

ТРИГЕНЕРАЦИОННАЯ И ПОЛИГЕНЕРАЦИОННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Овсянник Анатолий Васильевич

доктор технических наук, профессор

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

Ключинский Владислав Петрович

аспирант

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

Аннотация. В работе предложены схемы тригенерационного и полигенерационного способов утилизации вторичных энергетических ресурсов на базе турбин на органическом цикле Ренкина с промежуточным перегревом и сверхкритическими параметрами рабочего тела. Разработанная схемы полигенерации позволяет вырабатывать не только электричество, теплоту и холод, но и дополнительно производить углекислоту в жидком и газообразном состоянии, которая в свою очередь изымается из продуктов сгорания топлива (вторичных энергетических ресурсов). Полученная углекислота может быть использована для широкого спектра промышленных предприятий и в качестве одного из компонентов авиационного топлива, на предприятиях химической, целлюлозно-бумажной, горнодобывающей, фармацевтической и др. промышленности. А также может выступать в качестве рабочего тела в органическом цикле Ренкина. В качестве рабочих тел схем тригенерации и полигенерации рассматривались озонобезопасный хладагент R410A и диоксид углерода соответственно. Полезное использование, полученной из продуктов сгорания, углекислоты позволяет снизить выбросы диоксида углерода в атмосферу. Для сравнения предложена когенерационная схема с классическим циклом Ренкина на водяном паре. При помощи разработанной запатентованной программы по моделированию полигенерационных установок произведен эксергетический анализ когенерационного (на основе классического цикла Ренкина), тригенерационного и полигенерационного способов утилизации вторичных энергетических ресурсов. При этом температура рабочего тела перед турбиной составила 250 °С. Получены экономические показатели исследуемых вариантов схем. Произведен их

технико-экономический анализ. Наилучшими технико-экономическими показателями обладает полигенерационная установка на диоксиде углерода с динамическим сроком окупаемости 3,2 года при ставке дисконтирования 10%. Следующей по эффективности является тригенерационная установка на R410A с динамическим сроком окупаемости 4,5 года. Наименьшей эффективностью обладает когенерационная паросиловая установка на водяном паре с динамическим сроком окупаемости 7,1 года.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, полигенерация, утилизация вторичных энергетических ресурсов, озонобезопасные рабочие тела, производство диоксида углерода, технико-экономические показатели.

Введение

Все более широкое применение в малой энергетике находят схемы на органическом цикле Ренкина (ОЦР) (рисунок 1), в котором в качестве рабочих тел, как правило, используются органические вещества, с более низкой, чем у воды, температурой кипения. Наиболее перспективными областями применения ОЦР установок служат: солнечная и геотермальная энергетика, утилизация тепловых отходов, продуктов сгорания газотурбинных установок, утилизация вторичных энергетических ресурсов, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях, а также сжигание топлива с низкой теплотворной способностью (щепа, биогаз, мусор и т. д.) [1-5].

Применение ОЦР обусловлено следующими его достоинствами: относительно низкие допустимые температуры низкокипящего рабочего тела перед турбиной, простота конструкции ОЦР установок, низкая стоимость, высокая надежность, простота автоматизации, невысокая скорость вращения турбины и т. д.

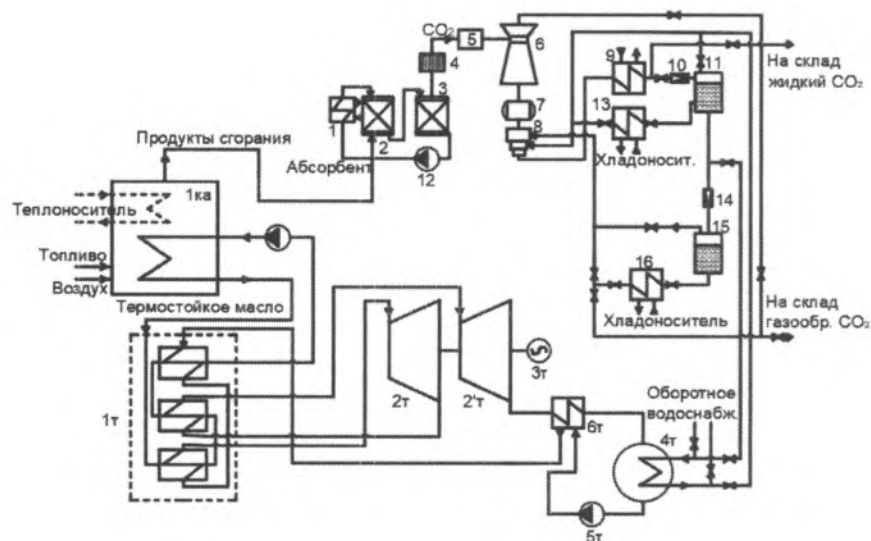
Однако помимо электрической и тепловой энергии большое количество предприятий нуждается в холоде и углекислоте. К ним относятся предприятия фармацевтической, горнодобывающей, химической, целлюлозно-бумажной и др. промышленности. Также углекислота может использоваться как рабочее тело для ОЦР.

