

## Результаты расчета

Параметры	Результаты расчета
Тепловая мощность $Q_{i, \text{т.у.}}$ , Гкал/ч	0,088
Общее количество сэкономленной тепловой энергии $\Delta Q$ , Гкал/год	57,44
Затраты электрической энергии $\Delta Э$ , тыс. кВт · ч	5,62
Экономия топлива в результате внедрения энергосберегающего мероприятия $\Delta B_m$ , т у. т.	8,72
Капиталовложения в мероприятие $\Delta K$ , руб.	25375
Статический срок окупаемости мероприятия $С_{\text{рок}}$ , лет	5,76
Динамический срок окупаемости мероприятия $T_{\text{ок.ст.}}$ , лет	7,92

## Литература

1. Володин, В. С. Исследование эффективности утилизации теплоты в системах приточно-вытяжной вентиляции / В. С. Володин, С. В. Здитовецкая // Энергетика. – 2014. – № 2. – С. 91–96.
2. Васильев, Л. Л. Теплообменники на тепловых трубах / Л. Л. Васильев. – Минск : Наука и техника, 1981. – 143 с.
3. Практическое использование высокоэффективных двухфазных термосифонных устройств / А. В. Шаповалов [и др.] // Агротехника и энергообеспечение. – 2019. – № 3 (24). – С. 117–127.

УДК 658.261

**ТРИГЕНЕРАЦИОННАЯ ТУРБОУСТАНОВКА  
НА ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ СМЕСЕВЫХ ХЛАДАГЕНТАХ  
ПРИ ДОКРИТИЧЕСКИХ И СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ**

**Д. А. Волоткевич**

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

*Представлен расчет тригенерационной установки, работающей с однократным перегревом пара. Изучено влияние докритических и сверхкритических параметров на работу установки, работающей на органическом цикле Ренкина с НКРТ. Для исследуемой схемы построены циклы в P-h- и T-S-координатах. Изучено влияние критических параметров на коэффициент полезного действия тригенерационной установки. В качестве рабочего тела выбран фреон R410a. Данный хладагент служит альтернативой R22. Главным достоинством данного хладагента является высокая удельная холодопроизводительность. Данный хладагент имеет нулевой показатель разрушения озона  $ODP = 0$ . Потенциал глобального потепления  $HGWP = 0,45$ . Установлено, что с увеличением критического давления коэффициент полезного действия тригенерационной установки на органический цикл Ренкина значительно повышается.*

**Ключевые слова:** фреон, критическое давление, докритическое давление, цикл Ренкина, хладагент, вторичные энергетические ресурсы.

## TRIGENERATION TURBINE UNIT ON OZONE-SAFE BLENDED REFRIGERANTS AT SUBCRITICAL AND SUPERCRITICAL PARAMETERS

D. A. Volotkevich

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

Science supervisor A. V. Ovsyannik

The paper presents the calculation of a trigeneration plant operating with single superheating of steam. The influence of precritical and supercritical parameters on the operation of the plant operating on the organic Rankine cycle with NCRT is studied. The cycles in  $P$ - $h$  and  $T$ - $S$  coordinates are constructed for the investigated scheme. The influence of critical parameters on the efficiency of the trigeneration unit is studied. Freon R410a is chosen as a working body. This refrigerant serves as an alternative to R22. The main advantage of this refrigerant is high specific cooling capacity. This refrigerant has zero ozone depletion index  $ODP = 0$ . Global warming potential  $HGWP = 0,45$ . It is found that with the increase of critical pressure, the coefficient of efficiency of trigeneration plant on ODC, significantly increases.

**Keywords:** freon, critical pressure, precritical pressure, Rankine cycle, refrigerant, secondary energy resources.

В настоящее время среди различных направлений в изучении тригенерационных установок особое место занимают схемы на органическом цикле Ренкина. В данной работе представлена схема с однократным перегревом и парокompрессионной холодильной машиной (рис. 1).

