

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-263-275>

УДК 658.261:621.56

Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел

А. В. Овсянник¹⁾, В. П. Ключинский¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Представлено описание разработанной программы, позволяющей моделировать, термодинамически оптимизировать и производить эксергетический анализ более чем ста различных схем тригенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел. С помощью программы произведен эксергетический анализ шести схем тригенерационных турбоустановок на органическом цикле Ренкина: на перегретом паре с парокompрессионной холодильной установкой; с промежуточным перегревом рабочего тела и парокompрессионной холодильной установкой; на перегретом паре с холодильной установкой с производством углекислоты; с промежуточным перегревом рабочего тела и холодильной установкой с производством углекислоты; на перегретом паре с холодильной установкой с производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой; с промежуточным перегревом рабочего тела, холодильной установкой с производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой. В качестве источника энергии для перечисленных схем использована газотурбинная установка. Изучена возможность применения получаемой жидкой углекислоты для охлаждения конденсатора турбоустановки на органическом цикле Ренкина. Проведен сравнительный анализ двух методов получения холода (при помощи парокompрессионной холодильной установки и холодильной установки с производством углекислоты) для использования в схемах тригенерации. Исследования базировались на методе эксергетического анализа, результаты которого представлены в виде укрупненных диаграмм Грассмана – Шаргута. Проведен технико-экономический анализ применения промежуточного перегрева в органическом цикле Ренкина, в качестве рабочего тела использовался озонобезопасный фреон R245FA. Сформулированы рекомендации по применению исследованных схем тригенерации на органическом цикле Ренкина.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, низкокипящее рабочее тело, производство углекислоты, эксергетический анализ, повышение эффективности, тригенерация, хладагент, охлаждение конденсатора углекислотой, оптимизация, схема тригенерации, диаграмма Грассмана – Шаргута

Для цитирования: Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 263–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-263-275>

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 40-20-36
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 40-20-36
av.ovsyannik@mail.ru

Trigeneration Turbine Units Based on Low Boiling Working Fluids

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

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

Abstract. A program that allows modeling, thermodynamically optimizing and performing exergetic analysis of more than a hundred different variations of the schemes of trigeneration turbine units based on low-boiling working fluids. With the aid of the program that had been developed, an exergetic analysis of six schemes of trigeneration turbine units on the organic Rankine cycle was performed, viz. on an overheated steam with a steam compression refrigeration unit; with an intermediate overheating of the working fluid and a steam compression refrigeration unit; on an overheated steam with a refrigeration unit with carbon dioxide production; with an intermediate overheating of the working fluid and a refrigeration unit with carbon dioxide production; on an overheated steam with a refrigeration unit with production carbon dioxide and cooling of the turbine condenser with liquid carbon dioxide; with intermediate overheating of the working fluid, a refrigeration unit with carbon dioxide production and cooling of the turbine unit condenser with liquid carbon dioxide. A gas turbine unit was used as an energy source for the above-mentioned schemes. The possibility of using the resulting liquid carbon dioxide to cool the condenser of a turbine unit on an organic Rankine cycle has been studied. A comparative analysis of two methods of obtaining cold (using a steam compression refrigeration unit and a refrigeration unit with carbon dioxide production) for use in trigeneration schemes has been carried out. The research was based on the method of exergetic analysis, the results of which are presented in the form of enlarged Grassmann – Shargut diagrams. A technical and economic analysis of the use of intermediate overheating in the organic Rankine cycle has been carried out, ozone-safe freon R245FA was used as the working fluid. Recommendations for the application of the studied trigeneration schemes on the organic Rankine cycle are formulated.

Keywords: organic Rankine cycle, low-boiling working fluid, carbon dioxide production, exergetic analysis, efficiency improvement, trigeneration, refrigerant, cooling of the condenser with carbon dioxide, optimization, trigeneration scheme, Grassmann – Shargut diagram

For citation: Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2022) Trigeneration Turbine Units Based on Low Boiling Working Fluids. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (3), 263–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-263-275> (in Russian)

Введение

Тригенерация – эффективный способ удовлетворения потребителей электроэнергией, теплотой и холодом, необходимыми в различных отраслях промышленности (для реализации технологических процессов), а также в сфере услуг и жилищно-коммунальном хозяйстве [1]. В определенных условиях тригенерация позволяет снизить затраты топливно-энергетических ресурсов и улучшить экологические показатели генерирующих установок [2].

Для утилизации низкопотенциальных источников энергии (например, тепловых отходов предприятий, выхлопных газов газотурбинной установки (ГТУ), продуктов сжигания биотоплива и других низкопотенциальных топлив) все чаще используются турбоустановки на низкокипящих рабочих телах (НКРТ) [1, 3–18]. В случае когда рабочее тело имеет более низкую, чем у воды, температуру кипения, его испарение происходит при относи-

тельно невысокой температуре, что и позволяет утилизировать низкопотенциальную энергию.

