

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-387-400>

УДК 658.261:621.56

Технико-экономический анализ полигенерационных турбоустановок на основе диоксида углерода

А. В. Овсянник¹⁾, В. П. Ключинский¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
(Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Представлены схемы полигенерационных установок на основе диоксида углерода, в которых источником энергии служат вторичные энергетические ресурсы и газотурбинная установка. Данные схемы полигенерации позволяют одновременно производить электрическую энергию, теплоту, холод, диоксид углерода в жидком и газообразном агрегатном состоянии, а также утилизировать часть выбрасываемого в атмосферу диоксида углерода за счет абсорбции из продуктов сгорания и использования в коммерческих и технологических целях. Представлена структура математической модели разработанной программы для проведения эксергетического анализа схем полигенерации. При помощи разработанной программы произведен эксергетический анализ схем полигенерации, в котором сравнивались полигенерационные турбоустановки с различными параметрами диоксида углерода перед турбиной, а также однократным и двукратным перегревом диоксида углерода. В качестве сравниваемых критериев принимались эксергетический электрический КПД полигенерационных установок в целом и отдельных ее элементов. Наибольшей эффективностью обладают полигенерационные установки с двукратным перегревом и сверхкритическими параметрами диоксида углерода перед турбиной. Представлена методика расчета экономических показателей схем полигенерации, которая позволяет учитывать влияние двукратного перегрева и параметров диоксида углерода в стоимости полигенерационной установки. Получены показатели экономической эффективности различных вариантов схем полигенерации, такие как внутренняя норма доходности, чистый дисконтированный доход, статический и динамический сроки окупаемости. Установлено, что все варианты схем полигенерации обладают приемлемыми показателями экономической эффективности, статический срок окупаемости предложенных схем полигенерации не превышает пяти лет, а внутренняя норма доходности не снижается менее 22,8 %.

Ключевые слова: турбоустановка на диоксиде углерода, низкокипящее рабочее тело, производство углекислоты, эксергетический анализ, КПД, повышение эффективности, полигенерация, технико-экономический анализ, оптимизация, компьютерная программа, рекомендации, схемы полигенерации, показатели экономической эффективности, диоксид углерода, двукратный перегрев

Для цитирования: Овсянник, А. В. Технико-экономический анализ полигенерационных турбоустановок на основе диоксида углерода / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 387–400. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-387-400>

Адрес для переписки

Овсянник Анатолий Васильевич
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
просп. Октября, 48,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 21-30-32
av.ovsyannik@mail.ru

Address for correspondence

Ovsyannik Anatolii V.
Sukhoi State Technical
University of Gomel
48 October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 21-30-32
av.ovsyannik@mail.ru

Feasibility Study of Polygeneration Turbine Plants Based on Carbon Dioxide

A. V. Ovsyannik¹⁾, V. P. Kliuchinski¹⁾

¹⁾Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. Schemes of polygeneration plants based on carbon dioxide are presented, in which the energy source are secondary energy resources and a gas turbine plant. These polygeneration schemes make it possible to simultaneously produce electricity, 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 structure of the mathematical model of the program that has been developed for the exergetic analysis of polygeneration schemes is presented. With the help of the program, an exergetic analysis of polygeneration schemes was performed, in which polygeneration turbine units with different parameters of carbon dioxide in front of the turbine, as well as single and double overheating of carbon dioxide were compared. The exergetic electrical efficiency of polygeneration plants as a whole and its individual elements were taken as the criteria to be compared. Polygeneration plants with double overheating and supercritical parameters of carbon dioxide in front of the turbine have the greatest efficiency. A method for calculating of the economic indicators of polygeneration schemes is presented, which makes it possible to take into account the influence of double overheating and carbon dioxide parameters in the cost of a polygeneration plant. The economic efficiency indicators of various versions of polygeneration schemes, such as the internal rate of return, net discounted income, static and dynamic payback periods are obtained. It has been established that all variants of polygeneration schemes have acceptable indicators of economic efficiency, the static payback period of the proposed polygeneration schemes does not exceed 5 years, while the internal rate of return does not decrease by less than 22,8%.

