

УДК 621.577

## ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ С ДЕТАНДЕРОМ НА ОСНОВЕ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ

**А. А. НИЖНИКОВ**

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

### Введение

Вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) – энергетический потенциал продукции, отходов, побочных и промежуточных продуктов, образующихся в технологических агрегатах (установках), который не используется в самом агрегате, но может быть частично или полностью употреблен для энергоснабжения других агрегатов. Рациональное использование вторичных энергетических ресурсов является одним из крупнейших резервов экономии топлива, способствующих снижению топливно-и энергоемкости промышленной продукции. ВЭР могут применяться непосредственно без изменения вида энергоносителя для удовлетворения потребности в топливе и теплоте или с изменением энергоносителя путем выработки теплоты, электроэнергии, холода или механической работы в утилизационных установках.

Наибольшими тепловыми вторичными энергетическими ресурсами располагают предприятия черной и цветной металлургии, химической, нефтехимической, газовой промышленности, промышленности строительных материалов, тяжелого машиностроения и некоторых других отраслей народного хозяйства. В этих отраслях широко используется теплота высокого, среднего и низкого потенциалов. Утилизация ВЭР высокого теплового уровня не вызывает особых трудностей, однако утилизация ВЭР среднего и низкого потенциалов сопровождается определенными трудностями, так как использование воды как наиболее дешевого и доступного рабочего тепла не позволяет в достаточной степени утилизировать низкопотенциальные ВЭР. Поэтому за рубежом широко используются теплоутилизующие энергоустановки для выработки электроэнергии за счет утилизации средне- и низкопотенциальной теплоты (геотермальных месторождений, промышленных сбросных вод) с применением в качестве рабочих тел низкокипящих веществ различного происхождения. В качестве рабочего тела в зарубежных аналогах применяются взрывоопасные рабочие тела (пентан, бутан, метан) [1]–[3]. Однако уделяется мало внимания установкам, работающим на основе невзрывоопасных и озонобезопасных хладагентов, таким как R404A, R407C, R410A.

В публикациях, посвященных исследованиям ОРС циклов, рассматриваются вопросы рационального выбора: параметров цикла (влияние отдельных параметров на КПД цикла [4], сверхкритический цикл [5]), рабочего тела (термомасло [1], пентан [3], [6], изобутан [8], R21 [4], водоаммиачная смесь и фреоновые смеси: например, 10 % R13 90 % R13b [5] и др.). Турбины на НКРТ применяются в различных областях: геотермальная энергетика [4], [5], [10]–[13], утилизация ВЭР за газовыми турбинами [3], [8], [9], [15], за двигателями внутреннего сгорания [7], в промышленности производства цемента [1], стекольной промышленности [13] и др.

Основным элементом установок является турбина на НКРТ (низкокипящее рабочее тело). Разработкой таких турбин занимаются: в России – ОАО «Калужский турбинный

завод»; в Украине – ОАО «Сумское НПО им. Фрунзе», ОАО «Турбогаз» (г. Харьков). Более 25 лет выпускаются турбины на НКРТ в развитых странах, фирмы-производители: ORMATInternational, Inc (Израиль – США) [3], InfinityLLC и WOWEnergies (обе – США), Turboden (Италия) [12], Siemens, Adorates и др.

Объектом рассмотрения настоящей работы является установка по утилизации ВЭР на основе турбодетандера, работающего на озонобезопасном низкокипящем рабочем теле.

Предметом рассмотрения настоящей работы является оценка эффективности утилизационной установки на основе турбодетандера, работающего на озонобезопасном низкокипящем рабочем теле.

Целью работы является оценка эффективности утилизации тепловых ВЭР с применением турбодетандеров, работающих на основе озонобезопасных хладагентов (R404A, R407C, R410A) в условиях Республики Беларусь.

### Основная часть

Для утилизации вторичных энергоресурсов рассмотрим установку, действующую по прямому циклу Ренкина, в качестве рабочего тела будем использовать следующие хладагенты: R404a, R407c, R410a.

Применение схем утилизации тепла с НКРТ позволяет более глубоко использовать потенциал ВЭР. Например, минимальная начальная температура рабочего тела может достигать 80 °С [13].

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.

Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

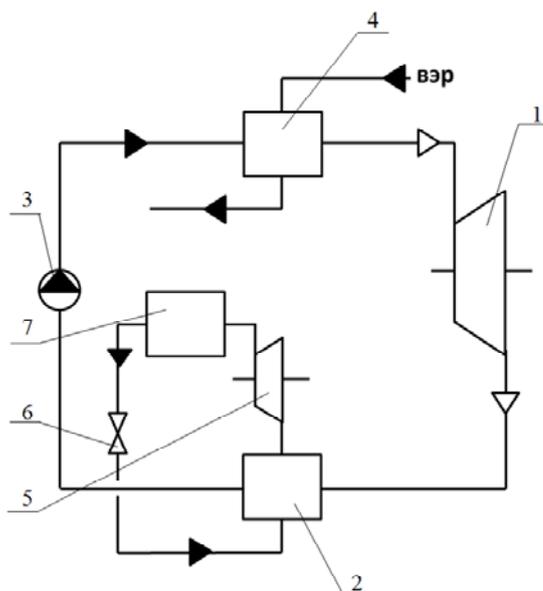


Рис. 1. Теплоутилизационная установка с детандером:

1 – турбодетандер; 2 – конденсатор-испаритель; 3 – насос конденсатный; 4 – испаритель;  
5 – компрессор; 6 – дроссель-вентиль; 7 – конденсатор холодильной машины

Принцип работы установки следующий: теплота от ВЭР передается рабочему телу в испарителе, в котором хладагент испаряется и перегревается. В перегретом состоянии хладагент поступает в турбодетандер, в котором происходит срабаты-

ние перегретого хладагента до насыщенного состояния. Насыщенный пар после турбодетандера поступает в конденсатор-испаритель, где происходит конденсация паров прямого цикла и испарение однотипного хладагента холодильной машины. Конденсат поступает в конденсатный насос, в котором происходит повышение давления до уровня испарителя утилизационной установки, и цикл замыкается. Холодильная машина в цикле необходима для осуществления замкнутого цикла утилизации ВЭР путем возврата температурного уровня до возможности охлаждения испарителя холодильной машины обыкновенной водой.

Для расчета зададимся параметрами ВЭР и примем, что количество тепла, передаваемого в испарителе, равно 1000 кВт. Для проведения расчета построим цикл установки в  $lgr-h$  диаграммах для различных хладагентов. Принципиальный цикл установки приведен на рис. 2. Характерные точки цикла: точка 1 – выход хладагента из детандера; точка 2 – вход хладагента в детандер; точка 3 – вход хладагента в испаритель; точка 4 – выход хладагента из конденсатора.