Однако выбор рабочего тела – это сложная и многокритериальная задача [19–21]. Решение Монреальского протокола коренным образом изменило подход к традиционным озоноразрушающим хладагентам, и, начиная с 1990-х гг., на одно из первых мест вышел вопрос об опасности изменения климата и сохранения эмиссии парниковых газов, вызванной применением таких хладагентов. Для анализа экологической целесообразности применения хладагентов используют такие параметры, как озоноразрушающий потенциал (ОРП) и потенциал глобального потепления (парникового эффекта). Для хладагентов группы хлорфторуглеродов $ОРП \geq 1$, гидрохлорфторуглеродов $ОРП < 0,1$, гидрофторуглеродов $ОРП = 0$ [2].

Выделяют группы требований к НКРТ: экологические, термодинамические, эксплуатационные и экономические. Найти хладагенты, отвечающие всем перечисленным критериям, практически невозможно [5]. С термодинамической точки зрения, один из главных показателей при выборе рабочего тела – максимальная удельная работа или максимальный коэффициент полезного действия цикла.

Эксергия – предельное значение энергии, которое может быть полезным образом использовано (получено или затрачено) в термодинамическом процессе с учетом ограничений, накладываемых законами термодинамики. Эксергетический анализ, учитывающий потери от неравновесности процессов в системе, позволяет выполнить как относительную, так и абсолютную оценку степени термодинамического совершенства, применяемых технологий, в отличие от анализа, основанного на энергетическом КПД [6–8].

Проведем эксергетический анализ тригенерационных турбоустановок, использующих низкокипящие рабочие тела. Методика термодинамического анализа турбодетандерных циклов представлена в [6].

Описание и принцип работы программы

Для изучения эксергетической эффективности тригенерационных турбоустановок разработана программа, позволяющая производить эксергетический анализ более чем ста различных вариантов схем с применением различных НКРТ. В качестве источников энергии используются: ГТУ, вторичные энергетические ресурсы и котлоагрегат. Расчет ГТУ производится с учетом допустимой (по техническим соображениям) температуры продуктов сгорания, поступающих в газовую турбину.

Программа позволяет произвести расчет трех различных вариантов турбоустановки на органическом цикле Ренкина (ОЦР): без перегрева, на перегретом паре и с промежуточным перегревом. Оптимальные с эксергетической точки зрения параметры рабочего тела перед турбиной определяются методом равномерного поиска. Также проверяются допустимость

полученных циклов и возможность установки регенеративного теплообменного аппарата на выходе из турбины.

Критерием допустимости ОЦР является степень сухости рабочего тела в процессе расширения в турбине. Полученный цикл не может использоваться, когда степень сухости рабочего тела: перед турбиной ниже допустимой (рис. 1а), в промежуточных ступенях турбины (рис. 1б) или перед последними ступенями (рис. 1с) достигает недопустимых значений. Для определения возможности реализации цикла программа устанавливает степень сухости рабочего тела в различных точках процесса расширения и сравнивает эти значения с допустимыми (например, допустимая степень сухости не должна быть ниже 1). В случае если хотя бы одно из полученных значений не соответствует заданному критерию, цикл выбраковывается и дальнейший его расчет не производится, программа переходит к анализу цикла с другими параметрами.

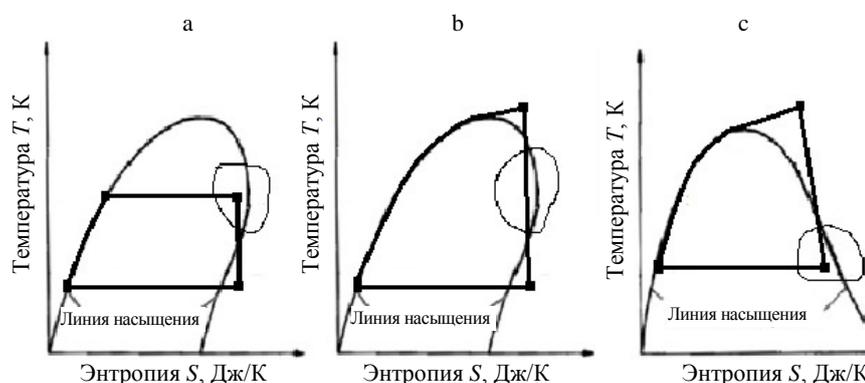


Рис. 1. Случаи недопустимых циклов для турбоустановок на низкокипящих рабочих телах: а – степень сухости рабочего тела достигает недопустимых значений в начале процесса расширения; б – в процессе расширения; с – в конце процесса расширения

Fig. 1. Cases of unacceptable cycles with the use of turbine units on low-boiling working fluids: а – the degree of dryness of the working fluid at the beginning of the expansion process reaches unacceptable values; б – the degree of dryness of the working fluid during the expansion process reaches unacceptable values; с – the degree of dryness of the working fluid at the end of the expansion process reaches unacceptable values

В программе также предусмотрен расчет двух вариантов холодильных установок (ХУ): парокомпрессионной с возможностью переохлаждения рабочего тела и установки для производства жидкой и газообразной углекислоты с возможностью получения холода (рис. 2) [8, 9, 11].

