

УДК 621.577

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С ДЕТАНДЕРОМ НА ОСНОВЕ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ФРЕОНОВ

А. А. НИЖНИКОВ, А. В. ОВСЯННИК

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

Ключевые слова: теплоутилизующая энергоустановка, озонобезопасное и взрывобезопасное низкокипящее рабочее тело, эксергетический анализ, эксергетический коэффициент полезного действия теплоутилизационной установки с детандером.

Введение

Реалии современного мира оказывают сильное влияние на все отрасли промышленности, вынуждая производителей искать более энергоэффективные технологии для снижения себестоимости продукции. Для стимулирования предприятий на государственном уровне была разработана программа «Энергосбережение», которой были определены следующие цели:

- сдерживание роста валового потребления ТЭР (топливно-энергетических ресурсов) при экономическом развитии страны;
- дальнейшее увеличение использования местных ТЭР, в том числе вторичных энергоресурсов (ВЭР).

Реализация поставленных целей предполагает внедрение новых менее энергоемких технологических процессов, а также использование низкопотенциальных источников энергии, которые мало используются в нашей стране. Кроме того, сброс низкопотенциальной энергии оказывает влияние на экологию в стране и мире.

В Республике Беларусь использование сбросной теплоты промышленных предприятий для получения тепловой и электрической энергии позволит снизить себестоимость выпускаемой продукции, что сделает ее не только более привлекательной на внешних рынках, но и снизит нагрузку на экологию.

Установки по утилизации низкопотенциального тепла используют низкокипящее рабочее тело (НКРТ). Рассматриваемые установки могут получить широкое распространение на предприятиях легкой и тяжелой промышленности, а также на предприятиях коммунальных служб.

В различных отраслях промышленности применяется технологическое оборудование, сбросное тепло которого рассеивается в атмосфере, что приводит к увеличению энергетической составляющей в себестоимости продукции, как следствие – к увеличению цены и неспособности конкурировать на внешних рынках.

В легкой промышленности применяется сушка древесины со сбросом горячих газов в атмосферу. Применение на таких предприятиях установок на НКРТ позволит использовать низкопотенциальное тепло с получением электрической энергии.

Установки данного типа можно применять на местных водогрейных и паровых котельных для обеспечения полной загрузки котлов в моменты их неполной загрузки.

Применение таких установок данного типа обеспечивает получение электрической энергии из низкопотенциальных и сбросных источников энергии.

Существенным преимуществом применения НКРТ в цикле является использование обычных сталей при производстве турбин, а также при применении НКРТ уменьшается объемный расход рабочего тела и, следовательно, уменьшаются размеры лопаток турбины [1].

Установки данного типа способны осуществлять рабочий цикл при температуре рабочего тела равной 80 °С [2].

Целью работы является определение эксергетического КПД теплоутилизационной установки.

Основная часть

Использование НКРТ в установках обеспечивает снижение рабочей температуры цикла, что способствует использованию в качестве источника энергии ВЭР, а также происходит снижение потерь энергии в окружающую среду.

В качестве рабочего тела используется озонобезопасный фреон R404а, данный выбор обусловлен взрывобезопасностью данного фреона. В зарубежных аналогах применяются взрывоопасные рабочие тела (пентан, бутан, метан) [3]–[5]. Однако не уделено внимание рассмотрению установок, работающих на основе взрывобезопасных и озонобезопасных фреонов.

Задачей проведения эксергетического анализа является определение эффективности использования энергии ВЭР в установке утилизации тепла с детандером, а также оптимизация параметров работы установки.

Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Принцип работы установки следующий: теплота от ВЭР передается рабочему телу в испарителе, в котором хладагент испаряется и перегревается и в перегретом состоянии поступает в турбодетандер (турбина, предназначенная для расширения НКРТ), в котором происходит расширение перегретого хладагента до насыщенного состояния. Насыщенный пар после турбодетандера поступает в конденсатор, где происходит конденсация паров хладагента, затем рабочее тело поступает в насос и цикл замыкается.

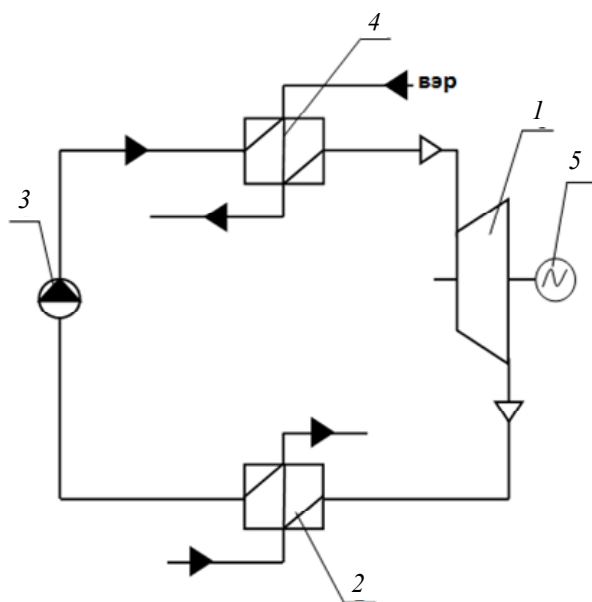


Рис. 1. Теплоутилизационная установка с детандером:
1 – турбодетандер; 2 – конденсатор; 3 – насос конденсатный;
4 – испаритель; 5 – электрогенератор