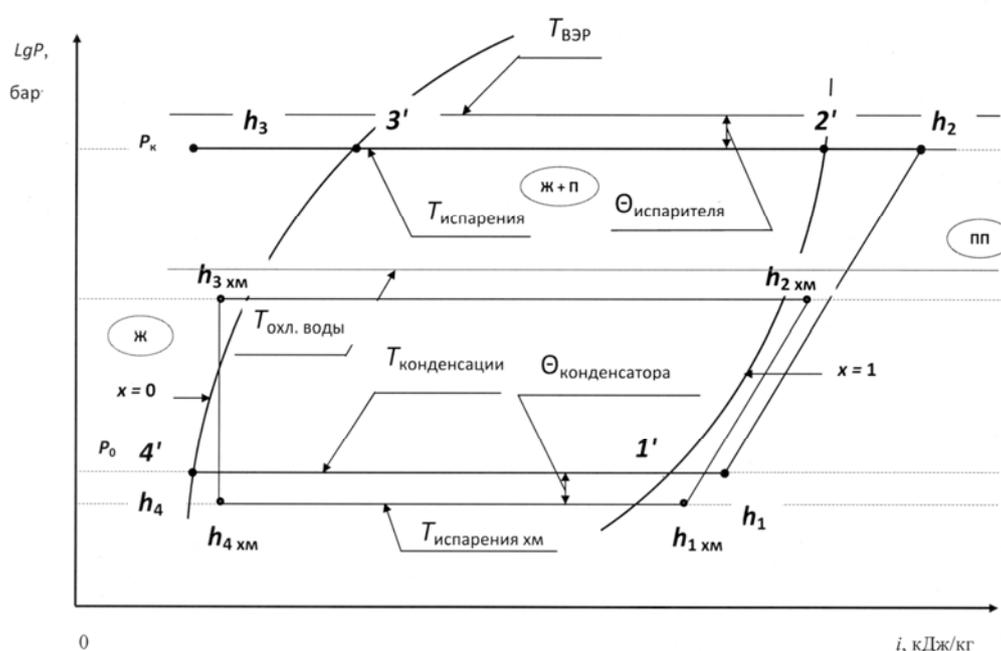


Рис. 2. Теоретический цикл утилизационной установки в координатах  $lgr-h$

Из диаграмм получим данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1

**Характерные точки утилизационного цикла установки**

Энтальпия характерных точек	Наименование хладагента		
	R404a	R407c	R410a
<i>Прямой цикл Ренкина</i>			
$h_2$ , кДж/кг	500	554	558
$h_1$ , кДж/кг	438	478	483
$h_4$ , кДж/кг	170	178	175
<i>Обратный цикл</i>			
$h_{1\text{xm}}$ , кДж/кг	372	420	430
$h_{2\text{xm}}$ , кДж/кг	392	449	460
$h_{4\text{xm}}$ , кДж/кг	200	200	200

Для оценки эффективности цикла утилизационной установки предварительный расчет прямого цикла Ренкина проведем методом КПД. Исходными данными для расчета по методу КПД являются узловые точки прямого и обратного циклов, построенных в осях  $lgr-h$ . Результаты расчета сводим в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета цикла утилизационной установки методом КПД

Наименование параметра	Обозначение	Формула	Наименование хладагента		
			R404a	R407c	R410a
Внутренний относительный КПД турбодетандера	$\eta_{oi\_t}$	Из технической документации	0,9	0,9	0,9
Удельная теоретическая работа цикла	$l_{теор}$ , кДж/кг	$l = h_2 - h_1$	62	76	75
Термический КПД цикла	$\eta_{терм}$	$\eta_{терм} = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_4}$	0,19	0,2	0,2
Внутренний абсолютный КПД цикла	$\eta_{абс}$	$\eta_{абс} = \eta_{терм} \eta_{oi\_ц}$	0,169	0,182	0,123
Абсолютный эффективный КПД турбоустановки	$\eta_{эф}$	$\eta_{эф} = \eta_{абс} \eta_{тур}$	0,16	0,172	0,167
Абсолютный электрический КПД турбогенераторной установки	$\eta_{т.у}$	$\eta_{т.у} = \eta_{эф} \eta_{генер}$	0,159	0,171	0,166
Работа, передаваемая внешнему потребителю	$l_{пот}$ , кДж/кг	$l_{пот} = (h_1 - h_4) \eta_{т.у}$	43,6	52,62	52,3
Теплота, поглощаемая хладагентом в испарителе	$q_{исп}$ , кДж/кг	$q_{исп} = \frac{h_{2\_0} - h_4}{\eta_{исп}}$ , где $h_{2\_0}$ – действительная энтальпия перегретого пара перед паропроводом к турбине	359,33	409,42	417
Абсолютный эффективный КПД теплоутилизационной установки	$\eta_{абс.эф}$	$\eta_{абс.эф} = \frac{l_{пот}}{q_{исп}}$	0,121	0,128	0,125

Расчет установки методом КПД дает основание более детально рассмотреть установки, работающие на взрывобезопасных и озонобезопасных хладагентах, так как их показатели КПД сопоставимы с показателями установок, работающих на взрывоопасных хладагентах типа R600 и др. При рассмотрении полученных данных и оценке результата следует учесть, что стоимость ВЭР мала по сравнению со стоимостью углеводородов.

Расчет действительных циклов утилизационной установки производим путем составления тепловых балансов испарителя и конденсатора. После составления тепловых балансов получим значения расчетных показателей (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчета цикла утилизационной установки методом балансовых уравнений

Расчетные параметры		Формула	Наименование хладагента		
			R404a	R407c	R410a
<i>Прямой цикл Карно</i>					
$G_{\text{хлад}}$	кг/с	$G_{\text{хлад}} = \frac{Q_{\text{исп}}}{(h_2 - h_4)}$	3,03	2,66	2,61
$Q_{\text{кон}}$	кВт	$Q_{\text{кон}} = G_{\text{хлад}} (h_1 - h_4)$	812,12	797,87	804,18
$N_{\text{у.у}}$	кВт	$N_{\text{у.у}} = N_{\text{т}} - N_{\text{н}} - N_{\text{ком}}$ , где $N_{\text{т}}$ , $N_{\text{н}}$ , $N_{\text{ком}}$ – мощность турбины, мощность насоса, мощность компрессора	102,6	92,52	88
<i>Обратный цикл Карно</i>					
$G_{\text{х.м}}$	кг/с	$G_{\text{х.м}} = \frac{Q_{\text{кон}} \eta_{\text{кон}}}{(h_{1\text{ х.м}} - h_{4\text{ х.м}})}$	4,63	3,23	3,09
$Q_{\text{х.м}}$	кВт	$Q_{\text{х.м}} = G_{\text{х.м}} (h_{1\text{ х.м}} - h_{4\text{ х.м}})$	795,88	710,83	710,83
$N_{\text{ком}}$	кВт	$N_{\text{ком}} = l_{\text{к}} G_{\text{х.м}}$ , где $l_{\text{к}}$ – работа сжатия хладагента в ком- прессоре	69,41	93,70	92,72
$Q_{\text{кон. х.м}}$	кВт	$Q_{\text{кон. х.м}} = G_{\text{х.м}} (h_{2\text{ х.м}} - h_{4\text{ х.м}})$	865,29	804,53	803,55

