Литература

1. Морозова, О. Ю. Резервное топливоснабжение котельных РУП «Гомельэнерго», работающих в пиковом режиме / О. Ю. Морозова ; науч. рук. А. В. Шаповалов, Н. З. Заглубоцкий // 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. 142–145.
2. Соловей, Е. В. Печное бытовое топливо – новый вид резервного топлива в энергосистеме Республики Беларусь / Е. В. Соловей, И. О. Шамело ; науч. рук. О. Ю. Морозова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г. В 2 ч. Ч. 1 / 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, 2022. – С. 220–223.
3. Ковальчук, А. А. Влияние вторичной перегонки на свойства печного бытового топлива и его смеси сэтанолом / А. А. Ковальчук, Е. Н. Макеева // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2023 г. В 2 ч. Ч. 1 / 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, 2023. – С. 255–258.

ТРИГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ В ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА И ИХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

В. В. Сиваков, И. К. Журавлев

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Рассмотрены термодинамические основы тригенерационных установок на диоксиде углерода (CO_2) как едином рабочем теле. Представлена схема утилизации вторичных энергоресурсов для совместной выработки электроэнергии, тепла и холода, а также получения товарной углекислоты. Описана парогазовая установка с котлом-утилизатором и двойным промежуточным перегревом, объединяющая цикл Брайтона и цикл Ренкина на CO_2. Показано, что использование CO_2 позволяет повысить экологичность системы, снизить затраты и улучшить эффективность за счет глубокой утилизации тепла отходящих газов. Двойной перегрев увеличивает работу расширения и предотвращает попадание влажной фазы в проточную часть турбины. Научная новизна заключается в разработке сопряженных прямого и обратного циклов на одном хладагенте. Практическая значимость подтверждается возможностью производства холода на двух температурных уровнях, тепла, электричества и жидкого CO_2.

Ключевые слова: тригенерация, диоксид углерода (CO_2), вторичные энергоресурсы, парогазовая установка, двойной промежуточный перегрев, утилизация тепла.

Термодинамические основы тригенерации на CO_2

CO_2-тригенерация: электричество, тепло и холод в одной установке через прямые и обратные циклы с единым хладагентом.

Установка на вторичных энергоресурсах (ВЭР)

Установка утилизирует тепло отходящих газов для тригенерации (электричество, тепло, холод) и выдачи товарного CO_2. Особенность – единое рабочее тело (CO_2) во всех контурах.

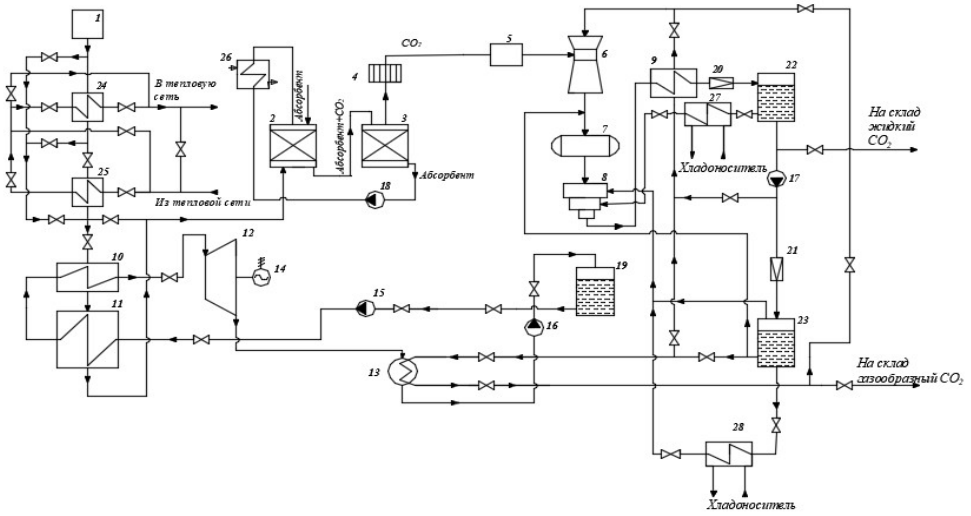


Рис. 1. Схема тригенерационной турбодетандерной установки на вторичных энергоресурсах с производством жидкой и газообразной углекислоты:
1 – источник продуктов сгорания (ВЭР); *2* – абсорбер; *3* – десорбер;
4 – брызгоотделитель; *5* – осушитель; *6* – инжектор; *7* – ресивер;
8 – компрессор; *9* – конденсатор; *10* – перегреватель; *11* – испаритель;
12 – паровая турбина; *13* – конденсатор; *14* – электрогенератор; *15–18* – насос;
19 – сборник; *20*, *21* – регулирующий вентиль; *22* – сепаратор 1;
23 – сепаратор 2; *24–26* – теплообменник; *27*, *28* – испаритель

Источник тепла и система улавливания CO_2

Установка: дымовые газы охлаждаются в теплообменниках (24, 25), нагревая сетевую воду. Охлажденные газы идут в абсорбер (2) – абсорбент связывает CO_2, чистый газ выбрасывается. Насыщенный абсорбент – в десорбер (3), где с подводом тепла выделяется чистый CO_2, а регенерированный абсорбент возвращается в цикл.