Схема и описание

Для утилизации вторичных энергетических ресурсов предприятий, которые нуждаются в электрической энергии, теплоте, холоде и углекислоте, разработана схема полигенерационной установки (рисунок 1), которая объединяет в себе ОЦР установку и установки по производству углекислоты и холода.

Вторичные энергетические ресурсы (с температуро 400 – 500 °С) поступают в котлоагрегат 1ка, где отдают тепло низкокипящему рабочему телу

ОЦР установки и теплоносителю для системы отопления и горячего водоснабжения. Рабочее тело в котле 1ка, превратившись в пар, а при необходимости пройдя процесс перегрева, поступает в турбину 2т, где совершает работу по вращению вала турбины и генератора 3т. Для схемы с двукратным перегревом, пройдя часть высокого давления турбины, рабочее тело 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, направляется в котел 1ка. Продукты сгорания поступают в очистительную установку 2ка, где очищаются от механических примесей и сернистых соединений и подаются в абсорбер 2, а затем в десорбер 3, где из продуктов сгорания отделяется чистая углекислота. Выделенная углекислота 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 поток жидкой углекислоты поступает 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.



1ка – котлоагрегат (КА); 1т – теплообменный аппарат; 2т и 2'т – часть высокого и низкого давления турбины; 3т – генератор; 4т – конденсатор; 5т – насос; 6т – теплообменный аппарат; 1 – теплообменный аппарат

моноэтаноламина; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 и 5 – соответственно отделитель брызг диоксида углерода и его осушитель; 6 – инжектор; 7 – бак сбора углекислоты; 8 – углекислотный компрессор; 9 – конденсатор холодильной установки; 10, 14 – дросселирующее устройство; 11, 15 – отделитель паров НКРТ; 12 – насос моноэтаноламина; 13, 16 – испарители

Рисунок 1. Схема полигенерационной установки с котлоагрегатом ОЦР с промежуточным перегревом и установкой по производству углекислоты и холода [6]

Термодинамический и технико-экономический анализа

Для проведения термодинамического анализа когенерационных, тригенерационных и полигенерационных турбоустановок разработана программа (рисунок 2) [7, 8]. Программа позволяет рассчитывать все варианты схем и определять термодинамически оптимальные параметры рабочего тела для ОЦР.

Методика расчета экономических показателей представлена в [9]. Наиболее сложным этапом является определение стоимости ОЦР с изменяющимися параметрами рабочего тела на входе в турбину (формула 1).

$$S_y^{ORC*} = S_y^{ORC} \cdot k^v + S_y^{ORC} \cdot (1 - k^v) \times (1 + (t^{ORC} - t_0^{ORC}) \cdot k^t + (p^{ORC} - p_0^{ORC}) \cdot k^p + k^{pp}), \quad (1)$$

где k^v – коэффициент, учитывающий стоимость вспомогательного оборудования (оборудование, стоимость которого не зависит от повышения параметров рабочего тела и использования промежуточного перегрева); t^{ORC} – температура рабочего тела в ОЦР на сверхкритических параметрах; t_0^{ORC} – температура рабочего тела в классическом ОЦР; k^t – коэффициент влияния температуры на стоимость ОЦР, принимаем $k^t = 0,0005$ ед/К; p^{ORC} – давление рабочего тела в ОЦР на сверхкритических параметрах; p_0^{ORC} – давление рабочего тела в классическом ОЦР; k^p – коэффициент влияния промежуточного перегрева на стоимость ОЦР, принимаем $k^p = 1,5 \cdot 10^{-5}$ ед./кПа [8]; k^{pp} – коэффициент влияния давления на стоимость ОЦР, принимаем $k^{pp} = 0,06$ ед..