Таким образом, наиболее эффективной является работа утилизационной установки на хладагенте R404a, в которой количество электроэнергии, получаемой на выходе из установки, составляет 102,6 кВт и при этом мощность, затрачиваемая на сжатие хладагента в холодильной установке, является самой малой и составляет 69,41 кВт.

Однако если рассмотреть предприятия пищевой промышленности, где присутствуют в достаточном количестве тепловые ВЭР и существует необходимость в получении холода, то эффективность данной установки значительно увеличится, так как не нужно повышать параметры в конденсаторе холодильной машины до уровня 5–10 °С. Предварительная оценка показывает, что снижение температуры в конденсаторе холодильной машины на 10 °С приведет к увеличению мощности утилизационной установки на 20 % до 120,9 кВт на хладагенте R404a.

**Заключение**

Изучив возможность работы теплоутилизационных установок на озонобезопасных хладагентах, можно сделать вывод, что данные установки обладают хорошими потенциалом в области снижения расхода предприятий на топливо и электроэнергию, а также снижения теплового загрязнения атмосферы. Расчеты показывают, что эффективность установки достигает 12 % и более в зависимости от выбранных режимных параметров.

**Литература**

1. Legmann, H. Recovery of low grade heat by means of the ORC process in the cement industry / Hilel Legmann, David Citrin : офиц. 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. – Загл. с экрана.

2. 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.
3. Энергоутилизационная установка с пентановым рабочим циклом / Ю. С. Бухолдин [и др.] // Компрессорное и энергет. машиностроение. – 2005. – № 1. – С. 10–12.
4. Огуречников, Л. А. Геотермальные ресурсы в энергетике / Л. А. Огуречников // Альтернативные энергоресурсы и экология. – 2005. – № 11 (31). – С. 59–66.
5. Редько, А. А. Термодинамические параметры геотермальной электрической станции с бинарным сверхкритическим циклом / А. А. Редько // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2009. – № 4. – С. 81–85.
6. 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.
7. 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.
8. Утилизация сбросной теплоты ГПА в энергоустановках с низкокипящими рабочими телами / Б. Билека [и др.] // Газотурбинные технологии. – 2002. – № 5. – С. 6–10.
9. Турбины геотермальные. Калужский турбинный завод : офиц. сайт производителя – ОАО «КТЗ», Калуга, [2009]: Режим доступа: <http://www.ktz.kaluga.ru /russian/turbines/table09.htm>. – Дата доступа: 05.01.2010. – Загл. с экрана.
10. Поваров, О. А. Развитие геотермальной энергетики в России и за рубежом / О. А. Поваров, Г. В. Томаров // Теплоэнергетика. – 2006. – № 3. – С. 3–10.
11. Огуречников, Л. А. Комбинированная выработка электрической и тепловой энергии в низкотемпературной бинарной электростанции / Л. А. Огуречников // Альтернативные энергоресурсы и экология. – 2007. – № 5 (47). – С. 68–72.
12. CleanenergyaheadTurboden : офиц. сайт производителя. – Электрон. дан. (1 PDF файл, 1372552 kB, рус.). – Систем. требования: AdobeAcrobatReader. – Italy, Turbodens.r.l., [2016]: – Режим доступа: [http://www.turboden.eu/en/public/press/150626\\_GASTURBINETECHNOLOGIES.RU%20\(art.%20NR\\_WHR\).pdf](http://www.turboden.eu/en/public/press/150626_GASTURBINETECHNOLOGIES.RU%20(art.%20NR_WHR).pdf). – Дата доступа: 28.03.2016. – Загл. с экрана.
13. 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.

Получено 22.04.2016 г.