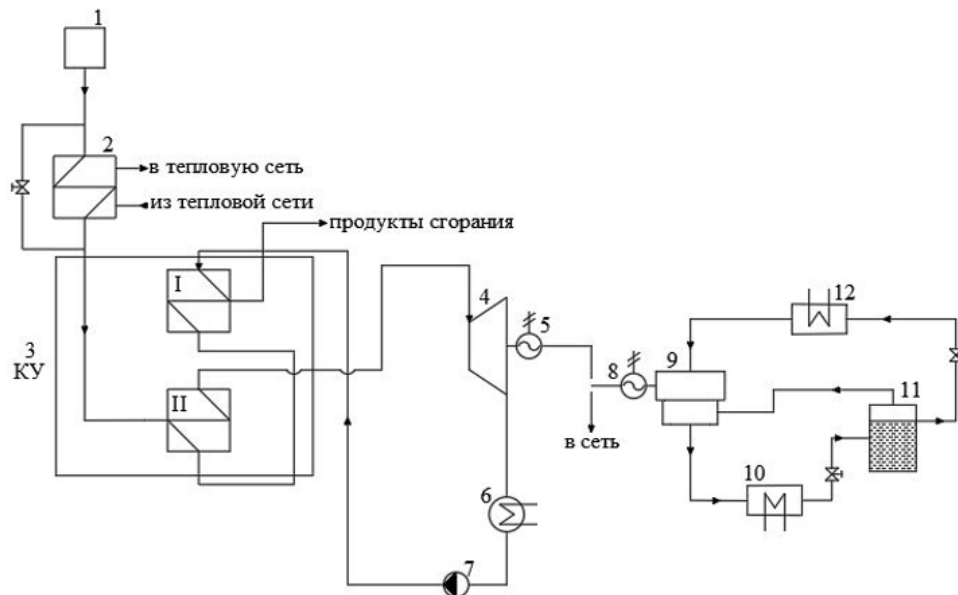


Рис. 1. Тригенерационная установка, работающая с однократным перегревом:  
 1 – источник продуктов сгорания; 2 – теплообменник; 3 – котел-утилизатор;  
 4 – турбина; 5, 8 – электрогенератор; 6 – конденсатор; 7 – питательный насос;  
 9 – двухступенчатый компрессор; 10 – конденсатор; 11 – сепаратор;  
 12 – испаритель

На рис. 2, 3 представлен органический цикл Ренкина на сверхкритических и докритических параметрах.

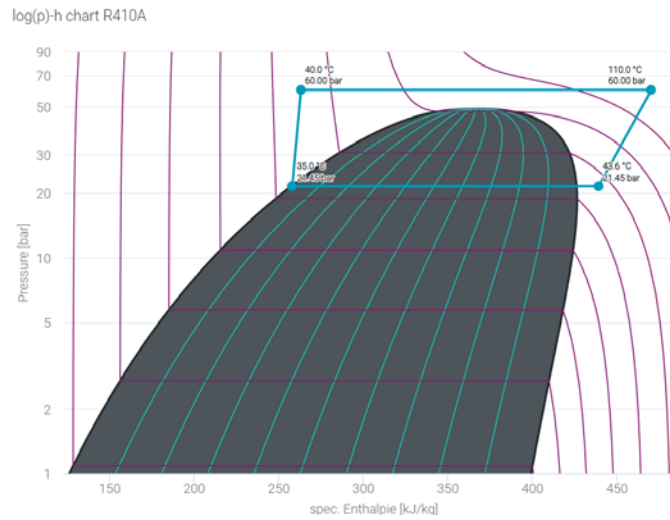


Рис. 2. Органический цикл Ренкина на сверхкритических параметрах

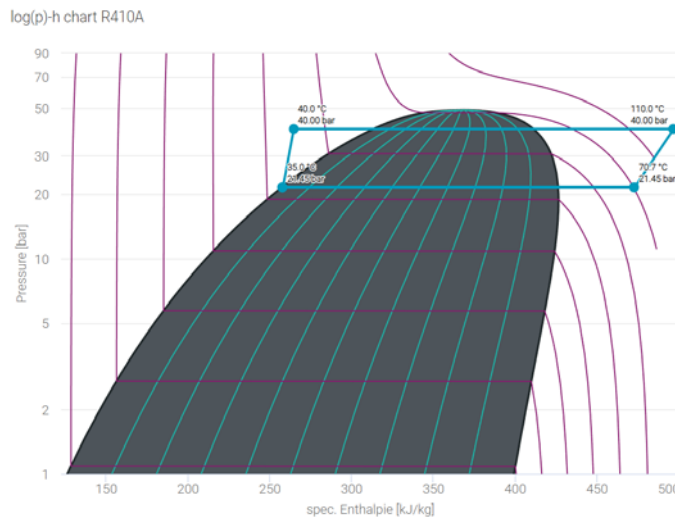


Рис. 3. Органический цикл Ренкина на докритических параметрах

Расчет органического цикла Ренкина:

- 1) количество тепла, поступившего с ВЭР,  $Q_{\text{вэр}} = 38$  МВт;
- 2) количество тепловой нагрузки  $Q_{\text{тепл.нагр}} = 1,2$  МВт.
- 3) температура вторичных энергоресурсов  $t_{\text{вэр}} = 170$  °С.

1. Количество тепла, поступившего с ВЭР на котельную установку (КУ):

$$Q_{\text{ку}} = Q_{\text{вэр}} - \frac{Q_{\text{тепл.нагр}}}{\eta_{\text{то}}}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{вэр}}$  – тепловая нагрузка от ВЭР, кВт;  $Q_{\text{тепл.нагр}}$  – тепловая нагрузка теплообменника, кВт;  $\eta_{\text{то}}$  – КПД теплообменника, 83 %.