Для определения эффективности работы установки, работающей на НКРТ, проведем эксергетический анализ. В качестве рабочего тела был выбран фреон R404a. Обоснование применения фреона R404a в качестве рабочего тела приведено в [6].

Для проведения эксергетического анализа нам понадобятся значения энтропии и энтальпии реперных точек цикла. Для получения этих значений построим цикл установки в t - s -диаграмме.

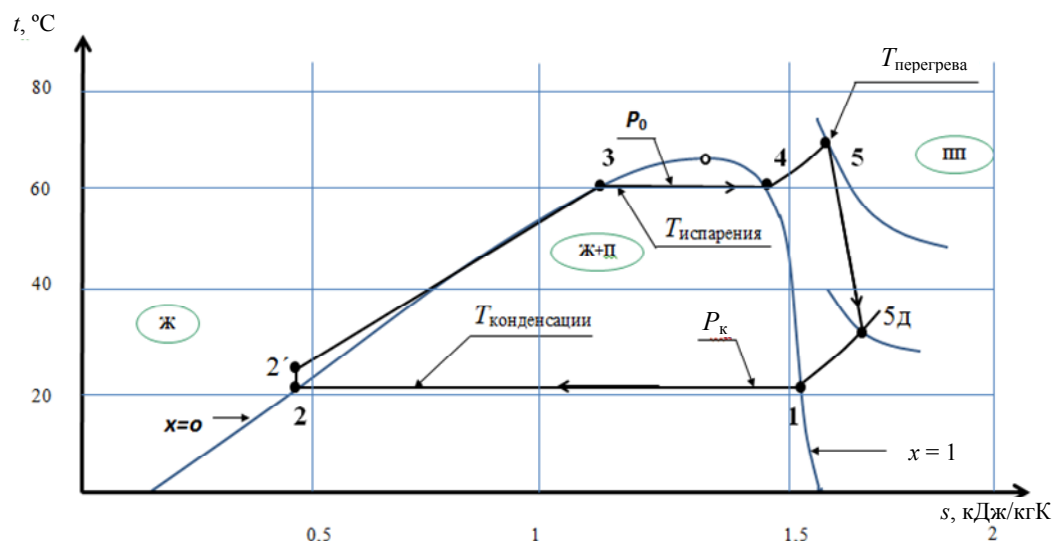


Рис. 2. Диаграмма t - s для фреона R404a с прямым циклом

Цикл теплоутилизационной установки с детандером на основе озонобезопасных фреонов начинается с испарения фреона и его перегрева – процесс $2'–5$. Процесс расширения перегретых паров фреона в детандере – процесс $5–5_{д}$. Процесс расширения фреона в детандере сопровождается выработкой электроэнергии. После расширения фреона до заданного давления он поступает в конденсатор – процесс $5_{д}–2$, где конденсируется, отдавая тепло охладителю. Далее фреон поступает в насос – процесс $2–2'$, и цикл замыкается.

При расчете принято, что потери давления в испарителе и конденсаторе отсутствуют. Расчет приведен в табл. 1.

Для проведения эксергетического анализа примем следующие допущения: температура окружающей среды составляет $t_{oc} = 20$ °С, количество и температура ВЭР достаточная для обеспечения необходимого температурного напора, при котором температура паров фреона на выходе из испарителя составит 70 °С. Для обеспечения наглядности полученных данных зададимся еще двумя значениями температуры паров фреона на выходе из испарителя, а именно 75 и 77 °С. Данные значения перегрева выбраны из расчета докритических параметров нагрева и давления до 3,5 МПа, что в значительной степени снижает металлоемкость и трудоемкость изготовления данной установки [1].

