

9. Ягов В. В. Исследование кипения жидкостей в области низких давлений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1971.

10. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970. – 660 с.

---

УДК 658.261:621.56

## **ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА С ДВУКРАТНЫМ ПЕРЕГРЕВОМ С УСТАНОВКОЙ ТУРБОДЕТАНДЕРА И КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА**

**А. В. Овсянник, А. И. Аршуков, П. А. Ковальчук, В. П. Ключинский**

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

Рациональное использование природных ресурсов – одна из наиболее актуальных задач энергетики. Повышение термодинамической, энергетической и технико-экономической эффективности генерации энергии различных видов необходимо рассматривать как один из возможных путей решения этой задачи [1].

В настоящее время все больше и больше внимания уделяется поиску как можно более эффективных и безопасных рабочих тел для энергетических установок прямого и обратного циклов. Одними из таких рабочих тел являются природные хладагенты и, в частности, диоксид углерода. Основными преимуществами применения  $\text{CO}_2$  в холодильной технике в сравнении с ГФУ-хладагентами является их эффективность, безопасность, экологичность и низкая стоимость [2]. На основании энергетических, технических и экологических показателей использования  $\text{CO}_2$  в энергетических установках для получения электрической, тепловой энергии и холода предлагается использование диоксида углерода для получения этих видов энергии в турбодетандерном цикле. Отличительной особенностью такой установки является то, что используется только одно рабочее тело для выработки всех трех видов энергии –  $\text{CO}_2$ , а также возможность отпуска  $\text{CO}_2$  в жидком или газообразном состоянии для коммерческих целей. Схема тригенерационной установки на диоксиде углерода на вторичных энергоресурсах с производством жидкой и газообразной углекислоты представлена на рис. 1.

Принцип работы предлагаемой установки основан на использовании теплоты отходящих продуктов сгорания (металлургических, стеклоплавильных печей, котлоагрегатов и т. д.) с целью повышения энергетической эффективности теплоэнергоустановок и снижения их тепловых потерь. Кроме того, решается экологическая проблема улавливания диоксида углерода и предотвращения выброса его в окружающую среду. Предлагаемая установка работает на вторичных энергоресурсах, которые в настоящее время используются в крайне ограниченных объемах.

Установка подключается через теплофикационный узел, состоящий из двух теплообменников 24 и 25, к источнику продуктов сгорания или дымовых газов. Теплообменники 24 и 25 теплофикационного узла предназначены для подогрева сетевой воды для целей отопления и горячего водоснабжения. После теплофикационного узла дымовые газы направляются в абсорбционно-десорбционную установку, где осуществляется улавливание и выделение  $\text{CO}_2$ . Выделенная углекислота сжимается и направляется в сепараторы 22, 23 и бак-сборник 19 турбодетандерного контура. Турбодетандерный контур (турбодетандер 12 – испаритель 11 – перегреватель 10 – конденсатор 13 – насос 16 – ресивер – накопитель 19) может рабо-

тать как на цикле с докритическими параметрами, так и на цикле с закритическими параметрами. В установке дополнительным эффектом является производство холода в испарителях 27 и 28, а также производство жидкой и газообразной углекислоты для коммерческих целей.