На рис. 2 представлена схема тригенерационной установки с производством углекислоты, включающая: 1 – теплообменный аппарат; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор холодильной установки; 10, 14 – регулирующий вентиль; 11, 15 – сепаратор; 12, 5т – насос; 13, 16 – испаритель; 1то – подогреватель тепловой нагрузки; 1т – котел-утилизатор; 2т – турбину на НКРТ; 3т, 4г – генератор; 4т – конденсатор ОЦР; 6т – реге-

неративный теплообменный аппарат; 1г – компрессор ГТУ; 2г – камеру сгорания ГТУ; 3г – газовую турбину.

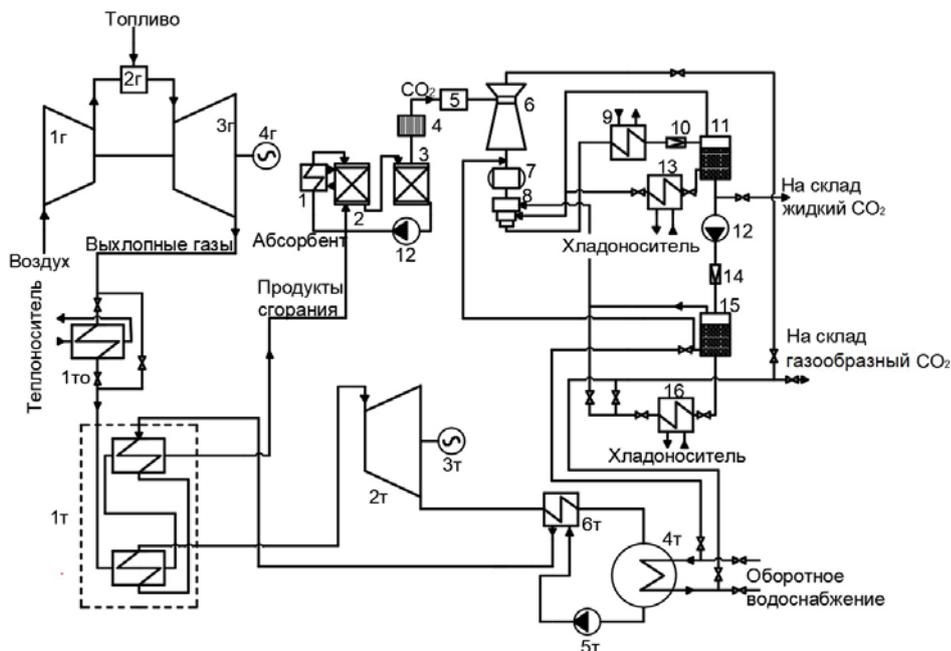


Рис. 2. Схема тригенерационной установки с производством углекислоты

Fig. 2. Diagram of a trigeneration unit with carbon dioxide production

Воздух из атмосферы поступает на всасывание в компрессор, сжимается и подается в камеру сгорания одновременно с топливом. После сгорания горячие газы совершают работу по вращению вала турбины, соединенного с валом генератора. Затем продукты сгорания все еще с довольно высокой температурой попадают в подогреватель тепловой нагрузки, передавая часть своей энергии теплоносителю, и далее – в котел-утилизатор, где и отдают оставшуюся часть энергии НКРТ. Низкокипящее рабочее тело, превратившись в пар в котле-утилизаторе, а при необходимости и пройдя процесс перегрева, поступает в турбину, где совершает работу по вращению ее вала, а затем и связанного с ним вала генератора. Затем НКРТ, будучи все еще в перегретом состоянии, направляется в регенеративный теплообменный аппарат, в котором нагревает сконденсировавшиеся в конденсаторе ОЦР пары НКРТ. Далее насос 5т повышает давление НКРТ, рабочее тело проходит регенеративный теплообменный аппарат и снова поступает в котел-утилизатор. Продукты сгорания попадают в установку абсорбер – десорбер, где отделяется чистый CO₂. Полученная углекислота при помощи инжектора подается в ресивер. Далее сжатый в компрессоре диоксид углерода подается в конденсатор холодильной установки, охлаждается, дросселируется в регулирующем вентиле и сепарируется в сепараторе. Часть жидкой углекислоты отправляется на склад, оставшаяся поступает на вторую ступень дросселирования 14 и сепарируется в сепараторе 15.

Жидкая углекислота частично используется для получения холода (тригенерация энергии) в испарителях и конденсации рабочего тела в конденсаторе ОЦР. Это приводит к повышению энергетической эффективности установки.

