



Рис. 2. Увеличение электрического КПД станции в зависимости от процента возврата конденсата

Полученные данные подтверждают потенциал выбранного направления исследований. На следующем этапе исследований следует выполнить расчет повышения эффективности работы цикла паровой турбины при использовании на привод АБТН пара с более высоким давлением – пара более высоких отборов, что позволит нагревать поток подпиточной воды до более высокой температуры. Также следует рассчитать эффективность схем с использованием дымовых газов из тракта котла в качестве греющего потока АБТН.

Литература

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/-energeticheskaya-statistika/anual-dannye/>. – Дата доступа: 19.09.2022.
2. Романюк, В. Н. Обоснование параметров АБТН для утилизации ВЭР на ТЭЦ с помощью пассивного эксперимента и определение соответствующих изменений различных оценок работы энергосистемы / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и менеджмент. – 2016. – № 1. – С. 14–23.
3. Романюк, В. Н. Время применения абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов на ТЭЦ Беларуси / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и менеджмент. – 2017. – № 2. – С. 2–5.

УДК 658.261:621.56

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛИГЕНЕРАЦИОННЫХ ТУРБОУСТАНОВОК НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА

А. В. Овсянник, В. П. Ключинский, Н. В. Овсянник

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Произведен технико-экономический анализ полигенерационных установок, позволяющих одновременно производить электрическую энергию, теплоту, холод, диоксид углерода в жидком и газообразном агрегатном состоянии, а также утилизировать часть выбрасы-

ваемого в атмосферу диоксида углерода за счет его абсорбции из продуктов сгорания и использования в коммерческих и технологических целях. Получены значения эксергетической и экономической эффективности анализируемых схем полигенерации.

Ключевые слова: турбоустановка, низкокипящее рабочее тело, производство углекислоты, повышение эффективности, полигенерация, диоксид углерода.

FEASIBILITY STUDY OF POLYGENERATION CARBON DIOXIDE TURBINE PLANTS

A. V. Ovsyannik, V. P. Kliuchinski, N. V. Ovsyannik

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

A technical and economic analysis of polygeneration plants has been carried out, allowing to simultaneously produce electrical energy, heat, cold, carbon dioxide in liquid and gaseous aggregate state, as well as to dispose of part of the carbon dioxide emitted into the atmosphere, due to its absorption from combustion products and use for commercial and technological purposes. The values of the exergetic and economic efficiency of the analyzed polygeneration schemes are obtained.

Keywords: turbine plant, low-boiling working fluid, carbon dioxide production, efficiency increase, polygeneration, carbon dioxide.

Цель данной работы – технико-экономический анализ полигенерационных установок на диоксиде углерода.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: 1) произведен эксергетический расчет полигенерационной установки; 2) определены экономические показатели схем полигенерации; 3) произведен анализ полученных результатов.

Термодинамический анализа полигенерационных установок. Анализ полигенерационных установок (схемы которых представлены в [1]) производился при помощи разработанной программы для моделирования, проведения эксергетического анализа и оптимизации тригенерационных и полигенерационных установок на основе низкокипящих рабочих тел [2]. В основе методики эксергетического анализа лежат труды Я. Шаргута, Р. Петела, В. М. Бродянского, В. Фраштера и других выдающихся ученых.

Параметры диоксида углерода перед частью высокого давления (ЧВД) и частью низкого давления (ЧНД) турбины представлены в табл. 1. В качестве сверхкритических параметров рабочего тела принимались термодинамически оптимальные параметры, т. е. параметры, при которых достигается максимальная эксергетическая эффективность турбоустановок на диоксиде углерода.

Учитывая, что для всех исследуемых вариантов схем полигенерации количество тепловой энергии, холода, углекислоты, вырабатываемых в полигенерационной установке, и их параметры одинаковы, то сравнительный анализ вышеупомянутых схем можно вести по вырабатываемой и потребляемой в установке электрической энергии. Результаты термодинамического расчета полигенерационных установок представлены в табл. 2. Представлено распределение эксергии электрической энергии по производящим и потребляющим электричество элементам полигенерационной установки, сумма которых представляет электрический эксергетический КПД полигенерационной установки.

Эксергетический анализ предложенных схем полигенерации позволяет установить:

80 Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика

- полигенерационные установки с субкритическими параметрами диоксида углерода не отличаются высокой термодинамической эффективностью;
- применение двукратного перегрева рабочего тела при неизменном субкритическом давлении перед ЧВД турбины может приводить к снижению термодинамической эффективности полигенерационной установки;
- повышение параметров углекислоты до сверхкритических, термодинамически оптимальных значений позволяет значительно улучшить эффективность турбоустановок на диоксиде углерода и, как следствие – полигенерационных установок в целом;
- применение двукратного перегрева в схемах полигенерации со сверхкритическими параметрами диоксида углерода улучшает термодинамическую эффективность полигенерации.