Построив цикл утилизационной установки в t - s -диаграмме для R404a (рис. 2), получим следующие данные для проведения эксергетического анализа (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные для проведения эксергетического анализа

Наименование параметра	Обозначение	Значение для 70 °С	Значение для 75 °С	Значение для 77 °С
Температура окружающей среды	$t_{oc}, ^\circ\text{C}$	20		
Температура ВЭР на входе в испаритель	$t'_{ВЭР}, ^\circ\text{C}$	150		
Температура ВЭР на выходе из испарителя	$t''_{ВЭР}, ^\circ\text{C}$	70		
Температура фреона после испарителя	$t''_{x.a}, ^\circ\text{C}$	70	75	77
Температура фреона после конденсатора	$t'_{x.a}, ^\circ\text{C}$	-10	10	0
Энтальпия фреона в начале расширения	$h_5, \text{кДж/кг}$	405	409	410
Энтальпия фреона в конце расширения	$h'_5, \text{кДж/кг}$	370	382	373
Энтропия процесса расширения	$s_5, \text{кДж/кг} \cdot \text{К}$	1,65	1,675	1,645
Действительная энтропия в конце расширения	$s_{5д}, \text{кДж/кг} \cdot \text{К}$	1,675	1,695	1,652

Вследствие того, что процесс расширения паров фреона в детандере является необратимым, определим действительное значение энтальпии и энтропии в конце процесса расширения.

$$h_{5д} = h_5 - (h_5 - h_{5'})\eta_{дет},$$

где $\eta_{дет}$ – КПД детандера из технической документации, $\eta_{дет} = 0,8$ [9].

Значение действительной энтропии приведено в табл. 2.

Для определения эксергетического КПД испарителя необходимо найти значение эксергетической температурной функции (коэффициент Карно). Определим эксергетическую температурную функцию для ВЭР и для рабочего тела R404a.

$$\tau_{ВЭР} = \frac{t_{ВЭР}^{cp} - t_{oc}}{t_{ВЭР}^{cp}}; \quad \tau_{x.a} = \frac{t_{x.a}^{cp} - t_{oc}}{t_{x.a}^{cp}},$$

где $t_{ВЭР}^{cp}$ – средняя температура ВЭР в испарителе; $t_{x.a}^{cp}$ – средняя температура фреона в испарителе.

Определив значение эксергетической температурной функции для теплового потока ВЭР и рабочего тела, а также, зная, что испарение является изобарным процессом, можем определить эксергетический КПД испарителя [8]:

$$\eta_{исп} = \frac{\tau_{x.a}}{\tau_{ВЭР}}.$$

Определим коэффициент полноты использования эксергии [7]:

$$R = \frac{\eta_{исп}}{h_5 - h_2}.$$

Относительная потеря эксергии в испарителе составит [7]:

$$\zeta_{\text{исп}} = 1 - \eta_{\text{исп}}.$$

Определим потери эксергии в детандере. Для этого примем механический КПД турбины $\eta_{\text{мех}} = 0,97$, а КПД генератора $\eta_{\text{ген}} = 0,96$ [7]:

$$\zeta_{\text{дет}} = R(s_{5\text{д}} - s_5)T_{\text{ос}} + (h_5 - h_{5\text{д}})(1 - \eta_{\text{мех}}\eta_{\text{ген}}).$$

После детандера по схеме следует конденсатор, для определения потерь эксергии в нем воспользуемся следующей формулой:

$$\zeta_{\text{кон}} = R((h_{5\text{д}} - h_2) - T_{\text{ос}}(s_{5\text{д}} - s_2)).$$

Определив потери эксергии в основных элементах теплоутилизационной установки на основе озонобезопасного фреона, определим эксергетический КПД по следующей формуле:

$$\eta_{\text{уст}} = 1 - \zeta_{\text{исп}} - \zeta_{\text{дет}} - \zeta_{\text{кон}} - \zeta_{\text{нас}},$$

где $\zeta_{\text{нас}}$ – потери эксергии на перекачку рабочего тела, из аналогичных расчетов примем это значение 20 % от эксергетического КПД.

Результаты расчет сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты эксергетического анализа теплоутилизационной установки

Наименование параметра	Обозначение	Температура перегрева R404a		
		70 °C	75 °C	77 °C
Эксергетическая температура ВЭР	$\tau_{\text{ВЭР}}$	0,77	0,77	0,77
Эксергетическая температура фреона	$\tau_{\text{х.а}}$	0,33	0,529	0,48
Эксергетический КПД испарителя	$\eta_{\text{исп}}$	0,429	0,68	0,618
Коэффициент использования эксергии	R	0,00182	0,0032	0,0027
Относительная потеря эксергии в испарителе	$\zeta_{\text{исп}}$	0,59	0,32	0,38
Относительная потеря эксергии в детандере	$\zeta_{\text{дет}}$	0,017	0,024	0,011
Относительная потеря эксергии в конденсаторе	$\zeta_{\text{кон}}$	0,05	0,054	0,029
Эксергетический КПД установки	$\eta_{\text{уст}}$	0,14	0,39	0,377

При расчетах намеренно пренебрегаем потерями эксергии на перекачку ВЭР, так как данная потеря эксергии выходит за границы баланса. Значение потерь эксергии на перекачку рабочих тел примем из аналогичных расчетов [7, с. 178–179]. Из источника видно, что данные потери составляют 20 % от КПД.