Результаты выводятся двумя способами: графическим – в виде схем, на которых представлены необходимые параметры, и текстовым – в виде текстового файла (отчета), создаваемого программой в зависимости от выбранного варианта схемы.

Результаты исследований

При помощи разработанной программы произведен эксергетический анализ следующих схем тригенерации с: подогревателем теплоносителя, турбоустановкой на перегретом паре, парокомпрессионной холодильной установкой (рис. 3); подогревателем тепловой нагрузки, промежуточным перегревом рабочего тела в турбоустановке и парокомпрессионной холодильной установкой (рис. 4); подогревателем тепловой нагрузки, турбоустановкой на перегретом паре, холодильной установкой с производством углекислоты (рис. 5); подогревателем тепловой нагрузки, промежуточным перегревом рабочего тела в турбоустановке и холодильной установкой с производством углекислоты (рис. 6); подогревателем тепловой нагрузки, турбоустановкой на перегретом паре, холодильной установкой с производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой (рис. 7); подогревателем тепловой нагрузки, промежуточным перегревом рабочего тела в турбоустановке, холодильной установкой с производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой (рис. 8).

Источник энергии для всех исследуемых вариантов схем – газотурбинная установка. В качестве рабочего тела ОЦР принят фреон R245FA – один из наиболее термодинамически эффективных озонобезопасных НКРТ [10]. Для удобства сравнения циклов рабочим телом для холодильной установки с производством углекислоты и парокомпрессионной холодильной установки выбран R744 (углекислота). Исходные данные и необходимые термодинамические параметры циклов приведены в табл. 1.

Результаты эксергетического анализа представлены на рис. 3–8 в виде укрупненных диаграмм Грассмана – Шаргута [20–24]. Используются следующие сокращения: П – подогреватель тепловой нагрузки; ХУ – холодильная установка; ТУ – турбоустановка; ГТУ – газотурбинная установка. Все параметры на диаграммах указаны в процентах, в качестве ста процентов принята эксергия топлива, поступающего в камеру сгорания газотурбинной установки, а эксергия воздуха, забираемого из окружающей среды с температурой 15 °С, принята за точку отсчета. Тогда эксергия воздуха, обладающего параметрами окружающей среды (температура, давление, концентрация и т. д.), будет равна нулю.

Таблица 1

Исходные данные и термодинамические параметры исследуемых циклов

Initial data and thermodynamic parameters of the cycles under study

Газотурбинная установка	
Степень повышения давления, ед.	14,6
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	33500
Допустимая температура на входе в газовую турбину, °С	1100
Температура выхлопных газов, °С	550
Подогреватель теплоносителя	
График работы теплосети, °С	110/70
Органический цикл Ренкина	
Температура дымовых газов на входе в котел-утилизатор, °С	437
Максимально допустимая температура низкокипящего рабочего тела перед турбиной, °С	250
Максимально допустимая температура низкокипящего рабочего тела промежуточного перегрева, °С	250
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора, °С	25
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора в случае использования для его охлаждения жидкой углекислоты, °С	4
Парокомпрессионная холодильная установка и установка по производству углекислоты и холода	
Получаемая температура холода, °С	2
Температура окружающей среды, °С	15
Температура низкокипящего рабочего тела на выходе из конденсатора, °С	22
Примечание. Давление рабочего тела перед турбиной и в промежуточном перегревателе определяется программой автоматически как термодинамически оптимальное для данного цикла [21]. Например, для рис. 3 оптимальное давление 5,89 МПа.	

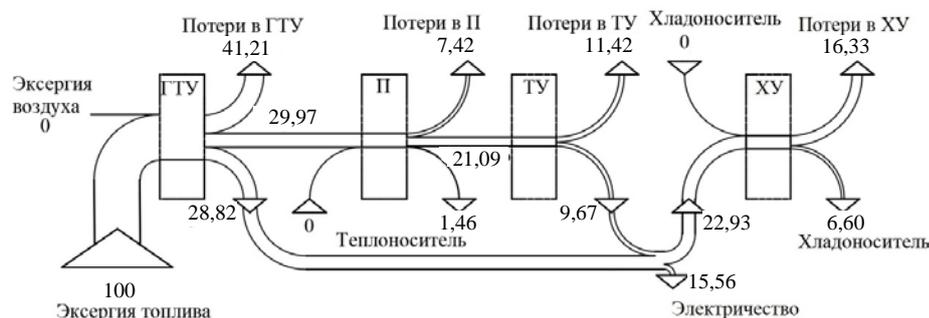


Рис. 3. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки на перегретом паре с парокомпрессионной холодильной установкой

Fig. 3. Grassmann – Sargut diagram of a trigeneration unit on superheated steam with a vapor compression refrigeration unit