Подготовка и компримирование углекислоты

CO_2 из десорбера очищается в брызгоотделителе (4) и осушителе (5), затем через инжектор (6) поступает в ресивер (7). Трехступенчатый компрессор (8) с промежуточным охлаждением сжимает его до 70–100+ бар.

Холодильный цикл и получение низких температур

Конденсатор (9) охлаждает и конденсирует CO_2. Двухступенчатое дросселирование с сепарацией:

1. Дроссель (20) → давление P_{01} → сепаратор (22): пар на среднюю ступень компрессора (8), жидкость на дроссель (21).

2. Дроссель (21) → давление P_0 → сепаратор (23): пар на вход 1-й ступени компрессора (8), жидкость (T_0) в конденсатор-испаритель (13) турбодетандерного контура. Газ из (13) возвращается в инжектор (6).

Для тригенерации — испарители (27, 28) на двух температурных уровнях.

Турбодетандерный контур (генерация электроэнергии)

Насос (16) подает жидкий CO□ из ресивера (19) в испаритель (11) и перегреватель (10) – тепло ВЭР испаряет и перегревает рабочее тело. Пар расширяется в турбине (12) с генератором (14). Отработавший пар конденсируется в конденсаторе (13), отдавая тепло холодильному контуру, конденсат возвращается в ресивер (19).

Анализ термодинамического цикла

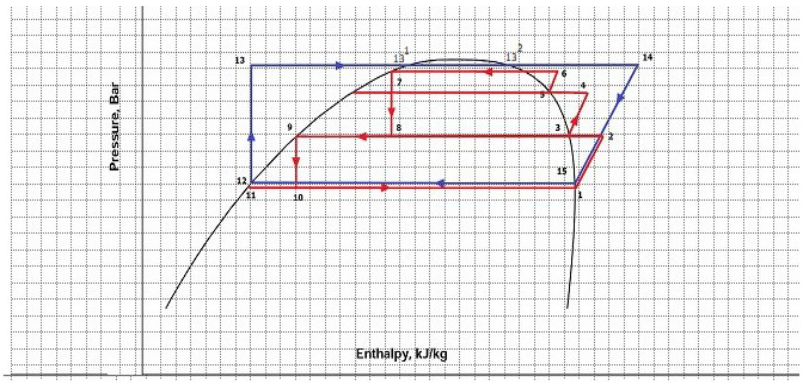


Рис. 2. Цикл турбодетандерной тригенерационной установки на диоксиде углерода

Сопряжение двух циклов на CO_2:

1. Прямой цикл (турбодетандерный): насос (12–13) → нагрев от ВЭР (13–14) → → турбина (14–15) → конденсация (15–12) с отводом тепла в обратный цикл.

2. **Обратный цикл (холодильный):** трехступенчатое сжатие (1–2,3–4,5–6) → → конденсация (6–7) → двухступенчатое дросселирование с сепарацией (7–8–9–10) → → кипение (10–1) в конденсаторе-испарителе.

Взаимодействие: теплота конденсации прямого цикла (15–12) отдается кипящему CO_2 обратного цикла (10–1).