Таблица 1

Параметры диоксида углерода

Схема	Температура перед ЧВД турбины, °С	Давление перед ЧВД турбины, МПа	Температура перед ЧНД турбины, °С	Давление перед ЧНД турбины, МПа
Субкритические параметры	250	6,0	–	–
	250	6,0	250	5,0
Сверхкритические параметры	250	21,3	–	–
	250	26,4	250	13,7

Таблица 2

Результаты эксергетического расчета полигенерационных установок

Источник энергии	Вариант схемы		Эксергия вырабатываемого и потребляемого электричества, %				
	Перегрев	Параметры	ГТУ	ТУ	Н	К	Σ
ГТУ	Однократный	Субкритические	28,8	1,1	-0,2	-1,4	28,3
		Сверхкритические	28,8	11,7	-4,1	-1,4	35,0
	Двукратный	Субкритические	28,8	0,8	-0,1	-1,4	28,1
		Сверхкритические	28,8	13,5	-4,9	-1,4	36,0
ВЭР	Однократный	Субкритические	–	2,5	-0,4	-2,3	-0,2
		Сверхкритические	–	41,5	-14,4	-2,3	24,9
	Двукратный	Субкритические	–	2,3	-0,3	-2,3	-0,3
		Сверхкритические	–	47,9	-17,5	-2,3	28,2

Определение экономических показателей эффективности полигенерационных установок. Методика определения экономических показателей эффективности схем полигенерации представлена в работе [3].

В табл. 3 представлен анализ следующих вариантов схем: вариант № 1 – полигенерационная установка с однократным перегревом и субкритическими параметрами углекислоты перед турбиной; вариант № 2 – то же, но со сверхкритическими па-

Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика 81

раметрами углекислоты перед турбиной; вариант № 3 – со сверхкритическими параметрами и двукратным перегревом углекислоты в котле-утилизаторе.

На основании произведенного экономического анализа схем полигенерации установлено:

– полигенерационные установки с ГТУ на субкритических параметрах диоксида углерода перед турбиной не отличается высокой экономической эффективностью;

– повышение параметров углекислоты в турбоустановке до сверхкритических, термодинамически оптимальных значений значительно улучшает показатели эффективности схем полигенерации;

– применение двукратного перегрева углекислоты в котле-утилизаторе улучшает показатели экономической эффективности совместного производства различных видов энергии и углекислоты.

Таблица 3

Экономические показатели эффективности полигенерационных установок

Показатель	ГТУ			ВЭР		
	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Отпуск электрической энергии, $\times 10^6$ МВт · ч/год	21,07	26,06	26,81	968	10424	11839
Отпуск тепловой энергии, $\times 10^3$ МВт · ч/год	7,37					
Отпуск холод (+4 °С), $\times 10^3$ МВт · ч/год	1,49					
Отпуск холод (–18 °С), $\times 10^3$ МВт · ч/год	2,23					
Отпуск жидкой CO ₂ , $\times 10^3$ т/год	1,42					
Отпуск газообразной CO ₂ , $\times 10^3$ т/год	2,83					
Экономический эффект, $\times 10^6$ руб./год	8,25	9,68	9,90	2,19	5,44	5,91
Стоимость установки, $\times 10^6$ руб.	9,94	12,78	13,20	4,53	10,72	11,66
Расходы на эксплуатацию, $\times 10^6$ руб./год	8,25	9,68	9,90	0,41	0,96	1,05
Статический срок окупаемости, лет	4,3	3,7	3,6	2,5	2,4	2,4
Внутренняя норма доходности, %	22,8	27,0	27,5	39,3	41,7	41,7
<i>При ставке дисконтирования 10 %</i>						
Динамический срок окупаемости, лет	5,9	4,8	4,7	3,1	2,9	2,9
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.	9,66	16,83	17,91	10,63	27,41	29,73

Показатель	ГТУ			ВЭР		
	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
<i>При ставке дисконтирования 20 %</i>						
Динамический срок окупаемости, лет	10,9	7,3	7,0	3,9	3,6	3,6
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб. $\times 10^6$ руб.	1,27	4,16	4,59	4,14	11,09	12,01

Таким образом, сделаем вывод, что полигенерационные установки на основе диоксида углерода обладают хорошими показателями как термодинамической, так и экономической эффективности, что свидетельствует о целесообразности применения данных схем для производства электрической энергии, теплоты, холода, жидкой и газообразной углекислоты.

Литература

1. Trigeneration units on carbon dioxide with two-time overheating with installation of turbo detainer and recovery boiler / A. V. Ovsyannik [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1683, N 042010.
2. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 108–115.
3. Ключинский, В. П. Термодинамический и технико-экономический анализ тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2022. – № 1. – С. 80–89.

УДК 621.311.22:697.34:005.93

ОЦЕНКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ

А. А. Бобич

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Традиционная оценка работы ТЭЦ на базе широко известных характеристик, таких как удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии и отпуск тепловой энергии не дает полной картины и не всегда применяется корректно. В работе впервые на базе эксергетического метода и соответствующего эксергетического КПД проведена оценка термодинамической эффективности работы ТЭЦ энергосистемы Беларуси. Определены наиболее совершенные ТЭЦ с термодинамической точки зрения. Получена количественная оценка термодинамической эффективности крупных и малых ТЭЦ энергосистемы за годовой, отопительный и межотопительный периоды. Сделан вывод о целесообразности рассмотрения работ по дальнейшей реконструкции ТЭЦ с целью повышения эффективности использования природного газа на ТЭЦ.

Ключевые слова: ТЭЦ, энергосистема Беларуси, термодинамическая эффективность, эксергетический КПД, Белорусская АЭС.