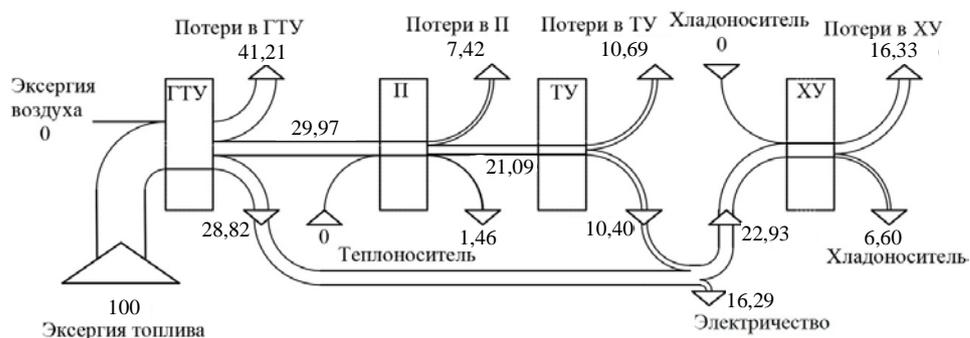


Рис. 4. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки с промежуточным перегревом и парокompрессионной холодильной установкой

Fig. 4. Grassmann – Shargut diagram of a trigeneration unit with intermediate superheating and a steam compression refrigeration unit

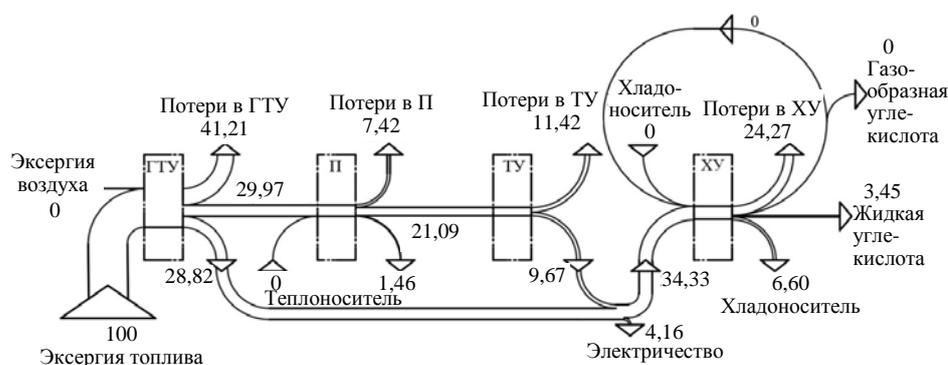


Рис. 5. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки на перегретом паре с установкой по производству углекислота

Fig. 5. Grassmann – Shargut diagram of trigeneration unit on superheated steam with a carbon dioxide production unit

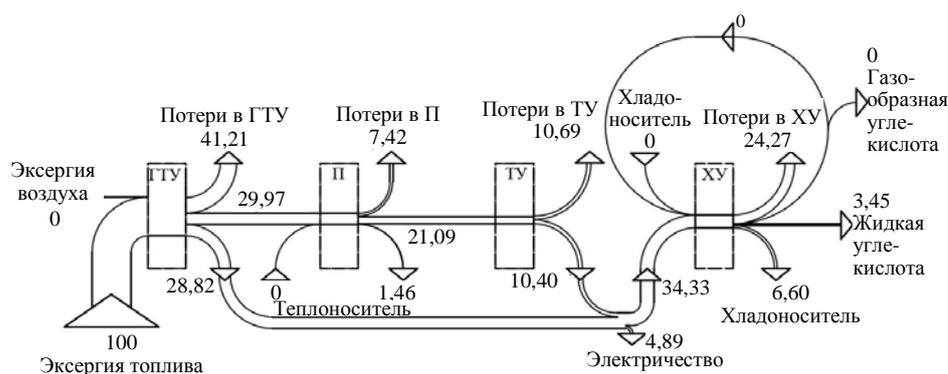


Рис. 6. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки с промежуточным перегревом и установкой по производству углекислота

Fig. 6. Grassmann – Shargut diagram of a trigeneration unit with intermediate superheating and a carbon dioxide production unit

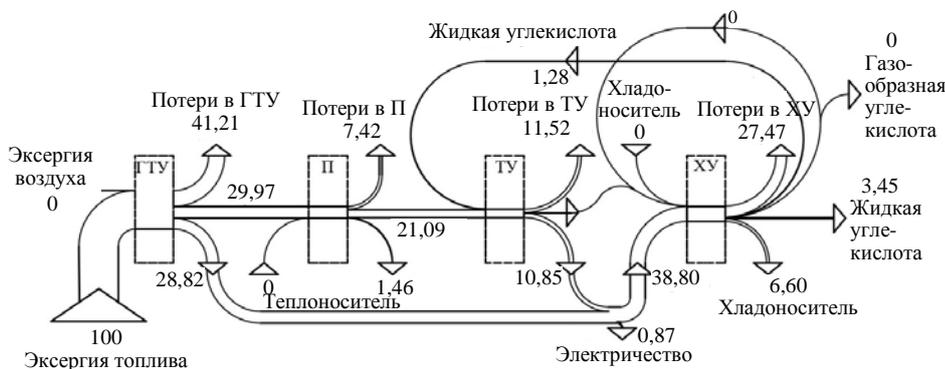


Рис. 7. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки на перегретом паре с производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой

