

promotes modernization and informational support of learning process in vocational training colleges. Structure and examples of application of new equipment during the teaching of the disciplines of engineering, technical, and natural direction, in particular, energy saving, is described. Characteristics and advantages of the conception of electronic digital laboratories using in learning experiment are considered.

УДК 662.99

А.А. РЕДЬКО, С.В. ПАВЛОВСКИЙ, А.И. КОМПАН

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*Наводяться результати дослідження низькотемпературних циклів Ренкіна. Визначено значення електричної потужності, що виробляється, в когенераційному силовому контурі котельного агрегату при температурі вирушаючих газів 200-220°C. Показано, що при використанні сумішей органічних речовин при надкритичних параметрах можливе вироблення електроенергії достатніх для забезпечення власних потреб котельної установки.*

**Ключові слова:** утилізація, низькотемпературний цикл, когенерація, цикл Ренкіна.

Эффективность промышленных отопительных котельных составляет около 85-86%, что является недостаточным и приводит к нерациональному использованию топлива – природного газа. Температура уходящих газов составляет 180-220°C. Потери теплоты с уходящими газами является наиболее существенными и составляет около 8-9% по отношению к низшей теплоте сгорания газа, а при расчете теплового баланса по высшей теплоте сгорания – 16-18%. Использование теплоты уходящих газов возможно для подогрева воздуха, подаваемого на горение, подогрева обратной сетевой воды системы теплоснабжения. По данным экономия топлива при этом составляет от 0,95 до 3,76%. Более перспективным является использование теплоты уходящих газов для производства электроэнергии и в последующем для собственных нужд котельных установок.

Распространение получили процессы преобразования низко потенциальной теплоты в электроэнергию с использованием конденсационных паровых турбин в системах утилизации теплоты и когенерации геотермального тепло- и электроснабжения [1,2], реализуемые цикл Ренкина с различными легкокипящими рабочими веществами [2] в температурном диапазоне геотермальной жидкости до 200°C. В качестве рабочего теплоносителя бинарной энергетической станции

используются органические теплоносители, хладоны и различные смеси [1-3]. Термодинамическая эффективность процесса преобразования энергии существенно зависит от выбора рабочего вещества и параметров цикла установки, поэтому поиск эффективного рабочего вещества продолжается.

Целью настоящей работы является повышение эффективности котельных агрегатов путем утилизации теплоты уходящих газов для выработки электроэнергии. В работе приведены тепловая схема котельного агрегата с утилизационным силовым контуром и результаты численного исследования циклов установки преобразования теплоты уходящих газов котельного агрегата в электроэнергию.

В настоящей работе исследовались около 50 рабочих веществ и их смесей. На выбор рабочего вещества цикла влияют различные параметры и они должны характеризоваться: низкой температурой нормального кипения (ниже 350K), большой теплотой испарения, высокой плотностью, формой правой пограничной кривой (линии насыщенного пара) в диаграмме температура – энтропия (т.к. она ограничивает значение параметров пара после расширения его в турбине) и приемлемыми эксплуатационными качествами.

