается, а тепловая мощность бинарной установки линейно возрастает. При этом темп возрастания Q_t опережает темп снижения N_b . Вследствие этого увеличивается суммарная (тепловая + электрическая) мощность, вырабатываемая на ТЭЦ с бинарным циклом, а следовательно, и эффективность ее работы. При $\alpha = 0$ значения показателей работы бинарной установки соответствуют значениям, приведенным в табл. 2, а при $\alpha = 1$ – значениям, приведенным в табл. 1.

Аналогичные закономерности изменения показателей работы установок с бинарным конденсационным типом наблюдаем и для других вариантов с базовыми противодействующими турбинами, приведенными в табл. 1. Оптимальными режимами работы бинарных установок следует считать режимы, когда $\alpha = 0,5 - 0,6$. При этом электрическая мощность возрастает в

2 – 2,35 раза и примерно во столько же раз уменьшается громоздкость и стоимость оборудования бензоловой ПТУ. Эффективность работы бинарной установки, которая характеризуется удельным расходом условного топлива, возрастает в 1,5 – 1,65 раза.

Рассмотрим теперь особенности работы бинарных установок с теплофикационным циклом. Для этого случая выбираем такие параметры пара бензола: $P_6 = 1$ МПа; $t_6 = 327$ °С; $h_6 = 651,4$ кДж/кг; $P_k = 0,215$ МПа; $t_k = 117$ °С; $h'_k = 365$ кДж/кг [8]. Теплофикационная мощность бензоловой ПТУ равна мощности конденсатора с учетом его КПД. В конденсаторе обратную сетевую воду системы теплофикации с температурой 55 °С подогревают до температуры 110 °С и направляют к потребителям горячей воды. В табл. 3 приведены результаты расчетов основных показателей работы бинарных установок рассмотренного типа при условии, что весь ретурный пар поступает в бензоловый котел.

Таблица 3

Показатели работы бинарной установки с теплофикационным циклом при $\alpha=0$

Показатели	Номер варианта			
	1	2	3	4
Расход бензола, кг/с	117,38	81,32	53,81	34,04
Электрическая мощность бензоловой ПТУ, МВт	31,45	21,79	14,42	9,12
Теплофикационная мощность, МВт	46,95	32,53	21,52	13,61
Электрическая мощность собственных нужд бензоловой ПТУ, кВт	459	254	232	148
Электрическая мощность собственных нужд ТЭЦ, МВт	1,111	0,827	0,610	0,374
Суммарная мощность, произведенная бинарной установкою, МВт	84,402	58,326	38,440	24,237
Удельный расход условного топлива, кг / ГДж	43,68	43,70	43,73	43,74

Данные, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о том, что применение теплофикационного бинарного цикла повышает эффективность работы ТЭЦ вследствие увеличения суммарной (тепловой и электрической) мощности. Следует отметить увеличение расходов НРТ и расходов электроэнергии на собственные нужды. При этом усложняется проблема реализации этого варианта на практике, поэтому, как и в первом случае, рассмотрим работу комбинированной установки в диапазоне $0 < \alpha < 1$.

На рис. 3, как и на рис. 2, для примера построены расчетные зависимости изменения основных показателей работы бинарной установки с теплофикационным циклом на основе базовой турбины Р-4-35/15.