Fig. 7. Grassmann – Shargut diagram of a trigeneration unit on superheated steam with carbon dioxide production and cooling of the turbine unit condenser with liquid carbon dioxide

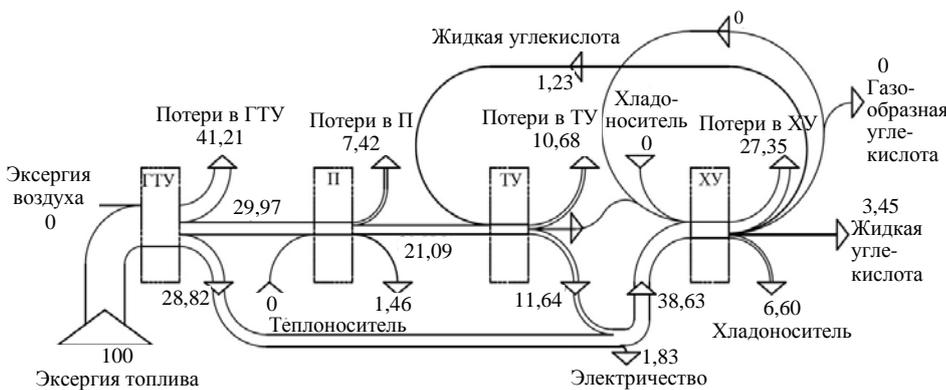


Рис. 8. Диаграмма Грассмана – Шаргута тригенерационной установки с промежуточным перегревом, производством углекислоты и охлаждением конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой

Fig. 8. Grassmann – Shargut diagram of a trigeneration unit with intermediate superheating, carbon dioxide production, and cooling of the turbine unit condenser with liquid carbon dioxide

Промежуточный перегрев рабочего тела во всех исследуемых вариантах (рис. 3–8) более эффективен по сравнению с турбоустановкой на перегретом паре. Это связано со снижением потерь эксергии в ОЦР. Технико-экономические показатели двух вариантов турбоустановки (на перегретом паре и с промежуточным перегревом) (табл. 2) также свидетельствуют об экономической целесообразности применения схем с промежуточным перегревом.

Тригенерационная турбоустановка с производством углекислоты обладает несколько меньшим эксергетическим КПД, чем с парокompрессионной холодильной машиной. Однако она имеет дополнительный эксергетический эффект в виде производимой жидкой и газообразной углекислоты, что не учитывалось в расчетах.

Таблица 2

Технико-экономические показатели турбоустановки на перегретом паре
и с промежуточным перегревомTechnical and economic indicators of turbo units on superheated steam
and with intermediate overheating

Параметр	Турбоустановка		Примечание
	на перегретом паре	с промежуточным перегревом	
Количество теплоты Q , поступающей в котел-утилизатор, ГДж	17,90	17,90	Исх. данные
Рабочее тело	R245FA	R245FA	
Температура низкокипящего рабочего тела перед частью высокого давления, °С	250	250	Исх. данные
Давление низкокипящего рабочего тела перед частью высокого давления, МПа	5,90	7,70	Программа*
Температура низкокипящего рабочего тела перед частью низкого давления, °С	–	250	Программа*
Давление низкокипящего рабочего тела перед частью низкого давления, МПа	–	1,80	Программа*
КПД η , %	22,80	24,50	Программа*
Вырабатываемая электроэнергия N , кВт	1133	1216	$N = Q/0,36\mu$
Стоимость установки C_y , $\times 10^6$ руб.	7,02	7,49	[25, 26]
Стоимость электроэнергии C_3 , $\times 10^{-2}$ руб./кВт·ч	28,70	28,70	Исх. данные
Экономия ΔC , $\times 10^6$ руб./г.	2,28	2,44	$\Delta C = NC_3$
Чистая прибыль за 10 лет эксплуатации Π , $\times 10^6$ руб.	15,78	16,91	$\Pi = 10\Delta C - C_y$
Программа* – данные получены авторами.			

Охлаждение конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой приводит к увеличению вырабатываемой электрической энергии в ОЦР. Это связано со снижением параметров рабочего тела на выходе из турбины и, как следствие, с увеличением располагаемого теплоперепада. При этом затраты эксергии на производство углекислоты увеличиваются, превосходя положительный эффект. Но это позволяет предотвратить выброс углекислоты в окружающую среду и отказаться от внешнего источника охлаждения (системы обратного водоснабжения и т. д.).

