

УДК 662.99

А. А. РЕДЬКО, д-р техн. наук, проф.

А. И. КОМПАН, аспирант

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗУЮЩИХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Приведены результаты численного исследования термодинамической эффективности теплоутилизационных циклов выработки электроэнергии при использовании вторичных энергоресурсов уходящих газов топливоиспользующих агрегатов и промышленных печей с температурой до 350 °С.

Наведені результати чисельного дослідження термодинамічної ефективності утилізаційних циклів вироблення електроенергії при використанні вторинних енергоресурсів вихідних газів паливновикористовуючих агрегатів та промислових печей з температурою до 350 °С.

Введение

Значительными объемами вторичных энергоресурсов (ВЭР) уходящих газов характеризуются топливоиспользующие агрегаты и печи в различных отраслях промышленности (металлургической и машиностроительной; химической и нефтегазовой; стекловаренной и цементной и др.) [1, 5, 6]. Температурный потенциал уходящих газов изменяется от 150 ° до 350 ° и выше. Наиболее значительные являются потери теплоты уходящих газов доменных печей, составляющие от 70 до 116 т у.т. на тонну чугуна (т. е. около 15 %) [5], компрессорных станций магистральных газопроводов [1], тепловой потенциал ВЭР которых составляет ежегодно $3,3 \cdot 10^7$ МВт, его использование может обеспечить более 9,5 млрд кВт·ч электроэнергии ежегодно и экономить 3,1 млрд·м³ природного газа.

Энергоемкость производства чугуна в Украине на 25–30 % больше, чем в странах ЕС и Китае [7]. Наиболее энергоемкое доменное производство – до 40–60 % всего энергопотребления отрасли. Основные металлургические агрегаты – доменные и мартеновские печи, кислородные конвертеры, прокатные станы, печи обжига известняка – источники топливных и тепловых ВЭР. В металлургической отрасли основное потребление природного газа приходится на доменное производство – 40,1 %, на сталеплавильное – 17,3 % и прокатное – 16,1 %. Доля природного газа в общих затратах энергоресурсов составляет – в доменном производстве – 18 %, мартеновском – 78 %, прокатном – 45 %. При мартеновском способе производства стали используется около 100 м³ природного газа на 1 т стали. Использование топливных ВЭР (доменного и коксового газа) с увеличением объемов производства чугуна, сокращением его потребления в прокатном производстве, в увеличении доли в топливном балансе ТЭЦ до 80–100 % приводит к тому, что до 22 % этого газа сжигается на свече (потери ВЭР). Альтернативное решение использования топливных ВЭР – это производство электроэнергии. Тепловые ВЭР металлургических предприятий – это теплота дымовых газов (продуктов сгорания) используемая для производства пара в котлах-утилизаторах и пар-систем испарительного охлаждения. Объем пара в общем потреблении тепловой энергии металлургических предприятий составляет 35–46 % [8] и практически полностью обеспечивает потребности для производственных и санитарно-бытовых нужд. В настоящее время наметилась тенденция к снижению использования пара на 44%. Основное направление по энергосбережению – обеспечение металлургических предприятий собственной электроэнергией и тепловой энергией. Используя топливные и тепловые ВЭР предприятие может производить до 90 % электроэнергии для собственных нужд, что

позволит снизить закупку дополнительных энергоносителей, а так же в 2 раза уменьшить энергоемкость продукции и в 3 раза – экологическое воздействие на окружающую среду.

Использование теплоты уходящих газов возможно для подогрева воздуха или газа подаваемого в горелочные устройства, подогрева обратной сетевой воды системы теплоснабжения предприятия. Однако этот метод имеет технологические ограничения. Другим методом использования теплоты уходящих газов является выработка электроэнергии для потребления на собственные нужды производства (привод вентиляторов, компрессоров, дымососов, циркуляционных насосов и т. д.). Величины потребления электроэнергии на собственные нужды определяется тепловой мощностью агрегатов и их количеством. Широкое применение находят энергетические установки, реализуемые цикл Ренкина. Термодинамическая эффективность низкотемпературного цикла Ренкина зависит от многих параметров: эффективности теплообменного оборудования, КПД турбины и насоса и, во многом, от выбора рабочего вещества цикла [1–3].

Результаты исследований [1] показывают, что мощность турбины утилизационного н-пентанового цикла достигает 9,0–9,5 МВт при температуре пара 300 °С для газотурбинной установки мощностью 16 МВт.