Keywords: carbon dioxide turbine plant, low-boiling working fluid, carbon dioxide production, exergy analysis, efficiency, improving efficiency, polygeneration, feasibility study, optimization, computer program, recommendations, polygeneration schemes, economic efficiency indicators, carbon dioxide, double superheat

For citation: Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2023) Feasibility Study of Polygeneration Turbine Plants Based on Carbon Dioxide. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 387–400. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-387-400> (in Russian)

Введение

Диоксид углерода – озонобезопасное, широко распространенное рабочее тело с низким потенциалом глобального потепления. Диоксид углерода находит все более широкое распространение в качестве холодильного агента, а также хладоносителя. Углекислота находит применение в различных отраслях промышленности: целлюлозно-бумажной, пищевой, фармацевтической, горнодобывающей, химической и др.

Для производства углекислоты в настоящее время получили распространение специальные промышленные углекислотные установки, большинство из которых используют в качестве источника продукты сгорания.

Помимо углекислоты промышленные предприятия также нуждаются в электрической, тепловой энергии и холоде. Как правило, все это либо закупается извне, либо производится по отдельности (например, электрическая и тепловая энергия – на мини-ТЭЦ, холод – в парокомпрессионных холодильных установках, а углекислота – в углекислотных установках).

Для совместного получения различных видов энергии в работах [1, 2] предложены схемы тригенерационных и полигенерационных установок с производством углекислоты (рис. 1). Для производства углекислоты предложенные установки используют дымовые газы предприятий либо выхлопные газы ГТУ, что позволяет отбирать часть выбрасываемой в атмосферу углекислоты и тем самым снижать экологическое давление предприятия на окружающую среду. В разработанных схемах полигенерационных установок для производства электрической энергии предложено использовать турбоустановки на диоксиде углерода, что обуславливает целый ряд преимуществ: низкие температуры источника энергии, простота конструкции, высокая автоматизация процесса, отсутствие химводоподготовки, отсутствие коррозионных отложений, эрозионных разрушений роторов турбин и др.