ВЫВОДЫ

1. Использование в тригенерации схемы с производством жидкой и газообразной углекислоты увеличивает затраты эксергии на привод компрессора, но при этом появляется дополнительный продукт генерации – углекислота. Таким образом, данные схемы (с производством углекислоты) могут быть целесообразны для потребителей, нуждающихся в углекислоте (целлюлозно-бумажные комбинаты, фармацевтические предприятия, предприятия пищевой и химической промышленности и др.).

2. Охлаждение конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой позволяет предотвратить выброс последней в окружающую среду и отказаться от внешнего источника охлаждения (системы оборотного водоснабжения), однако это приводит к снижению эксергетической эффективности тригенерационной установки в целом.

3. Промежуточный перегрев рабочего тела в органическом цикле Ренкина имеет смысл применять вне зависимости от схемы тригенерации. Полученные результаты свидетельствуют не только о термодинамической эффективности схем с промежуточным перегревом, но и об их экономической целесообразности (чистая прибыль увеличивается на 7,2 %).

ЛИТЕРАТУРА

1. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 36–43. <https://doi.org/10.1134/S0040363616060047>.
2. Генерация холода с применением детандер-генераторных агрегатов / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 37–44. <https://doi.org/10.1134/S0040363616050039>.
3. Кокорин, О. Я. Преимущества автономных станций для совместной выработки электроэнергии, тепла и холода / О. Я. Кокорин // Холодильная техника. 2003. № 12. С. 3–6.
4. Системы кондиционирования воздуха, отопления и вентиляции с энергоснабжением от собственного источника / О. Я. Кокорин [и др.] // Холодильная техника. 2001. № 8. С. 11–12.
5. Кокорин, О. Я. Энергетические и экономические преимущества объединения автономных источников теплоснабжения зданий с источниками холодоснабжения систем кондиционирования воздуха / О. Я. Кокорин // Холодильная техника. 2003. № 1. С. 6–9.
6. Роль искусственного охлаждения в мировой экономике / Д. Коломб [и др.] // Холодильная техника. 2016. № 1. С. 4–11.
7. Кудрин, Б. И. Новые тенденции в тригенерационных технологиях [Электронный ресурс] / Б. И. Кудрин, В. С. Кожиченков // Энергосовет. 2011. № 4. Режим доступа: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=200.
8. Овсянник, А. В. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2019. № 2. С. 41–51.
9. 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.
10. Овсянник, А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. А. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>.
11. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>.
12. Садыков, Р. А. Применение турбодетандера в паросиловых установках для утилизации тепловой энергии в системах теплоснабжения / Р. А. Садыков [и др.] // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 56–62. <https://doi.org/10.1134/s0040363616030115>.
13. Optimal Performance Characteristics of Subcritical Simple Irreversible Organic Rankine Cycle / W. Chen [et al.] // Journal of Thermal Science. 2018. Vol. 27, No 6. P. 555–562. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1049-5>.
14. Trigeneration Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Unit of Turbo Detander and Recovery Boiler / A. V. Ovsyannik [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. No 042010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042010>.

15. Ovsyannik, A. V. Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander / A. V. Ovsyannik, V. P. Kliuchinski // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1683. No 042005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042005>.
16. Овсянник, А. В. Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 65–77. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-65-77>.
17. Гафуров, А. М. Перспективные области применения энергетических установок на низкокипящих рабочих телах / А. М. Гафуров // *Вестник Казан. гос. энергет. ун-та*. 2015. № 1. С. 93–98.
18. 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. Т. 23, № 1. С. 61–68.
19. Белов, Г. В. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике / Г. В. Белов, М. А. Дорохова // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014. № 2. С. 99–124.
20. 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.
21. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 295 с.
22. Сажин, Б. С. Эксергетический анализ работы промышленных установок / Б. С. Сажин, А. П. Булеков, В. Б. Сажин. М.: Моск. гос. текстильн. ун-т им. А. Н. Косыгина, 2000. 297 с.
23. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.
24. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 280 с.
25. Organic Rankine Cycle Systems: A Techno-Economic Overview / V. Broek [et al.] // *European Metallurgical Conference*. Weimar, 2013. P. 833–844.
26. Самоявчев, И. С. Оценка экономических показателей проекта применения ОЦР-установок в окрасочных цехах автомобильного производства Горьковского автомобильного завода / И. С. Самоявчев // *Интеллектуальная электротехника*. 2018. № 4. С. 35–42.