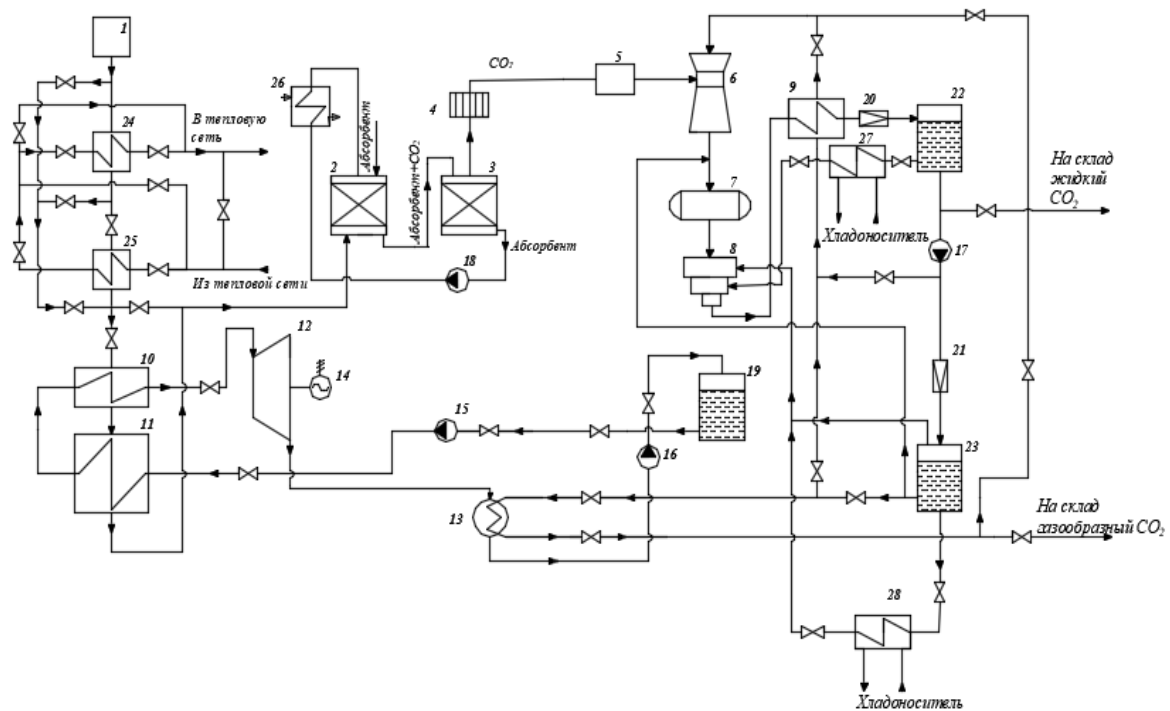


Рис. 1. Схема тригенерационной турбодетандерной установки на вторичных энергоресурсах с производством жидкой и газообразной углекислоты: 1 – источник продуктов сгорания (ВЭР); 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор; 10 – перегреватель; 11 – испаритель; 12 – паровая турбина; 13 – конденсатор; 14 – электрогенератор; 15, 16, 17, 18 – насос; 19 – сборник; 20, 21 – регулирующий вентиль; 22 – сепаратор 1; 23 – сепаратор 2; 24, 25, 26 – теплообменник; 27, 28 – испаритель

На рис. 2 представлены теоретические циклы турбодетандерного и углекислотного контуров в диаграмме  $\lg p - h$  с полным промежуточным охлаждением. Циклы состоят из следующих процессов: 12–13 – повышение давления жидкого  $\text{CO}_2$  в насосе 16; 13–13<sup>1</sup> – нагрев жидкого  $\text{CO}_2$  до температуры кипения в испарителе 11; 13<sup>1</sup>–13<sup>2</sup> – изобарно-изотермический процесс кипения  $\text{CO}_2$  в испарителе 11; 13–14 – перегрев газообразного  $\text{CO}_2$  в перегревателе 10; 14–15 – адиабатное расширение газообразного  $\text{CO}_2$  в турбодетандере 12; 15–12 – изобарно-изотермический процесс конденсации диоксида углерода в конденсаторе 13. Для холодильного цикла: процесс 1–2 – адиабатное сжатие газообразного  $\text{CO}_2$  в компрессоре первой ступени; 2–3 – охлаждение  $\text{CO}_2$  перед компрессором второй ступени; 3–4 – адиабатное сжатие  $\text{CO}_2$  в компрессоре второй ступени; 4–5 – промежуточное охлаждение  $\text{CO}_2$  перед компрессором третьей ступени; 5–6 – адиабатное сжатие  $\text{CO}_2$  в компрессоре третьей ступени; 6–7 – охлаждение и конденсация газообразного  $\text{CO}_2$  в конденсаторе 9; 7–8 – первое адиабатное дросселирование жидкого диоксида углерода в дросселе 20 в сепаратор 22; 9–10 – второе адиабатное дросселирование  $\text{CO}_2$  в дросселе 21 в сепаратор 23; 11–1 – кипение  $\text{CO}_2$  в конденсаторе-испарителе 13.

Одним из основных направлений совершенствования энергоустановок является внедрение промежуточного перегрева пара, например, применить эту технологию в парогазовой установке с котлом-утилизатором. Это позволит повысить КПД установки за счет подвода к газу дополнительного количества теплоты, в результате чего возрастает полезный теплорепад в турбоагрегате [3–5]. Это приводит к увеличению электрической мощности энергоус-

тановки и увеличению отпуска электрической энергии. Кроме того, увеличивается степень сухости газообразного диоксида углерода на лопатках последней ступени турбоагрегата, что повышает надежность и долговечность работы его лопаток [6].