Как показал проведенный анализ, КПД нетто утилизационной установки находится в пределах 14–39 %. Изучив примеры эксергетических анализов установок приведенных в [7], [8], следует, что основные потери эксергии происходят в уста-

новках по преобразованию химической энергии топлива (котлы, реакторы и др.) в электрическую энергию и тепловую энергию. В данной установке не происходит преобразования химической энергии топлива, поэтому КПД-брутто значительно превосходит КПД-брутто приведенных выше установок.

Как видно из полученных данных, разброс значений КПД характеризует чувствительность установки к значению температуры перегрева рабочего тела в испарителе, снижение температуры перегрева приводит к значительному снижению КПД установки, данная зависимость графически представлена на рис. 3.

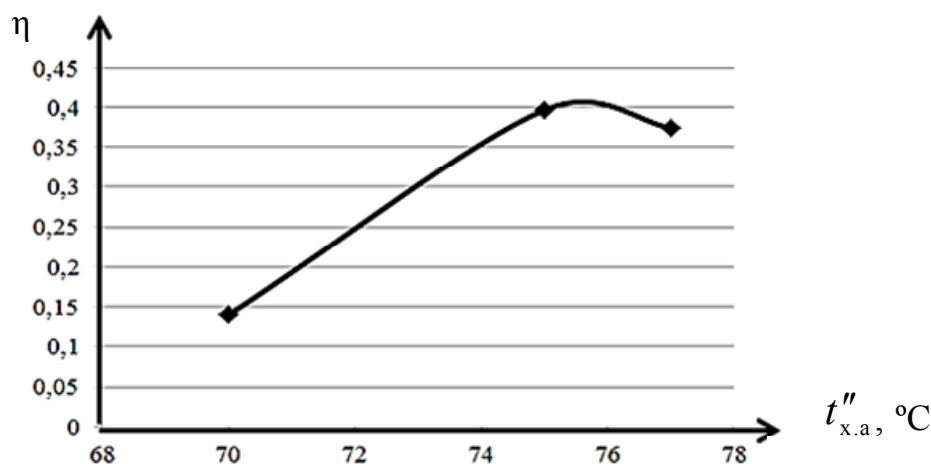


Рис. 3. График зависимости КПД теплоутилизационной установки от температуры перегрева фреона

Из полученных значений можно сделать вывод – эксергетический КПД теплоутилизационной установки выше энергетического КПД, что обусловлено малой разностью рабочей температуры фреона и окружающей среды.

Заключение

Эксергетический анализ показывает, что установки по утилизации низкопотенциального тепла, работающие на взрывобезопасном и озонобезопасном низкокипящем рабочем теле, обладают высоким потенциалом повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов.

Также установки данного типа обладают высоким экономическим потенциалом в области снижения энергетической составляющей в себестоимости выпускаемой продукции за счет быстрого внедрения в существующие тепловые схемы предприятий.

Литература

1. 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.
2. Гринман, М. И. Перспективы применения энергетических установок малой мощности с низкокипящими рабочими телами / М. И. Гринман, В. А. Фомин // Энергомашиностроение. – 2006. – № 1. – С. 63–69.
3. Legmann H. Recovery of low grade heat by means of the ORC process in the cement industry / Hilel Legmann, David Citrin: официальный сайт производителя – ORMAT International, Inc. [2010]. – Режим доступа : <http://www.ormat.com/sites/default/files/Recovery%20of%20low%20grade.pdf>. – Дата доступа: 29.03.2016.

4. Пятничко, В. А. Утилизация низкопотенциального тепла для производства электроэнергии с использованием пентана в качестве рабочего тела / В. А. Пятничко, Т. К. Крушневич, А. И. Пятничко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. – № 4. – С. 3–6.
5. Энергоутилизационная установка с пентановым рабочим циклом / Ю. С. Бухолдин [и др.] // Компрессорное и энерг. машиностроение. – 2005. – № 1. – С. 10–12.
6. Нижников, А. А. Теплоутилизационные установки с детандером на основе озонобезопасных хладагентов / А. А. Нижников // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухо-го. – 2016. – № 3. – С. 53–58.
7. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М. : Энергия, 1973. – 284 с.
8. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М. : Энергия, 1973. – 182 с.
9. Интех Гмб (Intech GmbH): официальный сайт дистрибьютора компании Shin Nippon Machinery/ Япония [2017]. – Режим доступа: http://www.intech-gmbh.ru/turbine_expanders.php. – Дата доступа: 02.10.2017.

Получено 02.03.2017 г.