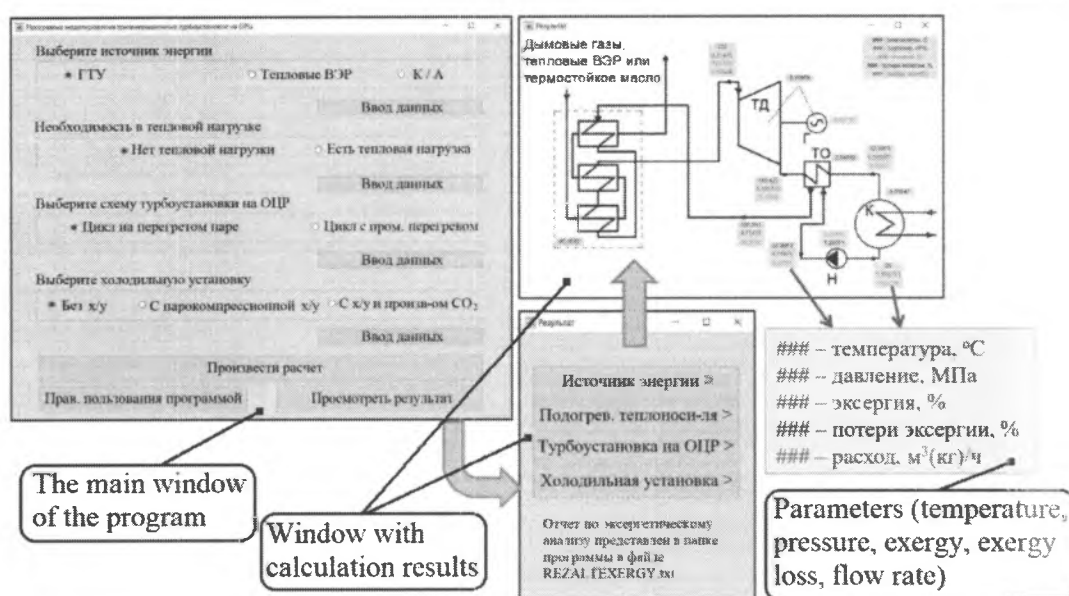


Рисунок 2. Интерфейс программы

Сравнительный анализ проводился для следующих вариантов схем:

- когенерационная паросиловая установка на водяном паре (производит электрическую и тепловую энергию);
- тригенерационная установка на ОЦР, состоящая из ОЦР установки с промежуточным перегревом и сверхкритическими параметрами рабочего тела и парокомпрессионной холодильной установкой, рабочим телом которых служит R410A (производит электрическую, тепловую энергию и холод);
- полигенерационная установка на ОЦР с промежуточным перегревом и сверхкритическими параметрами рабочего тела (рисунок 1), рабочим телом которой служит диоксид углерода (производит электрическую, тепловую энергию, холод и углекислоту).

Исходные данные проводимых исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1
Исходные данные

Параметр	Значение
Температура окружающей, °C	15
Атмосферное давление, кПа	101,3
Расход топлива (древесной щепы), кг/ч	3410
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	10500
Необходимое количество тепловой энергии, МВт	1
Температурный график теплоносителя (технологические нужды), °C	150/70

Необходимое количество холода высшего температурного уровня, МВт	0,2
Необходимое количество холода низшего температурного уровня, МВт	0,3
Температура холода высшего температурного уровня, °С	+4
Температура холода низшего температурного уровня, °С	-18
Необходимое количество жидкой углекислоты, кг/ч	190
Необходимое количество газообразной углекислоты, кг/ч	380
Рабочие тела:	Вода, R410A, Углекислота
Параметры рабочего тела перед турбиной для паросиловой установки на водяном паре (элемент когенерационной установки)	$T_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_1 = 1,68 \text{ МПа}$
Параметры рабочего тела перед частью высокого и низкого давления турбины для ОЦР установки на R410A (элемент тригенерационной установки)	$T_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_1 = 18,7 \text{ МПа}$ $T_2 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_2 = 6,6 \text{ МПа}$
Параметры рабочего тела перед частью высокого и низкого давления турбины для ОЦР установки на диоксиде углерода (элемент полигенерационной установки)	$T_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_1 = 26,4 \text{ МПа}$ $T_2 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_2 = 13,7 \text{ МПа}$