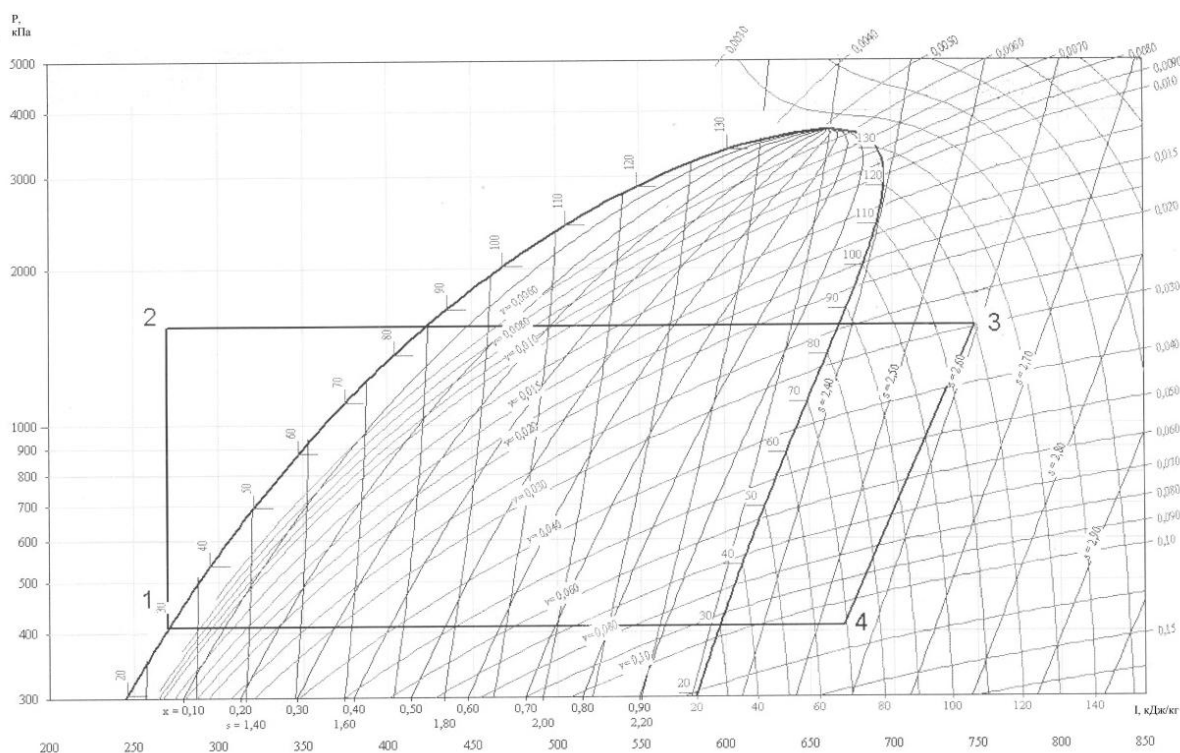


Рис 1. Диаграмма «давление - энтальпия» процесса утилизации для изобутана в цикле Ренкина (1-2 – сжатие в насосе; 2-3 – нагрев и испарение; 3-4 – расширение в турбине; 4-1 – охлаждение и конденсация пара)

На выбор рабочего вещества накладывают ограничения, связанные с экологическими и технологическими нормами, а также требованиями безопасности. В этих условиях, при выборе рабочего вещества, удовлетворяющего всем требованиям, принимается компромиссное решение. В расчетах принято ограничение – процессы расширения пара в турбине (3-4) завершаются в однофазной области (рис. 1)

Схема когенерационной установки показана на рис. 2.

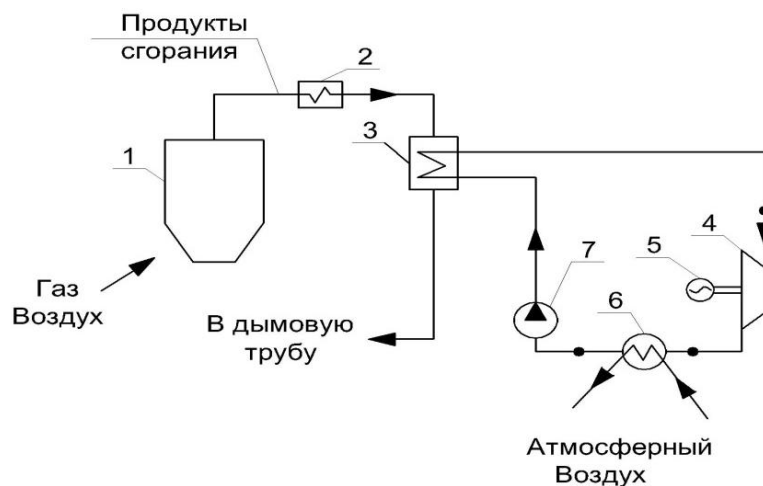


Рис.2 Схема котельного агрегата с теплоутилизационной когенерационной энергоустановкой (1 – котел, 2 – экономайзер, 3 – утилизатор-испаритель, 4 – турбина, 5 – электрогенератор, 6 – конденсатор, 7 – насос).

Утилизация теплоты уходящих газов после котла 1 и экономайзера 2 осуществляется в утилизационном испарителе 3. Пары теплоносителя подаются в турбину 4, где расширяются выполняя работу, приводя во вращение электрогенератор 5. Далее пары конденсируются в конденсаторе 6 и насосом 7 снова подаются в систему утилизации теплоты (регенеративный теплообменник, испаритель). Тепловая схема содержит два утилизационных теплообменника, расположенные до и после экономайзера. При необходимости увеличения выработки электроэнергии используются оба теплообменника, при снижении нагрузки – один теплообменник, второй – как испаритель.

Термодинамическая эффективность циклов определяется коэффициентом преобразования (COP) и коэффициентом утилизации теплоты.

