

## Литература

1. Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2022. – № 3 (65). – С. 263–275.
2. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 108–115.
3. Ключинский, В. П. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / В. П. Ключинский, 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, 2020. – С. 130–132.

## ТРИГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ В ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ НА ДИОКСИДЕ УГЛЕРОДА ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

И. О. Свидинский

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

*Рассмотрено изучение способов повышения энергетической эффективности тепло-энергоустановок и снижения их тепловых потерь. Исследования проведены для четырех схем турбодетандерного цикла. Были изучены принципы их работы, а также принцип работы тригенерационной турбодетандерной установки на сверхкритических параметрах тела.*

**Ключевые слова:** тригенерация, хладагент, энергоэффективность, исследование, фреон.

В настоящее время особое внимание уделяется поиску наиболее эффективных и безопасных рабочих тел для энергетических установок прямого и обратного циклов. Одними из таких рабочих тел являются природные хладагенты, в частности, диоксид углерода. Точка зрения о вреде фреонов и пользе натуральных хладагентов в настоящее время стала доминирующей как в ЕС, так и во всем мире.

На рис. 1 представлены теоретические циклы турбодетандерного и углекислотного контуров в диаграмме  $\lg p$ – $b$  с полным промежуточным охлаждением.

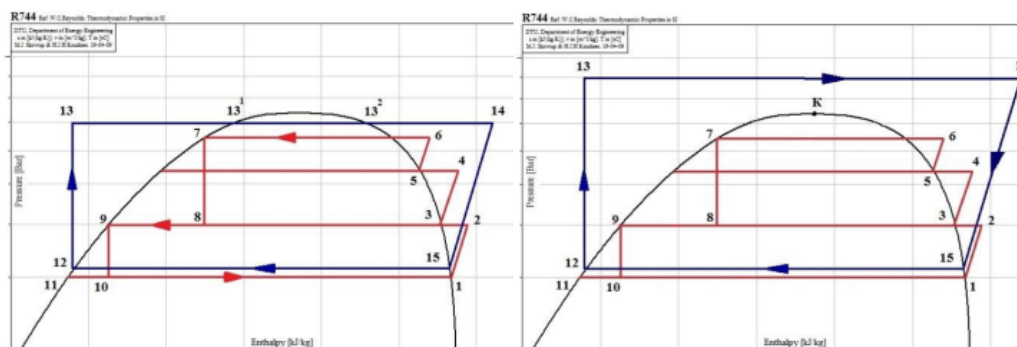


Рис. 1. Теоретические циклы турбодетандерного и углекислотного контуров в диаграмме  $\lg p$ – $b$  с полным промежуточным охлаждением

Циклы состоят из следующих процессов: *12–13* – повышение давления жидкого  $\text{CO}_2$  в насосе *16*; *13–131* – нагрев жидкого  $\text{CO}_2$  до температуры кипения в испарителе *11*; *131–132* – 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 сепараторе *22*; *9–10* – второе адиабатное дросселирование  $\text{CO}_2$  в дросселе *21* в сепараторе *23*; *11–1* – кипение жидкого  $\text{CO}_2$  в конденсаторе-испарителе *13*.

При расчете и анализе цикла турбодетандерной установки необходимо рассмотреть прямой цикл генерации тепловой и электрической энергии в теплофикационном контуре и в турбодетандерном контуре и обратный трехступенчатый цикл производства жидкой и газообразной углекислоты и генерации холода. Тригенерационная установка дополнительно включает в себя испарители *27* и *28*. Испаритель *27* работает при температуре кипения  $T_{01}$ , соответствующей давлению насыщения  $P_{01}$ , а испаритель *28* – при температуре кипения  $T_{02}$ , соответствующей давлению  $P_{02}$ . Газообразный  $\text{CO}_2$  из сепаратора *22* и испарителя *27* и из сепаратора *23* и испарителя *28* поступает соответственно на вторую и первую ступени компрессора *8*.

Совершенствование и повышение энергетической эффективности теплоэнергостановок связано с разработкой и внедрением парогазовых установок (ПГУ) утилизационного типа. При этом, в частности, достигается высокое значение КПД по отпуску электрической энергии. Кроме того, дополнительными преимуществами ПГУ с котлами-утилизаторами являются низкий уровень выбросов  $\text{NO}_x$  в атмосферу и малая потребность установки в охлаждающей воде [4, 5]. Одним из основных направлений совершенствования парогазовых энергоустановок является внедрение промежуточного перегрева пара (газа), частично отработавшего в турбодетандере [8, 9]. Это позволяет повысить КПД турбодетандера за счет подвода к газу дополнительного количества теплоты, в результате чего возрастает полезный теплоперепад в турбодетандере. Это приводит к росту электрической мощности турбодетандерной установки и увеличению отпуска электрической энергии. Кроме того, увеличивается степень сухости газообразного диоксида углерода на лопатках последней ступени турбодетандера, что повышает надежность и долговечность работы его лопаток [9].

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложены технологические схемы турбодетандерных тригенерационных установок с циклом на основе диоксида углерода и производством жидкой и газообразной углекислоты, работающие на докритических параметрах. Холод, произведенный на тригенерационных установках, может быть использован в летний период при хладоснабжении систем вентиляции и кондиционирования воздуха промышленных и общественных зданий и сооружений, а также для целей охлаждения, замораживания и хранения продукции различного назначения.

2. Приведена методика термодинамического расчета циклов установок и их эксергетический анализ. Эксергетический КПД тригенерационной установки с ПГУ с котлом-утилизатором больше эксергетического КПД установки на вторичных энер-

горесурсах за счет большего количества выработанной электроэнергии при одинаковых начальных и конечных параметрах.

#### Л и т е р а т у р а

1. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. – 2016. – № 6. – С. 36–43.
2. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 2. – С. 41–51.
3. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. А. Овсянник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2019. – Т. 62, № 1. – С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>
4. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокиспящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 108–115.
5. Овсянник, А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокиспящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – 2020. – Т. 63, № 6. – С. 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>
6. Трухний, А. Д. Стационарные паровые турбины / А. Д. Трухний. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 640 с.
7. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М. : Энергия, 1973. – 295 с.
8. 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.
9. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М. : Энергия, 1968. – 280 с.

## ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ НА ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТАХ

Н. С. Грищенко

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

*Рассмотрено изучение способов повышения эффективности турбодетандерного цикла на низкокиспящих рабочих телах. Исследования проведены для четырех схем турбодетандерного цикла. Были изучены принципы их работы, а также принцип работы тригенерационной турбодетандерной установки на низкокиспящих рабочих телах.*

**Ключевые слова:** тригенерация, хладагент, низкокиспящие рабочие тела, исследование, фреон.

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

Целью данной работы является изучение способов повышения эффективности турбодетандерного цикла на низкокиспящих рабочих телах (НКРТ).

В зависимости от наклона линии насыщенного пара на  $T-s$ -диаграмме НКРТ можно разделить на «сухие», «влажные» и «изоэнтропные».