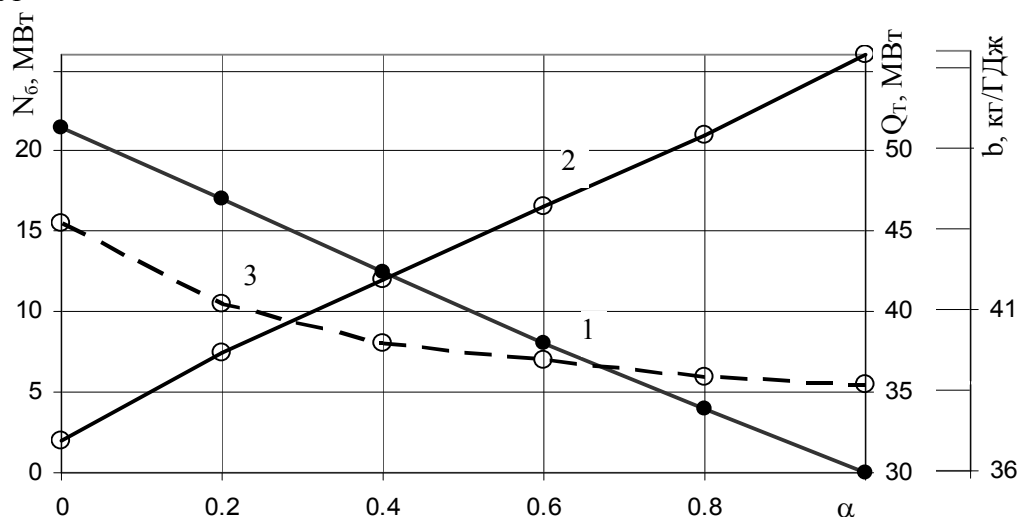


Рис. 3. Значения основных показателей работы бинарной установки с теплофикационным циклом (обозначения на рис. 2)

Здесь, как и ранее, граничным условиям $\alpha = 0$ и $\alpha = 1$ соответствуют значения показателей работы, приведенных в табл. 3 и табл. 1 соответственно.

Аналогічні співвідношення справедливі і для інших варіантів бінарних установок з базовими протипротиводавленчеськими турбінами. Ефективність роботи установок з теплофікаційним бінарним циклом на 20 – 25 % вище ефективності установок з конденсаційним бінарним циклом. Установкам з теплофікаційним бінарним циклом присущі недоліки, вказані для установок з конденсаційним циклом. Оптимальними режимами роботи розглядаємих установок можна вважати режими з $\alpha = 0,6$.

Вкажемо, що бінарні установки на базі протипротиводавленчеських турбін, які мають значительні витрати водяного пару, не можуть бути реалізовані на практиці при умові, що весь пар йде на генерацію НРТ.

Відзначимо також, що бінарні цикли можна здійснити на базі протипротиводавленчеських турбін з більш низьким протипротиводавленням (0,6 – 1,3 МПа) і меншими витратами пари. Однак в цьому випадку виникає необхідність повного або часткового перегріву пари до температур 340 – 350 °С. Такі варіанти потребують окремого розгляду.

Висновки

1. Застосування бінарних установок з НРТ дозволяє суттєво збільшити виробництво електроенергії без додаткового згорання палива.
2. Застосування теплофікаційних бінарних циклів на 20 – 25% ефективніше, ніж конденсаційних.
3. Для розглядаємих варіантів практична реалізація бінарних циклів при умові, що весь пар з протипротиводавлення базових турбін витрачається на генерацію пари НРТ, дуже проблематична.
4. Найбільш економічними режимами роботи вказаних установок є режими з $\alpha = 0,6$.
5. Отримані результати – необхідна передумова для вирішення питання про доцільність застосування бінарних установок з НРТ на базі протипротиводавленчеських турбін з значительним тиском пари з протипротиводавлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стратегія розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року. – К. : Вид-во Мін-ва палива та енергетики України, 2006. – 123 с.
2. A power generation system by low-temperature heat recovery // CADDET energy efficiency. Caddet Centre. September, 2002. – 42 p.
3. Сапожников М. Б. Електрические станции на низкотемпературных рабочих телах / М. Б. Сапожников, М. Н. Тимошенко // Теплоэнергетика. – 2005. – № 3. – С.73 – 77.
4. Чепурний М. М. Теплоелектроцентралі 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.
5. Чепурний М. М. Розрахунки теплових схем ТЕЦ та ефективності при їх модернізації / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця: ВДТУ, 1997. – 61 с.
6. ORMAT ENERGY CONVERTER. Technical bulletin. ORMAT INK, 1990. –11 p.
7. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 114 с.
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 кафедры теплоэнергетики.

Олексина Татьяна Михайловна – студентка института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения. Винницкий национальный технический университет.