2. Количество тепла, полезно используемого в КУ:

$$Q_{\text{переданное хладагенту}} = Q_{\text{ку}} \cdot \eta_{\text{ку}}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{ку}}$  – КПД КУ, 84 %.

3. Расход хладагента:

– для цикла с однократным перегревом:

$$G_1 = \frac{Q_{\text{переданное хладагенту}}}{h_1 - h_4}, \text{ кг/с}, \quad (3)$$

где  $h_1$  – энтальпия рабочего тела в начале процесса адиабатного расширения в турбине, кДж/кг;  $h_4$  – энтальпия рабочего тела на выходе рабочего тела из питательного насоса, кДж/кг.

4. Электроэнергия, выработанная в турбине:

– для цикла с однократным перегревом:

$$N_{\text{эл}} = (h_1 - h_2)G_1\eta_{\text{м}}\eta_{\text{п}}\eta_{\text{г}}, \text{ кВт}, \quad (4)$$

где  $\eta_{\text{м}}$  – механический КПД, 80 %;  $\eta_{\text{п}}$  – КПД передачи, 85 %;  $\eta_{\text{г}}$  – КПД генератора, 82 %.

5. Электроэнергия, потребляемая насосом:

– для цикла с однократным перегревом:

$$N_{\text{эл}} = \frac{(h_4 - h_3)G_1}{\eta_{\text{м}}\eta_{\text{п}}\eta_{\text{эд}}}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где  $\eta_{\text{эд}}$  – КПД электродвигателя, 83 %.

6. КПД органического цикла Ренкина:

– для цикла с однократным перегревом:

$$\eta_{\text{оцрп}} = \frac{N_{\text{эл}} - N_{\text{эл}}}{Q_{\text{ку}}}, \%. \quad (6)$$

Таблица 1

Характерные точки органического цикла Ренкина

Энтальпия в характерных точках, кДж/кг	Наименование хладагента		Температура в характерных точках, °С	Параметры рабочего тела	
	R410a, докритические	R410a, сверхкритические		докритические	сверхкритические
Однократный перегрев					
$h_1$	496,8	470,3	$t_1$	110	110
$h_2$	473	439,1	$t_2$	35	35
$h_3$	258	258	$t_3$	35	35
$h_4$	264	263,1	$t_4$	40	40

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Результаты расчета органического цикла Ренкина

Наименование параметра	Формула	Параметры рабочего тела	
		докритические	сверхкритические
Количество тепла, поступившего с ВЭР на КУ, кВт	(1)	36554,42	36554,42
Количество тепла, полезно используемого в КУ, кВт	(2)	30705,54	30705,54
Расход хладагента, кг/с, для цикла с однократным перегревом	(3)	132,35	148,27
Электроэнергия, выработанная в турбине, кВт, для цикла с однократным перегревом	(4)	1692,8	2574,77
Электроэнергия, потребляемая насосом, кВт, для цикла с однократным перегревом	(5)	1324,21	1337,34
КПД органического цикла Ренкина, %, для цикла с однократным перегревом	(6)	1	3,38

Повышение параметров температуры низкокипящего рабочего тела повышает КПД тригенерационной установки как в случае с использованием параметров докритических, так и сверх критических. С увеличением критического давления рабочего тела эффективность органического цикла Ренкина при термодинамически оптимальных параметрах значительно повышается.

## Литература

1. Ключинский, В. П. Термодинамический и технико-экономический анализ тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2022. – № 1 (88). – С. 80–89.
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 (81). – С. 41–51.
3. Экономическая эффективность утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов посредством установки турбины на низкокипящем рабочем теле / А. Л. Шубенко [и др.] // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 6. – С. 12–22.
4. Агабабов, В. С. Производство электроэнергии в детандер-генераторных агрегатах с одновременным отпуском теплоты различных температурных уровней (теплоты и холода) / В. С. Агабабов, А. В. Корягин, Е. В. Джураева // Рациональное использование природного газа в металлургии : сб. тез. междунар. науч.-практ. конф., Москва, 13–14 нояб. 2003 г. – М. : МИСИС, 2003.
5. Аршуков, А. И. Тригенерация энергии в турбодетандерных фреоновых установках с использованием вторичных энергетических ресурсов / А. И. Аршуков, П. А. Ковальчук // Беларусь в современном мире : материалы XI Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 17–18 мая 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. общества «Знание» ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 258–261.
6. Овсянник, А. В. Влияние теплофизических свойств хладагентов на термодинамическую эффективность органического цикла Ренкина / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 4 (87). – С. 100–105.