Полученные результаты и их анализ

Полученные результаты представлены в таблице 2. Из таблицы 2 следует, что все варианты схем утилизации вторичных энергетических ресурсов обладают приемлемыми технико-экономическими показателями и могут быть использованы на предприятиях. Наименьшей эффективностью обладает когенерационная паросиловая установка на водяном паре с динамическим сроком окупаемости 7,1 года при ставке дисконтирования 10 %. Одновременное производство электрической, тепловой энергии и холода в тригенерационной установке на ОЦР с промежуточным перегревом и сверхкритическими параметрами рабочего тела позволяет увеличить количество производимой в установке электрической энергии и положительно сказывается на сроке окупаемости установки (динамический срок окупаемости снижается с 7,1 года до 4,5 года). Наилучшими показателями обладает полигенерационная установка на диоксиде углерода. Несмотря на снижение количества отпускаемой электрической энергии такая компоновка схемы позволяет производить углекислоту в жидком и газообразном состоянии в объеме 4,2 тысяч тон в год, что положительно сказывается на экологической безопасности предприятия и улучшает его экономические показатели, а динамическим сроком окупаемости установки снижается с 4,5 года (для тригенерации) до 3,2 года.

Таблица 2
Результаты

Показатель	Способ утилизации вторичных энергетических ресурсов		
	Когенерация	Тригенерация	Полигенерация
Отпуск электрической энергии, $\times 10^3$ МВт·ч/год	11,3	13,7	11,8
Отпуск тепловой энергии, $\times 10^3$ МВт·ч/год	7,4	7,4	7,4
Отпуск холод (+4 °С), $\times 10^3$ МВт·ч/год	-	1,5	1,5
Отпуск холод (-18 °С), $\times 10^3$ МВт·ч/год	-	2,2	2,2
Отпуск жидкой CO ₂ , $\times 10^3$ т/год	-	-	1,4
Отпуск газообр. CO ₂ , $\times 10^3$ т/год	-	-	2,8
Экономический эффект, $\times 10^6$ \$/год	1,3	1,6	2,2
Стоимость установки, $\times 10^6$ \$	2,3	2,5	3,3
Расходы на эксплуатацию, $\times 10^6$ \$/год	0,2	0,2	0,3
Статический срок окупаемости, лет	4,9	3,5	2,6
Внутренняя норма доходности, %	19,7	28,5	37,9
Динамический срок окупаемости, лет	7,1	4,5	3,2
Чистый дисконтированный доход, $\times 10^6$ \$	1,6	3,7	7,3

Заключение

Разработанная схема полигенерации является наилучшим из предлагаемых вариантов утилизации вторичных энергетических ресурсов, которая не только обладает хорошими экономическими показателями эффективности (статический срок окупаемости – 2,6 года; динамический срок окупаемости – 3,2 года; чистый дисконтированный доход – 7,3 миллиона долларов США; внутренняя норма доходности – 37,9 %), но и позволяет полезно использовать выбрасываемый в атмосферу диоксид углерода, тем самым снижая углеродный след предприятия.

Литература

1. Ho, T. Comparison of the Organic Flash Cycle (OFC) to other advanced vapor cycles for intermediate and high temperature waste heat reclamation and solar thermal energy / T. Ho, S. S. Mao, R. Greif // *Energy*. 2012. Vol. 42. P. 213-223.
2. Ho, T. Increased power production through enhancements to the Organic Flash Cycle (OFC) / T. Ho, S. S. Mao, R. Greif // *Energy*. 2012. Vol. 45. P. 686-695.

3. Velez, F. *Technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation / F. Velez [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, No. 6. P. 4175-4189.*
4. Ovsyannik, A. V. *Trigeneration units on carbon dioxide with two-time overheating with installation of turbo detainer and recovery boiler / A. V. Ovsyannik, P. A. Kovalchuk, A. I. Arshukov, V. P. Kliuchinski // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. № 042010.*
5. Quoilin S., Van Den Broekb M., Declayea S., Dewallefa P., Lemorta V. *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, vol. 22, pp.168-186.*
6. Овсянник А. В. *Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел./ А.В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 3 (65). – С. 263–275.*
7. 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.*
8. Ключинский, В. П. *Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / В. П. Ключинский ; науч. рук. А. В. Овсянник // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 130–132.*
9. Ключинский, В. П. *Термодинамический и технико-экономический анализ тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2022. – № 1. – С. 80–89.*