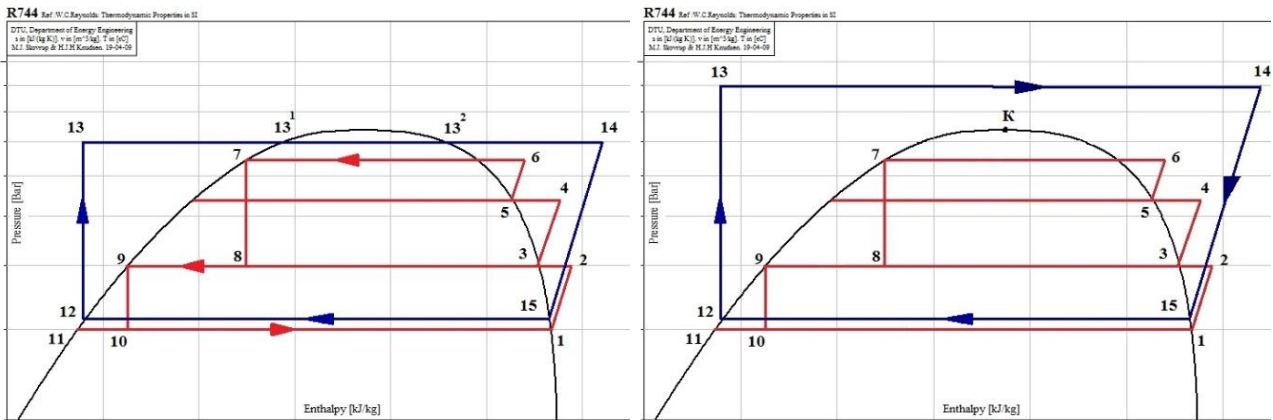


Рис. 2. Цикл турбодетандерной тригенерационной установки на диоксиде углерода на до- и сверхкритических параметрах рабочего тела

Схема тригенерационной установки ПГУ и котла-утилизатора на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты представлена на рис. 3. Принцип работы установки аналогичен предыдущей схеме. Вторичный перегрев углекислоты, циркулирующей в паротурбинном контуре, осуществляется в котле-утилизаторе, однако, можно осуществить перегрев и в камере сгорания ГТУ, как показано на рис. 4.