Коэффициент тепломеханического преобразования теплоты определяется:

$$COP = \frac{L_{12} - L_{34}}{Q_{23}}, \quad (1)$$

где  $L_{12}$ ,  $L_{34}$  – работа адиабатического сжатия (расширения) в насосе 1-2 (турбине 3-4) в обратимом процессе:

$$L_{12} = m v_1 (P_2 - P_1), \quad (2)$$

$$L_{34} = m T_0 (i_3 - i_4), \quad (3)$$

где  $m$  – массовый расход рабочего вещества;  $v, P, i$  – объем, давление и энтальпия в узловых точках цикла;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $Q_{23}$  – количество теплоты, подведенное в испарителе в изобарном процессе:

$$Q_{23} = m(i_3 - i_2). \quad (4)$$

Коэффициент утилизации теплоты цикла ORC определяем как отношение действительной электрической мощности станции к максимальной теоретической мощности, которую можно получить при расширении пара в турбине:

$$\eta_u = \frac{W_u}{m [i - i_0 - T_0 (s - s_0)]}, \quad (5)$$

Исследовались докритические и сверхкритические циклы, одноступенчатые и каскадные энергетические установки.

Расчеты показывают, что на получение максимальной электрической мощности влияют значение давления и температуры пара рабочего вещества перед турбиной, расход рабочего вещества, значение минимального температурного напора в испарителе и конденсаторе ( $\Delta t_{\min}$ ), температура окружающей среды ( $\Delta t_{o.c.}$ ). Влияние минимального температурного перепада наиболее существенно. Так, при уменьшении  $\Delta t_{\min}$  от (10-15К) до (3-5К) выработка электроэнергии в цикле увеличивается на 20-25%. Увеличение мощности турбины наблюдается при увеличении внутреннего КПД турбины и насоса. Так, увеличение КПД турбины от 0,70-0,85 приводит к увеличению КПД установки от 12,2 до 14,7%. Наблюдается увеличение мощности на 20-25% при сезонном снижении температуры атмосферного воздуха и температуры конденсации.

Существует большое число критериев эффективности ORC. При проектировании энергетических установок пытаются определить оптимальные параметры при достижении компромисса между тремя критериями – энергетическим, экономическим и экологическим.

В качестве критерия эффективности рабочего вещества в настоящей работе принимали вырабатываемую мощность турбины и коэффициент утилизации теплоты в цикле, т.к. коэффициент тепломеханического преобразования COP изменяется незначительно в температурном диапазоне (220°C/15°C – испаритель-конденсатор) и составляет 0,12-0,15 практически для всех исследуемых рабочих веществ.

Эффективность рабочего вещества определяет также по значению полной эксергии потока перед турбиной.

Максимальную удельную теоретическую мощность или эксергетическую мощность определяли согласно уравнения:

$$e = i(P,T) - i_0(P_0,T_0) - T_0 [S_{P,T} - S_0(P_0,T_0)], \quad (6)$$

где  $i, S$  – энтальпия и энтропия рабочего вещества при значении  $P, T$  перед турбиной;  $i_0, S_0$  – при значении параметров атмосферного воздуха.

Полная эксергия определяется как

$$E = m \cdot e, \quad (7)$$

Таблица 1. Значение полной работоспособности (эксергии потоков) рабочих веществ перед турбиной в цикле Ренкина (температура пара - 200°C)

Рабочее вещество	$m$ , кг/с	$t_3/t_4$ , °C	$P_3/P_4$ , кПа	$e$ , кДж/кг	$E$ , кВт
R600a/R141в	6,8	$\frac{197}{140,7}$	$\frac{2500}{280}$	1803	1235,0
R600a/R141в	7,7	$\frac{197}{124,6}$	$\frac{3700}{280}$	183,7	1414,5
R600a/R141в	18,6	$\frac{197}{95,3}$	$\frac{6000}{280}$	173,9	3238,9
R717/R170	3,4	$\frac{197}{71,0}$	$\frac{8000}{1500}$	542,2	1821,8
R600a/R161	7,5	$\frac{197}{132,7}$	$\frac{3600}{489}$	211,3	1584,7
R600a/R161	17,2	$\frac{197}{106,0}$	$\frac{6000}{489}$	215,0	3702,3
R600a/н-гексан	5,24	$\frac{197}{114,9}$	$\frac{3850}{197}$	176,6	924,9
R600a/н-гексан	18,9	$\frac{197}{76,3}$	$\frac{6000}{197}$	152,1	2885,8
R717	2,9	$\frac{197}{30}$	$\frac{9500}{1073}$	643,5	1882,2
изобутан/изопентан	6,7	$\frac{197}{129,6}$	$\frac{3400}{270}$	185,6	1247,6