Схема и принцип работы установки

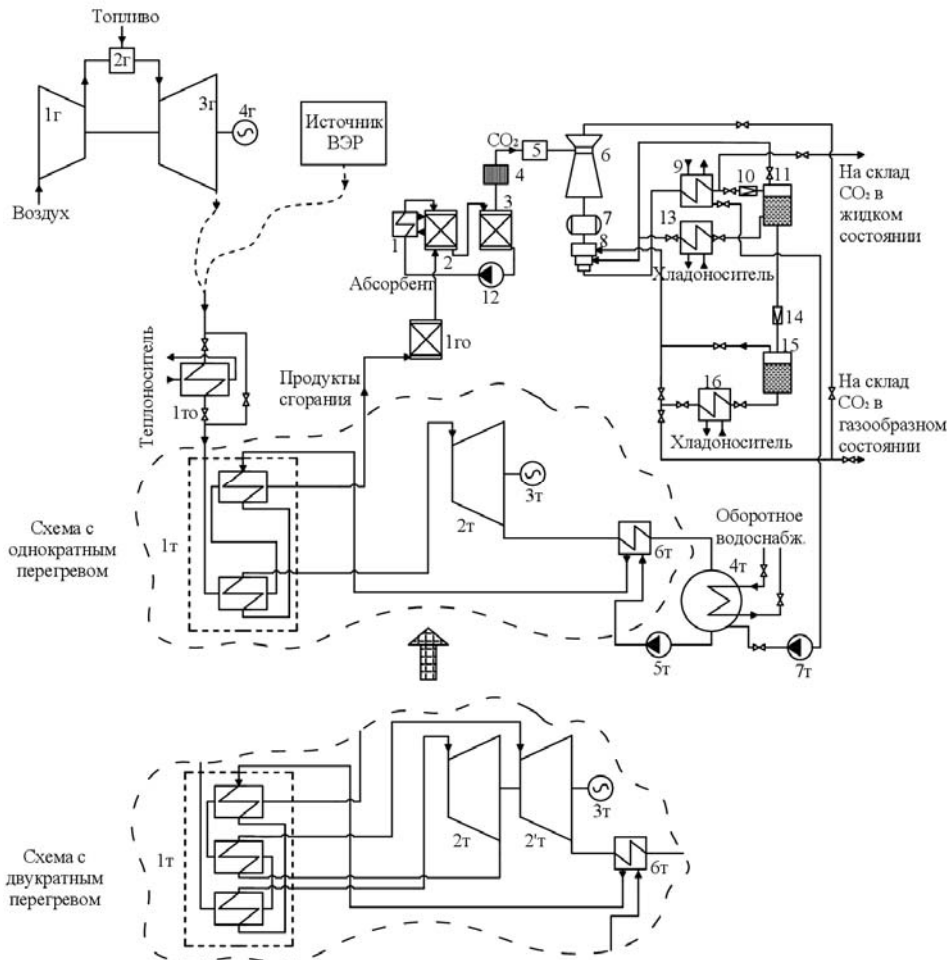


Рис. 1. Схема полигенерационной установки

Fig. 1. Diagram of a polygeneration plant

Воздух из атмосферы поступает в компрессор 1г. В компрессоре воздух сжимается и подается в камеру сгорания 2г, куда одновременно поступает и топливо. После сгорания горячие продукты сгорания поступают в газовую турбину 3г, где совершают работу по вращению вала турбины и генератора 4г. Далее продукты сгорания ГТУ либо высокотемпературные ВЭР (в зависимости от варианта схемы) поступают в подогреватель, где передают часть своей теплоты теплоносителю. Затем продукты сгорания направляются в котел-утилизатор (КУ) 1т, где и отдают оставшуюся часть теплоты диоксиду углерода. Углекислота, превратившись в пар в котле-утилизаторе, а при необходимости и пройдя процесс перегрева, поступает в турбину 2т, где совершает работу по вращению вала турбины и генератора 3т. Для схемы с двукратным перегревом рабочего тела углекислота, пройдя часть высокого давления турбины, направляется в промежуточный перегреватель и далее в часть низкого давления турбины 2'т. Пройдя все ступени турбины, углекислота поступает в теплообменный аппарат 6т, где нагревает сконденсировавшиеся в конденсаторе 4т пары углекислоты. Далее насосом 5т углекислота через теплообменный аппарат 6т подается в котел-утилизатор. Продукты сгорания поступают в очистительную установку, где очищаются от механических примесей и сернистых соединений и подаются в абсорбер, а затем в десорбер, где из продуктов сгорания отделяется чистая углекислота, которая при помощи инжектора 6 подается в ресивер 7. Из ресивера сжатый в компрессоре 8 диоксид углерода подается в теплообменник-конденсатор 9. Часть сконденсировавшейся углекислоты отправляется на склад, а часть дросселируется в регулирующем вентиле 10 и сепарируется в сепараторе 11. Из сепаратора жидкая углекислота разделяется на два потока. Первый поток поступает в теплообменник-испаритель 13, второй – на вторую ступень дросселирования 14 и сепарируется в сепараторе 15. Полученная жидкая углекислота используется для получения холода в теплообменнике-испарителе 16. Часть испарившейся в теплообменнике-испарителе 16 углекислоты поступает на склад, а часть отправляется снова в компрессор. Подпитка углекислотой конденсатора 4г производится насосом подпитки цикла 7т.

Условия технико-экономического анализа

Условия проведения технико-экономического анализа полигенерационных установок представлены в табл. 1. Анализируемые варианты установок представлены на рис. 2.

Таблица 1

Условия проведения технико-экономического анализа
Conditions for conducting feasibility study

Параметр	Значение
Расход топлива ГТУ, м ³ /ч	1000
КПД газовой турбины, %	85
КПД компрессора ГТУ, %	85

Окончание табл. 1

Параметр	Значение
Механический КПД газовой турбины, %	98
КПД генератора ГТУ, %	97
Низшая теплота сгорания топлива ГТУ, кДж/м ³	35 800
Температура ВЭР, °С	135
Тепловая мощность ВЭР, кВт	10 000
Внутренний относительный КПД турбины на углекислоте, %	82
Механический КПД турбины на углекислоте, %	98
Индикаторный КПД насоса подачи углекислоты, %	80
КПД генератора турбоустановки, %	97
КПД теплообменного аппарата, %	98
Механический КПД углекислотного компрессора, %	88
Внутренний относительный КПД углекислотного компрессора, %	75
Температурный напор в конденсаторе углекислотной установки, °С	5
КПД электродвигателя углекислотного компрессора, %	94
Температура окружающей среды, °С	15
Мощность потока теплоты для подогрева теплоносителя, кВт	1000
Мощность потока холода с температурой +4 °С, кВт	200
Мощность потока холода с температурой -18 °С, кВт	300
Необходимое количество углекислоты, кг/ч: в жидком агрегатном состоянии	190
в газообразном агрегатном состоянии	380