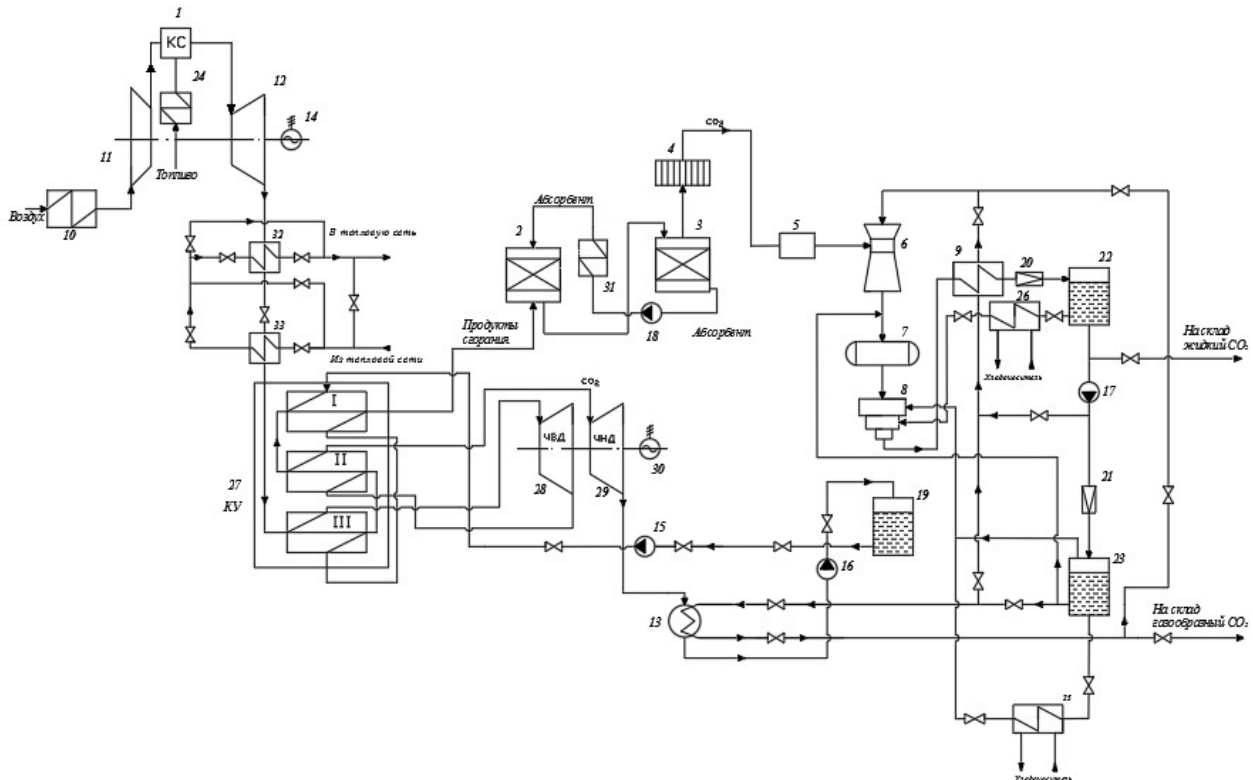


Рис. 3. Схема тригенерационной парогазовой турбодетандерной установки с котлом-утилизатором: 1 – камера сгорания; 2 – абсорбер; 3 – десорбер; 4 – брызгоотделитель; 5 – осушитель; 6 – инжектор; 7 – ресивер; 8 – компрессор; 9 – конденсатор; 10 – воздухоподогреватель; 11 – турбокомпрессор; 12 – газовая турбина; 13 – конденсатор-испаритель; 14, 30 – электрогенератор; 15, 16, 17, 18 – насос; 19 – сборник; 20, 21 – регулирующий вентиль; 22 – сепаратор 1; 23 – сепаратор 2; 24, 31, 32, 33 – теплообменник; 25, 26 – испаритель; 27 – котёл-утилизатор; 28, 29 – ЧВД и ЧНД турбины

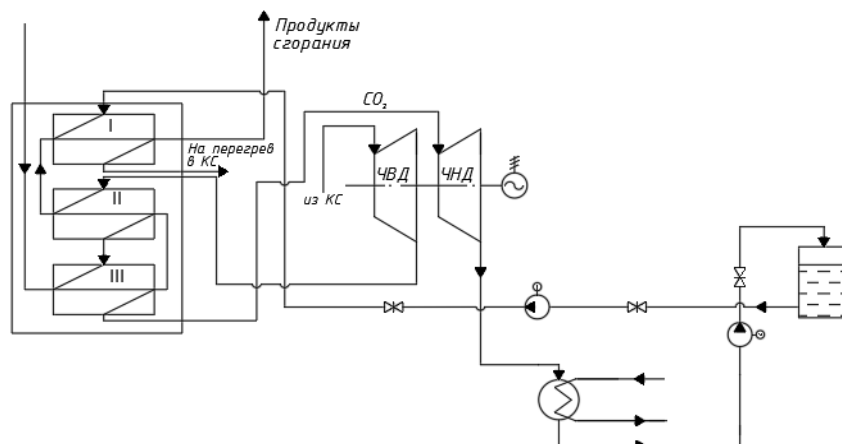


Рис. 4. Схема двукратного перегрева  $\text{CO}_2$  в камере сгорания ГТУ и котле-утилизаторе

На рис. 5 показаны циклы описанной установки. Циклы состоят из следующих процессов: 12–13 – повышение давления жидкого  $\text{CO}_2$  в насосе 16; 13–13<sup>1</sup> – нагрев жидкого  $\text{CO}_2$  до температуры кипения в испарителе I; 13<sup>1</sup>–13<sup>2</sup> – изобарно-изотермический процесс кипения  $\text{CO}_2$  в испарителе I; 13<sup>2</sup>–14 – перегрев газообразного  $\text{CO}_2$  в пароперегревателе III котла утилизатора 27; 14–15 – адиабатное расширение газообразного  $\text{CO}_2$  в ЧВД 28; 15–16 – второй перегрев газообразного  $\text{CO}_2$  в ступени II котла утилизатора 27; 16–17 – адиабатное расширение газообразного  $\text{CO}_2$  в ЧНД 29; 17–12 – изобарно-изотермический процесс конденсации диоксида углерода в конденсаторе-испарителе 13. Для холодильного цикла аналогично рис. 2.