При снижении температуры пара рабочего вещества перед турбиной происходит уменьшение энергии потока. Так, для смеси R600a/R161 в сверхкритическом цикле эксергия потока уменьшается от 3702,3 кВт при  $t_{\text{псг}}=200^{\circ}\text{C}$  до значения  $E=2659,2$  кВт при  $t_{\text{псг}}=150^{\circ}\text{C}$ , т.е. на 28%. В докритическом цикле с рабочим веществом R600a/R141в эксергия соответственно уменьшается от значения 1414,5 кВт при  $t_{\text{псг}}=200^{\circ}\text{C}$  до значения  $E=881,2$  кВт при  $t_{\text{псг}}=140^{\circ}\text{C}$ , т.е. на 37%.

Эксергия потоков рабочих веществ – смесей R600a/R161, R600a/R141в, R600a/н-гексан в сверхкритических циклах при температуре  $197^{\circ}\text{C}$  составляет 3702,3-2885,8 кВт, что обеспечивает выработку электрической мощности 1619,7-1789,3 кВт (табл.2).

Таблица 2

Рабочее вещество	$\Delta i$ , кДж/кг	W, кВт
R600a/R141в	85	581,7
R600a/R141в*	96,1	1789,3
R600a/R161	88,7	665,6
R600a/R161*	99,5	1713,1
R600a/ н-гексан	95,3	499,3
R600a/ н-гексан*	85,4	1619,7
R717/R170	132,1	643,3
R600a/R601	100,2	673

Примечание: \* -сверхкритический режим

Расчеты показывают, что вырабатываемый в турбине удельный тепловой перепад в сверхкритическом цикле выше на 12,5-15%. Получены значения  $\Delta i$  для н-пентанового цикла около 80-100 кДж/кг при температуре перед турбиной  $200^{\circ}\text{C}$ .

Численные результаты показывают перспективность применения в качестве рабочих веществ смесей органических веществ (R600a/R161, R600a/R141в, R600a/н-гексан и др.) в сверхкритических циклах Ренкина в энергетических установках при утилизации теплоты продуктов сгорания в котельных агрегатах, которые существенно превосходят (в 1,5-2,5 раза) пароводяной цикл. Использование утилизационных энергетических установок может обеспечить выработку электрической мощности, достаточной для собственных нужд промышленной или отопительной котельной.

Список використаної літератури

1. Утилизация низкопотенциального тепла в энергетических установках с органическими теплоносителями. / В.А. Пятничко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – №5. – С. 10-14.

2. Редько А.А. Методы повышения эффективности систем геотермального теплоснабжения. / Редько А.А. / – Макеевка: ДонНАСА, 2010. – 302с.

3. Выбор рабочих тел для низкотемпературных циклов Ренкина на органических веществах. II Фторированные эфиры / Артеменко С., Никитин Д. // Холодильна техніка и технологія. – 2010. – №1. – С.6-10.

Стаття надійшла до редакції 22.09.13

**Повышение эффективности теплоутилизационных энергетических установок**

Редько А.А., Павловский С.В. Компан А.И.

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*

Приводятся результаты исследования низкотемпературных циклов Ренкина. Определено значение вырабатываемой электрической мощности в когенерационном силовом контуре котельного агрегата при температуре уходящих газов 200-220°C. Показано, что при использовании смесей органических веществ при сверхкритических параметрах возможна выработка электроэнергии достаточных для обеспечения собственных нужд котельной установки.

**Ключевые слова:** утилизация, низкотемпературный цикл, когенерация, цикл Ренкина.

**Increase effectiveness of heatutilization power installation**

Redko A., Pavlovskiy S., Kompan A.

*Kharkiv National University of Construction and Architecture*

The results of investigation of the Rankines low temperature cycles are given. A value of produced electrical power in cogeneration power circuit of the boiler unit for the flue-gases temperature 200-220°C was defined . It is shown that with the use of mixtures of organic substances in the supercritical parameters it is possible to develop the electric power sufficient for own needs of the boiler plant.

**Keywords:** recycling, low-temperature cycle, cogeneration, cycles, of the Rankines.