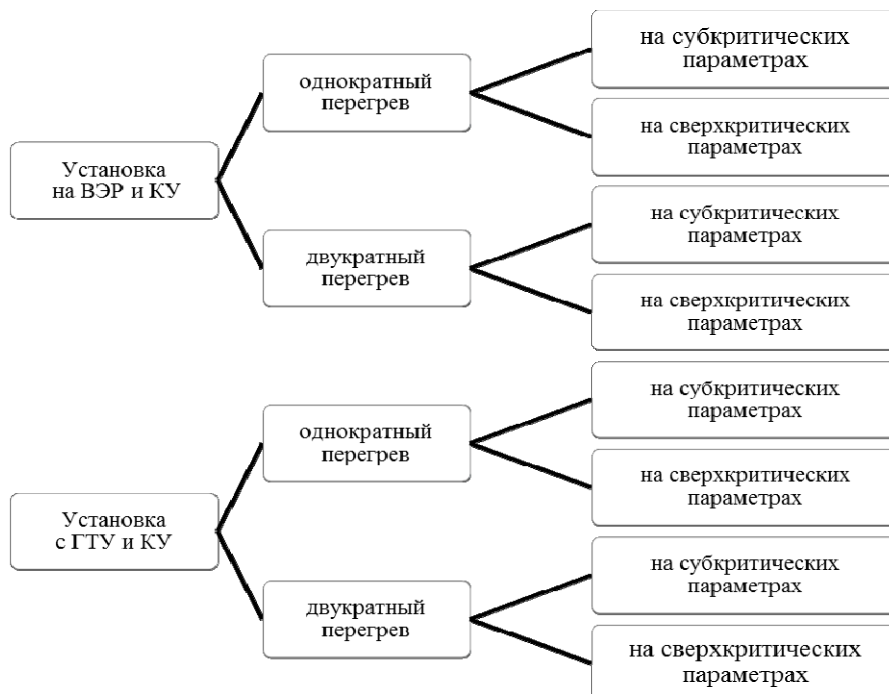


Рис. 2. Варианты исследуемых полигенерационных установок

Fig. 2. Versions of the scheme of polygeneration under study

Методика термодинамического анализа

Анализ полигенерационных установок производился при помощи разработанной программы для моделирования, проведения эксергетического анализа и оптимизации тригенерационных и полигенерационных установок на основе низкокипящих рабочих тел [3]. В основе методики эксергетического анализа лежат труды Я. Шаргута, Р. Петела, В. М. Бродянского, В. Фраштера и др. Структура математической модели программы представлена в табл. 2.

Таблица 2

Структура математической модели программы
The structure of the mathematical model of the program

Этап	Наименование	Пояснения
1	Исходные данные	Определяются исходные данные (эффективность элементов установки, параметры, объемы производимой продукции и др.)
2	Параметры в характерных точках полигенерационной установки	На основании представлений о протекающих процессах в элементах установки определяются параметры в характерных точках полигенерационной установки
3	Эксергия в характерных точках полигенерационной установки	На основании полученных параметров определяется значение эксергии в характерных точках полигенерационной установки
4	Потери эксергии в элементах полигенерационной установки	Полученные значения эксергии в характерных точках полигенерационной установки позволяют определить потери эксергии в элементах установки, выявляя элементы, в которых наблюдаются наибольшие потери
5	Эксергетический КПД полигенерационной установки	В общем виде эксергетический КПД определяется как отношение потока эксергии, соответствующего полезному эффекту, к потоку эксергии, отражающему затраты. Характеризует степени совершенства процесса [4–6, 8]

Одним из основных анализируемых эксергетических показателей схем полигенерации является эксергетический КПД (1).

Формула определения эксергетического КПД термодинамической системы выглядит следующим образом [4–8]:

$$\eta_e = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{\text{эн},i}'' - E_{\text{эн},i}^{\text{тр}}) + \sum_{j=1}^m M_j [(e_{p,t,j}'' - e_{p,t,j}^{\text{тр}}) + (e_{x,j}'' - e_{x,j}^{\text{тр}})]}{\sum_{i=1}^n (E_{\text{эн},i}' - E_{\text{эн},i}^{\text{тр}}) + \sum_{j=1}^m M_j [(e_{p,t,j}' - e_{p,t,j}^{\text{тр}}) + (e_{x,j}' - e_{x,j}^{\text{тр}})]}, \quad (1)$$

где $E_{\text{эн},i}'$, $E_{\text{эн},i}''$ – эксергия i -го потока энергии на входе и выходе из термодинамической системы соответственно, Дж; $E_{\text{эн},i}^{\text{тр}}$ – транзитная эксер-

гия i -го потока энергии, Дж; M_j – масса j -го потока вещества, кг; $e'_{p,t,j}, e''_{p,t,j}$ – термомеханическая эксергия j -го потока вещества на входе и выходе из термодинамической системы соответственно, Дж/кг; $e^{tr}_{p,t,j}$ – транзитная термомеханическая эксергия j -го потока вещества, Дж/кг; $e'_{x,j}, e''_{x,j}$ – химическая эксергия j -го потока вещества на входе и выходе из термодинамической системы соответственно, Дж/кг; $e^{tr}_{x,j}$ – транзитная химическая эксергия j -го потока вещества, Дж/кг.

