

УДК 658.261:621.56

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПОЛИГЕНЕРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА

**А. В. Овсянник, В. П. Ключинский**

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,  
г. Гомель, Беларусь*

*Разработана схема для совместного производства электрической энергии, теплоты, холода, жидкой и газообразной углекислоты (полигенерация). Отличительной особенностью предложенной схемы является отсутствие системы оборотного охлаждения. Также данная схема может быть использована для снижения углеродного следа предприятий. Источником энергии могут выступать продукты сгорания газотурбинных установок, продукты сгорания производственных печей, топлива с низкой теплотворной способностью и другие вторичные энергетические ресурсы. В работе представлены основные характеристики предложенной полигенерационной установки, а также определены ее технико-экономические показатели. В качестве источника энергии выступала ГТУ мощностью 82 МВт. Динамический срок окупаемости полигенерационной установки составил 4,9 года при ставке дисконтирования 20%.*

**Ключевые слова:** полигенерации, снижение выбросов, повышение эффективности, производство диоксида углерода, технико-экономические показатели, углеродный след, ОЦР.

Важнейшей задачей энергосбережения является эффективное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Одним из способов повышения эффективности производства различных видов продукции может выступать полигенерация. Продуктами производства предлагаемой полигенерационной установки (рисунок) выступают электрическая энергия, теплота, холод и углекислота в жидком и газообразном агрегатных состояниях. Отличительной особенностью данной схемы полигенерации от схем, представленных в работах [1–4], является отсутствие системы оборотного охлаждения. Предложенная схема также может быть использована для снижения углеродного следа предприятия путем изъятия диоксида углерода из продуктов сгорания. Часть производимой углекислоты может быть использована для подпитки ОЦР цикла установки. В качестве источника энергии могут выступать продукты сгорания газотурбинных установок, продукты сгорания производственных печей, топлива с низкой теплотворной способностью и другие вторичные энергетические ресурсы. В рассматриваемом варианте установки в качестве источника энергии выступала ГТУ мощностью 82 МВт.

Схема (см. рисунок) состоит из следующих элементов: 1 – теплообменный аппарат; 2 – котел-утилизатор; 3 и 4 – соответственно цилиндр высокого и низкого давления турбины; 5 – турбогенератор; 6 – теплообменный аппарат – конденсатор; 7 – насос подпитки цикла; 8 – насос питательный; 9 – газоочистительная установка; 10 – теплообменный аппарат; 11 – абсорбер (происходит поглощение диоксида углерода моноэтаноламино); 12 – насос подачи моноэтаноламина; 13 – десорбер (происходит выделение диоксид углерода из моноэтаноламина); 14 и 15 – соответственно отделитель брызг диоксида углерода и его осушитель; 16 – инжектор; 17 – сборный бак; 18 – углекислотный компрессор; 19 – конденсатор; 20 – дросселирующее устройство (первая ступень); 21 и 24 – отделитель паров диоксида углерода; 22 и 25 – испарители двух температурных уровней; 23 – дросселирующее устройство (вторая ступень).

Расчет полигенерационной установки производился в специализированной программе [5], основные характеристики предлагаемой полигенерационной установки представлены в табл. 1. Техничко-экономические показатели полигенерации определялись при помощи методики, разработанной [4, 6, 7], и представлены в табл. 2.



Таблица 2

## Технико-экономические показатели полигенерации

Показатель	Значение
Отпуск электрической энергии, МВт·ч/год	136 709
Отпуск тепловой энергии на ГВС, МВт·ч/год	647 802
Отпуск холод (+4) МВт·ч/год	1489
Отпуск холод (-18) МВт·ч/год	2234
Отпуск жидкой CO <sub>2</sub> , т/год	1415
Отпуск газообр. CO <sub>2</sub> , т/год	2830
Экономический эффект, тыс. рос. руб/год	1 413 600
Эксплуатационные расходы, тыс. рос. руб/год	184 160
Ориентировочная $\Sigma$ стоимость установки (без ГТУ), тыс. рос. руб	3 157 467
Простой (статический) срок окупаемости, лет	2,9
Внутренняя норма доходности, %	34,3
Динамический срок окупаемости*, лет	4,9
Чистый дисконтированный доход*, тыс. рос. руб	2 131 387

\* При ставке дисконтирования 20%

Таким образом, предложенная полигенерационная установка (см. рисунок), утилизирующая выхлопные газы ГТУ мощностью 82 МВт, позволяет произвести 136 709 МВт·ч/год электрической энергии 647 802 МВт·ч/год тепловой энергии для нужд горячего водоснабжения, 3723 МВт·ч/год холода различных температурных уровней, изъять для полезного использования 4245 т диоксида углерода в год. Совместное производство различных видов продукции позволяет снизить стоимость установки и эксплуатационные расходы, а динамический срок окупаемости составляет 4,9 года.

### Литература

1. Ovsyannik A. V. et al. Trigeneration units on carbon dioxide with two-time overheating with installation of turbo detainer and recovery boiler // J. of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. № 042010.
2. Овсянник А. В., Ключинский В. П. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. № 3 (65). С. 263–275.
3. Овсянник А. В., Ключинский В. П. Тригенерационная и полигенерационная утилизация вторичных энергетических ресурсов // Высшая школа: научные исследования: сб. науч. ст. в 2 ч. Ч. 2. М.: Издательство Инфинити, 2023. С. 108–115.
4. Ключинский В. П., Овсянник А. В. Термодинамический и технико-экономический анализ тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. 2022. № 1. С. 80–89.
5. Овсянник А. В., Ключинский В. П. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. 2020. № 3/4. С. 108–115.
6. Овсянник А. В., Ключинский В. П. Технико-экономический анализ полигенерационных турбоустановок на основе диоксида углерода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. № 4 (66). С. 387–400.
7. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. Calculation of technical and economic indicators of turbine units at ORC with low-boiling working fluids at supercritical parameters // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. Beijing: Scientific publishing house Infinity, 2023. С. 149–156.