Поступила 04.04.2021 Подписана в печать 12.07.2021 Опубликована онлайн 31.05.2022

REFERENCES

1. Klimenko A. V., Agababov V. S., Il'ina I. P., Rozhnatovskii V. D., Burmakina A. V. (2016) Schemes of Trigeneration Units for Centralized Power Supply. *Thermal Engineering*, 63 (6), 414–421. <https://doi.org/10.1134/s0040601516060045>.
2. Klimenko A. V., Agababov V., Koryagin A., Baidakova Yu. (2016) Refrigeration Using Expander-Generator Units. *Thermal Engineering*, 63 (5), 342–348. <https://doi.org/10.1134/s0040601516050037>.
3. Kokorin O. Ya. (2003) Advantages of Autonomous Stations for Joint Generation of Electricity, Heat and Cold. *Kholodil'naya Tekhnika = Refrigeration Technology*, (12), 3–6 (in Russian).
4. Kokorin O. Ya., Komissarov V. V., Kronfeld Ya. G., Bazumatov S. V. (2001) Air Conditioning, Heating and Ventilation Systems with Energy Supply from its Own Source. *Kholodil'naya Tekhnika = Refrigeration Technology*, (8), 11–12 (in Russian).
5. Kokorin O. Ya., Levin I. E. (2003) Energy and Economic Advantages of Combining Autonomous Heat Sources of for Buildings with Sources of Cooling for Air Conditioning Systems. *Kholodil'naya Tekhnika = Refrigeration Technology*, (1), 6–9 (in Russian).
6. Kolomb D. (2016) The Role of Artificial Cooling in the Global Economy. *Kholodil'naya Tekhnika = Refrigeration Technology*, (1), 4–11 (in Russian).
7. Kudrin B. I., Kozhichenkov B. I. (2011) New Trends in Trigeneration Technologies. *Energosovet*, (4). Available at: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=200 (in Russian).
8. Ovsyannik A. V., Valchenko N. A., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I. (2019) Trigeneration of Energy in Carbon Dioxide Turbo-Expander Units. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel], (2), 41–51 (in Russian).

9. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Development of a Computer Program for Optimizing the Parameters of a Low-Boiling Working Fluid in a Turbo-Expander Unit. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel], (3–4), 108–115 (in Russian).
10. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Thermodynamic Analysis of Ozone-Safe Low Boiling Working Media for Turbo-Expander Units. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562> (in Russian).
11. Ovsyannik A. V. (2019) Carbon Dioxide Turbine Expander Unit 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).
12. Sadykov R. A., Daminov A. Z., Solomin I. N., Futin V. A. (2016) Use of a Turboexpander in Steam Power Units for Heat Energy Recovery in Heat Supply Systems. *Thermal Engineering*, 63 (5), 360–366. <https://doi.org/10.1134/S0040601516030113>.
13. Chen W. J., Feng H. J., Chen L. G., Xia S. J. (2018) Optimal Performance Characteristics of Subcritical Simple Irreversible Organic Rankine Cycle. *Journal of Thermal Science*, 27 (6), 555–562. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1049-5>.
14. Ovsyannik A. V., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I., Kliuchinski V. P. (2020) Trigeneration Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Unit of Turbo Detainer and Recovery Boiler. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683, 042010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042010>.
15. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683, 042005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042005>.
16. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2021) Turbo-Expander Units on Low Boiling Working Fluids. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 65–77. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-65-77> (in Russian).
17. Gafurov A. M. (2015) Promising Areas of Application of Power Units on Low-Boiling Working Bodies. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta = Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*, (1), 93–98 (in Russian).
18. Tarasov S. A., Fomin V. A. (2017) Gas-Turbine Unit 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).
19. Belov G. V., Dorokhova M. A. (2014) Renkin's Organic Cycle and its Application in Alternative Power Engineering. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N. E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, (2), 99–124 (in Russian).
20. Brodyanskii V. M., Fratsher V., Mikhalek K.; Ed. by V. M. Brodyanskii (1988) *Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
21. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energiya Publ. 295 (in Russian).
22. Sazhin B. S., Bulekov A. P., Sazhin V. B. (2000) *Exergetic Analysis of the Work of Industrial Units*. Moscow, A. N. Kosygin Moscow State Textile University. 297 (in Russian).
23. Grigorieva V. A., Zorina V. M. (1988) *Theoretical Foundations of Heat Engineering. Thermal Engineering Experiment*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 560 (in Russian).
24. Szargut Y., Petela R. (1968) *Exergy*. Moscow, Energiya Publ. 280 (in Russian).
25. Broek V., Quoilin S., Declaye S., Lemort V. (2013) Organic Rankine Cycle Systems: A Techno-Economic Overview. *Proceedings of European Metallurgical Conference*, Weimar, 833–844.
26. Samoyavchev I. S. (2018) Estimation of Economic Indicators of the Project of Application of CRO-Units in the Paint Units of Gorky Automobile Unit. *Intellektual'naya Elektrotehnika = Smart Electrical Engineering*, (4), 35–42 (in Russian).