Методика определения экономических показателей эффективности полигенерационных установок

Наиболее сложной задачей при определении показателей экономической эффективности полигенерационных установок является определение их стоимости.

Стоимость полигенерационной установки можно определить следующим образом:

$$S_{\Sigma}^{\text{полиген}} = S^{\text{ПД}} + S^{\text{ГТУ}} + S^{\text{ТУ}} + S^{\text{УиХ}}, \quad (2)$$

где $S^{\text{ПД}}$ – стоимость подогревателя теплоносителя, руб.; $S^{\text{ГТУ}}$ – стоимость газотурбинной установки, руб.; $S^{\text{ТУ}}$ – стоимость турбоустановки, руб.; $S^{\text{УиХ}}$ – стоимость установки совместного производства углекислоты и холода, руб.

Стоимость подогревателя теплоносителя

$$S^{\text{ПД}} = N^{\text{ПД}} s^{\text{ПД}}, \quad (3)$$

где $N^{\text{ПД}}$ – мощность подогревателя, кВт; $s^{\text{ПД}}$ – удельная стоимость подогревателя, руб./кВт.

Стоимость ГТУ

$$S^{\text{ГТУ}} = N^{\text{ГТУ}} s^{\text{ГТУ}}, \quad (4)$$

где $N^{\text{ГТУ}}$ – мощность ГТУ, кВт; $s^{\text{ГТУ}}$ – удельная стоимость ГТУ, руб./кВт.

Стоимость турбоустановки

$$S^{\text{ТУ}} = \left(1 + (T_{\text{д}}^{\text{ТУ}} - T_{\text{баз}}^{\text{ТУ}}) k_t^{\text{ТУ}} + (P_{\text{д}}^{\text{ТУ}} - P_{\text{баз}}^{\text{ТУ}}) k_p^{\text{ТУ}} + k_{\text{ВП}}^{\text{ТУ}} \right) \times \\ \times S_{\text{баз}}^{\text{ТУ}} (1 - k_{\text{тп}}) + S_{\text{баз}}^{\text{ТУ}} k_{\text{тп}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{д}}^{\text{ТУ}}$, $T_{\text{баз}}^{\text{ТУ}}$ – действительная и базовая температура диоксида углерода перед ЧВД турбины, °К; $P_{\text{д}}^{\text{ТУ}}$, $P_{\text{баз}}^{\text{ТУ}}$ – действительное и базовое давление

диоксида углерода перед ЧВД турбины, кПа; k_i^{TY} – коэффициент увеличения стоимости турбоустановки при изменении температуры диоксида углерода перед ЧВД турбины, ед./°К; k_p^{TY} – коэффициент увеличения стоимости турбоустановки при изменении давления диоксида углерода перед ЧВД турбины, ед./кПа; $k_{ВП}^{TY}$ – коэффициент увеличения стоимости турбоустановки при использовании вторичного перегрева, ед.; $k_{ВП}^{TY}$ – коэффициент увеличения стоимости турбоустановки при использовании вторичного перегрева, ед.; $k_{тп}$ – коэффициент, учитывающий элементы, стоимость которых не зависит от параметров турбоустановки, ед.

Стоимость установки по производству углекислоты и холода

$$S^{YиX} = S_{\text{баз}}^Y + \left(\sum_{i=1}^n (N_i^{YиX} s_{\text{уди}}^{YиX} - N_i^Y s_i^Y) + S_{\text{доп.обор}}^{YиX} \right) k_{\text{ре}}^{YиX}, \quad (6)$$

где $S_{\text{баз}}^Y$ – стоимость базового варианта углекислотной установки, руб.; $N_i^{YиX}$ – мощность элемента установки для производства углекислоты и холода, кВт; $s_{\text{уди}}^{YиX}$ – удельная элемента установки для производства углекислоты и холода, руб./кВт; N_i^Y – мощность элемента установки для производства углекислоты, кВт; s_i^Y – удельная элемента установки для производства углекислоты, руб./кВт; $S_{\text{доп.обор}}^{YиX}$ – стоимость дополнительного оборудования (испарителей, дросселей, сепараторов и т.д.), руб.; $k_{\text{ре}}^{YиX}$ – коэффициент, учитывающий стоимость строительно-монтажных, пусконаладочных и проектных работ, ед.