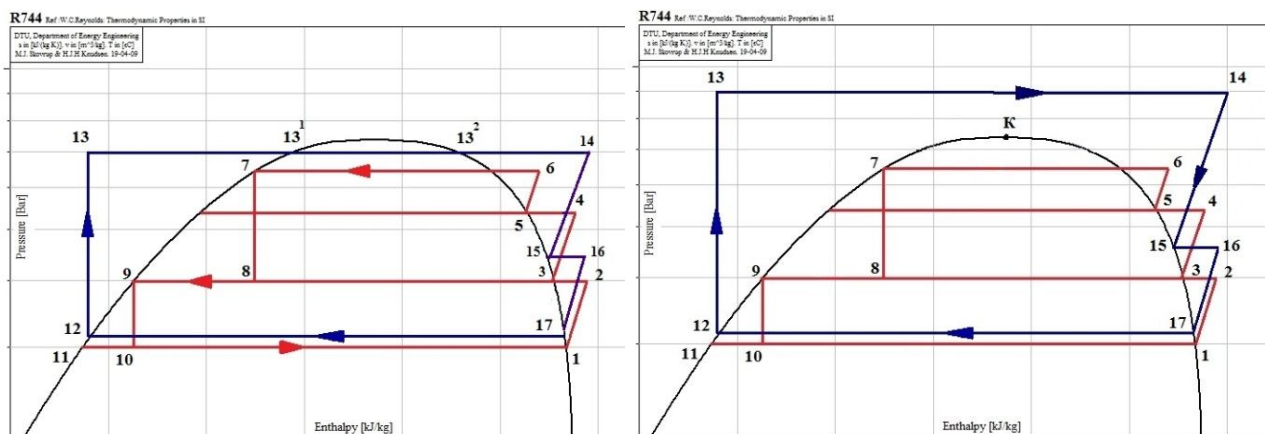


Рис. 5. Цикл турбодетандерной тригенерационной установки на диоксиде углерода с двукратным перегревом в котле-утилизаторе на до- и сверхкритических параметрах рабочего тела

Предложенные технологические схемы тригенерационных установок с циклом на основе диоксида углерода и производством жидкой и газообразной углекислоты являются одним из решений перспективного направления комбинированного производства энергии и экономии энергоресурсов. Применение тригенерационных установок позволит обеспечить централизованное хладоснабжение наряду с теплом и электроэнергией конкретное промышленное предприятие и т. д., что является одним из перспективных решений в области энергетики и грамотном природопользовании.

Использование  $\text{CO}_2$  в турбодетандерных установках актуально и, изучив возможность работы теплоутилизационных установок на  $\text{CO}_2$ , можно сделать вывод, что представленные тригенерационные установки на базе турбодетандера обладают хорошим потенциалом в области снижения расхода предприятий на топливо и электроэнергию, а также снижения теплового загрязнения атмосферы.

## Литература

1. Клименко А. В., Агабабов В. С., Борисова П. Н. Возможность применения холода и дополнительной электроэнергии на тепловой электростанции // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 30–37.
  2. Преимущества CO<sub>2</sub> в холодильной технике / По материалам JARN // Холодильная техника. 2016. № 3. С. 25.
  3. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. – 295 с.
  4. Агабабов В. С. О применении детандер-генераторных агрегатов в газовой промышленности // Энергосбережение и энергосберегающие технологии в энергетике газовой промышленности: сб. материалов НТС ОАО «Газпром». М., 2001. Т. 2. С. 50–53.
  5. Агабабов В. С. Бестопливные установки для производства электроэнергии, теплоты и холода на базе детандер-генераторных агрегатов // Новости теплоснабжения. 2009. № 1. С. 48–50.
  6. Кудинов А. А., Хусаинов К. Р. Двукратный промежуточный перегрев водяного пара в зоне высоких температур и в хвостовой части трехконтурного котла утилизатора // Промышленная энергетика. 2018. № 2. С. 21–28.
- 

УДК 658.261:621.56

## ТУРБОДЕТАНДЕРНЫЕ УСТАНОВКИ НА НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛАХ

**А. В. Овсянник, В. П. Ключинский**

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

Согласно закону «Об энергосбережении» одной из приоритетных задач Республики Беларусь является эффективное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Повышение термодинамической эффективности генерации энергии различных видов необходимо рассматривать как один из возможных путей решения этой задачи [1].

Для утилизации тепловых вторичных энергетических ресурсов, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях можно использовать тригенерационные турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах [2]. Одним из основных циклов данной установки является турбодетандерный (ТД) цикл. В качестве рабочего тела в данном цикле используются низкокипящие рабочие тела.

В зависимости от наклона линии насыщенного пара на Т-s диаграмме низкокипящие рабочие тела (НКРТ) можно разделить на «сухие», «влажные» и «изоэнтропные» рис. 1 [3].

Большие исследования в области повышения эффективности циклов проводились для паровых турбин, где в качестве рабочего тела используется водяной пар. Основными путями повышения эффективности паровых циклов являются: повышение параметров пара перед турбиной и использование промежуточного перегрева с целью предотвращения недопустимой конечной влажности пара [4].

Известно, что Т-s диаграмма воды имеет линию насыщения, схожую с «влажными» низкокипящими рабочими телами. Однако большое количество низкокипящих рабочих тел имеют «сухую» либо «изоэнтропную» линию насыщенного пара на Т-s диаграмме. Таким