Парогазовая установка (ПГУ) с двойным перегревом

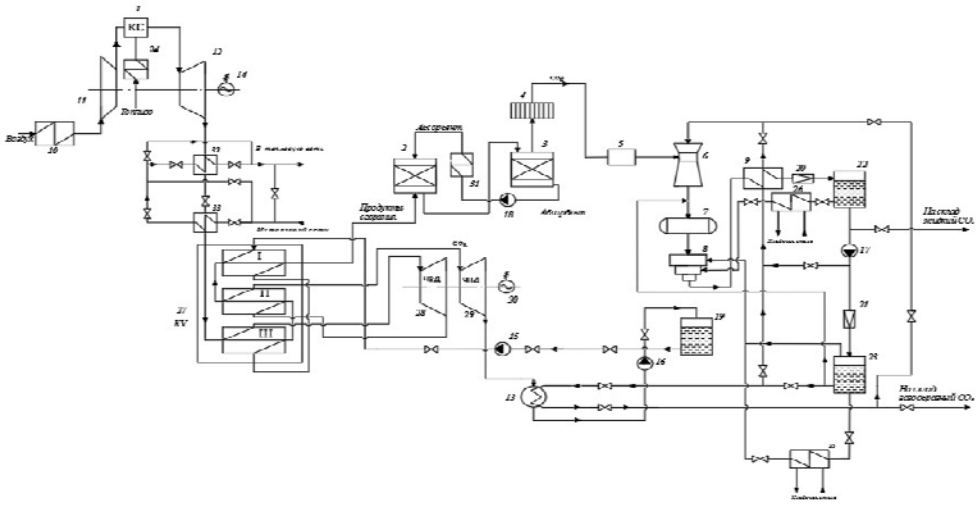


Рис. 3. Схема тригенерационной парогазовой турбодетандерной установки с котлом утилизатором:
1 – камера сгорания; *2* – абсорбер; *3* – десорбер; *4* – брызгоотделитель; *5* – осушитель; *6* – инжектор; *7* – ресивер; *8* – компрессор; *9* – конденсатор; *10* – воздухоподогреватель; *11* – турбокомпрессор; *12* – газовая турбина; *13* – конденсатор-испаритель; *14*, *30* – электрогенератор; 15–18 – насос; *19* – сборник; *20*, *21* – регулирующий вентиль; *22* – сепаратор 1; *23* – сепаратор 2; *24*, *31–33* – теплообменник; *25*, *26* – испаритель; *27* – котел утилизатор; *28*, *29* – ЧВД и ЧНД турбины соответственно

Гибрид: цикл Брайтона (ГТУ) + цикл Ренкина на CO_2 с двойным перегревом. Утилизация тепла выхлопных газов ГТУ в котле-утилизаторе повышает теплоперепад и мощность.

Газотурбинная надстройка (высокотемпературный контур)

Воздух подогревается в (10), сжимается в (11) → камера сгорания (1) с топливом. Продукты сгорания расширяются в газовой турбине (12), приводя компрессор и генератор (14). Отработавшие газы (450–600 °C) идут в котел-утилизатор.

Термодинамический анализ цикла с двойным перегревом

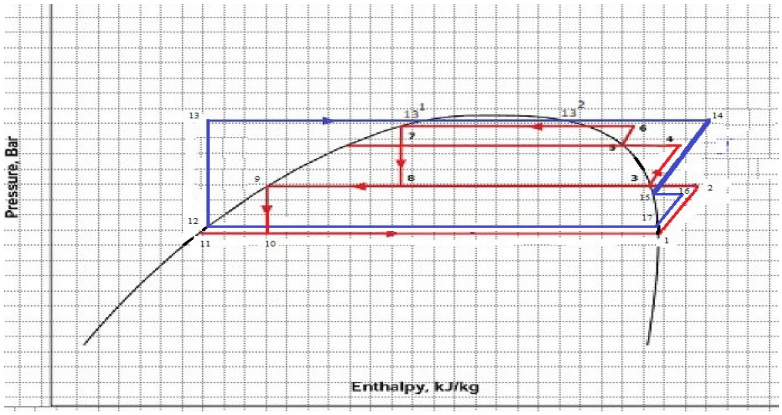


Рис. 4. Цикл турбодетандерной тригенерационной установки на диоксиде углерода с двойным перегревом

Двойной перегрев в цикле Ренкина на CO_2: насос (12–13) → испарение ($13–13^1–13^2$) → первый перегрев ($13^2–14$) → ЧВД (14–15) → второй перегрев (15–16) → → ЧНД (16–17) → конденсация (17–12). Без второго перегрева — расширение 14–15' (меньше работа, риск влажности). Промежуточный перегрев смещает конечную точку (17) в область перегретого/сухого насыщенного пара, повышая работу и безопасность.

Научная новизна: схемы тригенерации на CO_2 как едином рабочем теле, включая варианты с двойным перегревом в парогазовых циклах. Практическая значимость: утилизация сбросного тепла, улавливание CO_2 из дымовых газов, тригенерация (электричество, тепло, холод), получение товарной углекислоты → повышение рентабельности.

Литература

1. Преимущества CO_2 в холодильной технике / По материалам JARN // Холодильная техника. – 2016. – № 3. – С. 25.
2. Современные альтернативные хладагенты на длительную перспективу и их возможные области применения / По материалам JARN // Холодильная техника. – 2016. – № 6. – С. 4–9.
3. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М. : Энергия, 1973. – 295 с.
4. Кудинов, А. А. Двукратный промежуточный перегрев водяного пара в зоне высоких температур и в хвостовой части трехконтурного котла утилизатора /А. А. Кудинов, К. Р. Хусаинов // Промышленная энергетика. – 2018. – № 2. – С. 21–27.
5. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник, Н. А. Вальченко, П. А. Ковальчук, А. И. Аршуков // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2019. – № 2. – С. 41–51.