Определив стоимость полигенерационной установки, расчет чистого дисконтированного дохода, статического и динамического сроков окупаемости и т. д. не составит труда.

Результаты термодинамического анализа полигенерационных установок

Параметры диоксида углерода перед частью высокого давления (ЧВД) и частью низкого давления (ЧНД) турбины представлены в табл. 3. 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 термодинамиче-

ского расчета полигенерационных установок представлены в табл. 4. В табл. 4 представлено распределение эксергии электрической энергии по производящим и потребляющим электричество элементам полигенерационной установки, сумма которых представляет электрический эксергетический КПД полигенерационной установки.

Таблица 3

Параметры диоксида углерода
Carbon dioxide parameters

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 4

Результаты эксергетического расчета полигенерационных установок
Results of exergy calculation of polygeneration plants

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

Сравнительный анализ схем с ГТУ и ВЭР между собой не производится, так как данные схемы имеют различные области применения. Так, применение схем полигенерационных установок на вторичных энергетических ресурсах обусловлено наличием ВЭР с невысокой температурой. А применение схем полигенерационных установок на диоксиде углерода с ГТУ, согласно [9, 10], имеет место при распределенной генерации энергии в условиях отрицательных температур, когда нельзя допустить возникновения аварии вследствие замерзания воды в паротурбинной установке, а также в составе установок малой мощности.

Из табл. 4 видно, что полигенерационные установки с субкритическими параметрами диоксида углерода обладают невысокой эксергетической эффективностью. Так, для схем с ГТУ эксергетическая эффективность не превышает 28,3 % эксергии топлива, а для схем на ВЭР имеет отрица-

тельное значение, т. е. полигенерационная установка потребляет больше электрической энергии, чем производит.

Сравнив схемы субкритических полигенерационных установок с однократным и двукратным перегревом, видно, что применение двукратного перегрева рабочего тела при неизменном давлении перед ЧВД турбины приводит к снижению эффективности полигенерационной установки. Так, например, эксергия электрической энергии, вырабатываемой в полигенерационной установке с ГТУ и однократным перегревом углекислоты, составляет 28,3 % эксергии, поступающей с топливом в ГТУ, а для схемы с двукратным перегревом – 28,1 % соответственно.

Повышение параметров углекислоты до сверхкритических, термодинамически оптимальных значений позволяет значительно улучшить эффективность турбоустановок на диоксиде углерода и полигенерационных установок в целом. Так, повышение параметров турбоустановки с однократным перегревом рабочего тела для схемы, работающей на ВЭР, позволяет дополнительно превратить в эксергию электрической энергии 25,1 % эксергии ВЭР, а для схемы с двукратным перегревом – 28,5 % эксергии ВЭР.

Применение двукратного перегрева в схемах полигенерации со сверхкритическими параметрами диоксида углерода позволяет улучшить термодинамическую эффективность полигенерации. При этом дополнительно в электрическую энергию превращается от 1,0 до 3,3 % (в зависимости от варианта схемы полигенерационной установки) эксергии топлива или ВЭР соответственно.

Результаты анализа экономических показателей эффективности полигенерационных установок

Для предложенных вариантов схем полигенерационных установок определены экономические показатели эффективности (табл. 5): статический срок окупаемости, внутренняя норма доходности, динамический срок окупаемости, чистый дисконтированный доход (ЧДД). Необходимо обратить внимание, что варианты схем полигенерации с двукратным перегревом и субкритическими параметрами диоксида углерода перед турбиной обладают меньшей термодинамической эффективностью, чем аналогичные варианты схем с однократным перегревом. При этом из (5) видно, что вторичный перегрев приводит к удорожанию таких схем. Таким образом, можно однозначно утверждать, что схемы с двукратным перегревом диоксида углерода и субкритическими параметрами, обладая меньшей эффективностью и большей стоимостью, будут экономически менее эффективны, чем схемы с однократным перегревом. Поэтому расчет и анализ показателей их экономической эффективности нецелесообразен.

В табл. 5 представлен анализ следующих вариантов схем: вариант № 1 – полигенерационная установка с однократным перегревом и субкритическими параметрами углекислоты перед турбиной; вариант № 2 – со сверхкритическими параметрами углекислоты перед турбиной; ва-

риант № 3 – со сверхкритическими параметрами и двукратным перегревом углекислоты в котле-утилизаторе. При этом для схем на вторичных энергетических ресурсах, как правило, необходимо производить очистку продуктов сгорания, что отражается на стоимости всей установки.

Таблица 5

Экономические показатели эффективности полигенерационных установок

Economic performance indicators of polygeneration plants

Показатель	ГТУ			ВЭР		
	Вар. № 1	Вар. № 2	Вар. № 3	Вар. № 1	Вар. № 2	Вар. № 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 холода (+4 °C), $\times 10^3$ МВт·ч/год	1,49					
Отпуск холода (-18 °C), $\times 10^3$ МВт·ч/год	2,23					
Отпуск жидкого CO ₂ , $\times 10^3$ т/год	1,42					
Отпуск газообразного 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
При ставке дисконтирования 10 %						
Динамический срок окупаемости, лет	5,9	4,8	4,7	3,1	2,9	2,9
ЧДД, тыс. руб.	9,66	16,83	17,91	10,63	27,41	29,73
При ставке дисконтирования 15 %						
Динамический срок окупаемости, лет	7,5	5,8	5,6	3,5	3,2	3,2
ЧДД, тыс. руб.	4,47	8,99	9,67	6,62	17,31	18,77
При ставке дисконтирования 20 %						
Динамический срок окупаемости, лет	10,9	7,3	7,0	3,9	3,6	3,6
ЧДД, $\times 10^6$ руб.	1,27	4,16	4,59	4,14	11,09	12,01
При ставке дисконтирования 25 %						
Динамический срок окупаемости, лет	>20	11,3	10,5	4,6	4,1	4,1
ЧДД, $\times 10^6$ руб.	–	0,97	1,25	2,51	6,99	7,56

Из полученных результатов видно, что схема полигенерации с ГТУ на субкритических параметрах диоксида углерода перед турбиной не отли-

чается высокой экономической эффективностью. Динамический срок окупаемости данного варианта схемы при ставке дисконтирования 25 % составляет более 20 лет, что превышает срок службы такого рода установок.

Повышение параметров углекислоты в турбоустановке до сверхкритических, термодинамически оптимальных значений улучшает показатели эффективности схем полигенерации. Данное утверждение справедливо как для полигенерационных установок с ГТУ (внутренняя норма доходности увеличивается с 22,8 до 27,0 %), так и для установок, работающих на вторичных энергетических ресурсах (внутренняя норма доходности увеличивается с 39,3 до 41,7 %).

Применение двукратного перегрева углекислоты в котле-утилизаторе также улучшает показатели экономической эффективности совместного производства различных видов энергии и углекислоты (для схем с ГТУ увеличение внутренней нормы доходности составляет 0,5 %). Однако для схем полигенерации, работающих на ВЭР, использование двукратного перегрева оказывает влияние лишь на ЧДД от реализации проекта, который при ставке дисконтирования 25 % увеличивается с 6,99 до 7,56 %. Объясняется это относительно небольшим сроком окупаемости таких установок (до пяти лет), что не позволяет в полной мере проявиться экономическому эффекту от дополнительно вырабатываемой электрической энергии при применении двукратного перегрева.

В целом полигенерационные установки на основе диоксида углерода обладают хорошими показателями экономической эффективности, что свидетельствует о целесообразности применения данных схем для производства электрической энергии, теплоты, холода, жидкой и газообразной углекислоты.

ВЫВОДЫ

Предложены схемы полигенерационных установок, которые позволяют одновременно производить электрическую и тепловую энергию, холод и диоксид углерода.

Представлена структура математической модели программы для проведения энергетического анализа схем полигенерации, а также методика определения показателей экономической эффективности полигенерационных установок.

Установлена область применения полигенерационных установок с ГТУ на диоксиде углерода: при распределенной генерации энергии в условиях отрицательных температур, когда нельзя допустить возникновения аварии вследствие замерзания воды в паротурбинной установке или в составе установок малой мощности.

На основе разработанной программы произведен энергетический анализ предложенных схем полигенерации, по результатам которого можно сделать следующие выводы:

- полигенерационные установки с субкритическими параметрами диоксида углерода не отличаются высокой термодинамической эффективностью (эксергетический электрический КПД таких установок не превышает 28,3 %);
- применение двукратного перегрева рабочего тела при неизменном субкритическом давлении перед ЧВД турбины может приводить к снижению термодинамической эффективности полигенерационной установки, так для схемы с ГТУ значение эксергии топлива, преобразовываемого в электрическую энергию, снижается с 28,3 до 28,1 %;
- повышение параметров углекислоты до сверхкритических, термодинамически оптимальных значений позволяет значительно улучшить эффективность турбоустановок на диоксиде углерода и полигенерационных установок в целом. Так, для схемы на ВЭР количество эксергии ВЭР, превращаемых в электрическую энергию, увеличивается с 2,1 % до 27,1 %;
- применение двукратного перегрева в схемах полигенерации со сверхкритическими параметрами диоксида углерода улучшает термодинамическую эффективность полигенерации (количество эксергии ВЭР, превращаемой в электричество, увеличивается на 3,3 %).

На основании произведенного экономического анализа схем полигенерации можно установить:

- полигенерационные установки с ГТУ на субкритических параметрах диоксида углерода перед турбиной не отличаются высокой экономической эффективностью (динамический срок окупаемости при ставке дисконтирования 25 % превышает 20 лет);
- повышение параметров углекислоты в турбоустановке до сверхкритических, термодинамически оптимальных значений значительно улучшает показатели эффективности схем полигенерации (статический срок окупаемости для схем с ГТУ снижается с 4,3 до 3,7 лет);
- применение двукратного перегрева углекислоты в котле-утилизаторе улучшает показатели экономической эффективности совместного производства различных видов энергии и углекислоты (увеличение чистого дисконтированного дохода как для схем на ВЭР, так и для схем с ГТУ более чем на 250 тыс. рублей).

Можно заключить, 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. Trigenation 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, № 4. P. 042010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042010>.
2. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>.

3. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2020. № 3/4. С. 108–115.
4. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
5. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 295 с.
6. Сажин, Б. С. Эксергетический анализ работы промышленных установок / Б. С. Сажин, А. П. Булеков, В. Б. Сажин. М.: Московский государственный текстильный университет им. А. Н. Косыгина, 2000. 297 с.
7. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.
8. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 280 с.
9. Гафуров, А. М. Перспективные области применения энергетических установок на низкокипящих рабочих телах / А. М. Гафуров // Вестник Казан. гос. энергет. ун-та. 2015. № 1 (25). С. 93–98.
10. Тарасов, С. А. Газотурбинная установка малой мощности с утилизацией теплоты в контуре с низкокипящим рабочим телом / С. А. Тарасов, В. А. Фомин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. № 1. С. 61–68.

Поступила 25.10.2022 Подписана в печать 03.01.2023 Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Ovsyannik A. V., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I., Klyuchinski V. P. (2020) Trigenation Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detainer and Recovery Boiler. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683 (4), 042010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042010>.
2. Ovsyannik A. V. (2019) Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87> (in Russian).
3. Ovsyannik A. V., Klyuchinski V. P. (2020) Development of the Software for Optimization the Parameters of a Low-Boiling Working Substance in a Turbo-Expander Installation. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo = Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*, (3/4), 108–115 (in Russian).
4. Brodyanskii V. M., Fratsher V., Mikhalek K. (1988) *Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
5. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energia Publ. 295 (in Russian).
6. Sazhin B. S., Bulekov A. P., Sazhin V. B. (2000) *Exergetic Analysis of the Work of Industrial Installations*. Moscow, Moscow State Textile University Named After A. N. Kosygin. 297 (in Russian).
7. Grigorieva V. A., Zorina V. M. (1988) *Theoretical Foundations of Heat Engineering. Thermal Engineering Experiment*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 560 (in Russian).
8. Shargut Y., Petela R. (1968) *Exergy*. Moscow, Energia Publ. 280 (in Russian).
9. Gafurov, A. M. (2015) Promising Areas of Application of Power Plants on Low-Boiling Working Bodies. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta = Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 1 (25), 93–98 (in Russian).
10. Tarasov S. A., Fomin V. A. (2017) Gas-Turbine Installation of Small Capacity with Heat Utilization in a Low Boiling Fluid Circuit. *Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti SPbGPU [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology]*, 23 (1), 61–68 (in Russian).

Received: 25 October 2022

Accepted: 3 January 2023

Published online: 31 July 2023