В [4] приводятся результаты исследования цикла Ренкина с фреоновым теплоносителем (R12) для производства электроэнергии. Источником теплоты является пар системы испарительного охлаждения с температурой 120 °С. Мощность опытного турбогенератора составляла 750 кВт. Однако использования пара системы испарительного охлаждения может обеспечить до 60 % затрат электроэнергии на собственные нужды (необходимо около 6 МВт). Объемы тепловых ВЭР уходящих газов более значительные.

Цель работы – исследование термодинамической эффективности циклов Ренкина с различными рабочими веществами, использующими теплоту уходящих газов промышленных печей с температурой 300–350 °С.

Основная часть

Циклы Ренкина на органических веществах получили название органических циклов Ренкина (The Organic Rankine Cycle – ORC) и находят широкое применение в качестве новых технологий утилизации сбросной теплоты различных процессов, в промышленности и сельском хозяйстве, как более эффективные, чем пароводяные циклы. В низкотемпературных циклах Ренкина различного назначения (геотермальные, когенерационные, утилизационные и др.) используются различные рабочие вещества (пропан, бутан и их смеси (изобутан/изобутан), озонобезопасные хладоны (R134а, R142в, R161, R170), аммиак и водоаммиачные смеси, и другие [1–3]. Однако поиск рабочих веществ продолжается.

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, 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. На выбор рабочего вещества накладывают ограничения, связанные с экологическими и технологическими нормами, а так же требованиями безопасности. 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 обратном процессе:

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

$$L_{34} = mT_0(i_3 - i_4), \quad (3)$$

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 одноступенчатые докритические и сверхкритические циклы. 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 (Δt_{min}), температура окружающей среды ($\Delta t_{o.c.}$). Влияние минимального температурного перепада наиболее существенно. Так при уменьшении Δt_{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 до 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 (350 °C/15 °C – испаритель-конденсатор) и составляет 0,12–0,15 практически для всех исследуемых рабочих веществ.

Таблица 1

Значение удельной мощности турбины в циклах с различными органическими веществами ($t_{yx} = 350^{\circ}C$)

Рабочее вещество	$t_{кр}, ^{\circ}C/P_{кр},$ кПа	$N,$ кВт/(кг/с)	η_u	η_y	$N_n,$ кВт/(кг/с)
R141в	204,2/4250	72,8	0,20	0,60	2,8
R141в*	204,2/4250	125,9	0,22	0,95	7,1
R113	214,1/3437	81,4	0,19	0,73	3,0
R113*	214,1/3437	116,8	0,20	0,95	7,5
R30	237,0/6077	141,0	0,25	0,96	4,0
R30*	237,0/6077	149,1	0,26	0,95	7,4
R601a	187,2/3380	63,3	0,16	0,61	2,4
R601a*	187,2/3380	102,8	0,17	0,96	6,7
R602	234/3031	65,0	0,17	0,62	2,0
R602*	234/3031	111,0	0,19	0,96	6,5
R602*/R161*	182/4200	76,6	0,13	0,95	6,0

*Примечание: сверхкритические циклы.

В табл. 1 приведены некоторые результаты, которые показывают, что при температуре уходящих газов 350°C в силовом цикле Ренкина эффективными являются рабочие вещества с критической температурой выше 200°C . Ими оказались хладоны R30, R113, R141, R601a, R602. Смеси органических веществ (например, R600a/R141в; R600a/R161; R600a/R602 и др.) эффективны в диапазоне температур пара до 200°C , при повышении температуры до 350°C становятся менее эффективными и выработка электроэнергии в цикле снижается.

В качестве примера были выполнены расчеты вырабатываемой электроэнергии для доменных печей различного объема (табл. 2). Результаты показывают, что вырабатываемая мощность увеличивается с увеличением потенциала тепловых ВЭР. Для печи объемом 1030 м^3 выработка электроэнергии составляет около 4440 кВт, а для печи объемом 5500 м^3 – от 13,5 до 23,6 МВт в зависимости от рабочего вещества цикла.

Таблица 2

Значение вырабатываемой мощности турбины при использовании различного потенциала тепловых ВЭР доменных печей при $t_{\text{ух}} = 350^{\circ}\text{C}$

Объем печи, м^3	Объем уходящих газов, м^3	Рабочее вещество	Удельная мощность, кВт/(кг/с)	Вырабатываемая мощность, кВт
1033	107182	R30	149	4440
1386	143809	R30	149	5945
1719	178360	R113	116,8	5782
2000	207516	R113	116,8	6728
2300	238643	R141в	125,9	8347
2700	280147	R141в	125,9	9795
3200	332026	R602	111,0	10234
5000	518791	R602/R600a	85,4	12306
5500	570670	R602/R600a	85,4	13538
5500	570670	R30	149	23632

Выводы

Результаты исследования показывают, что при использовании теплоты уходящих газов промышленных печей и топливо использующих агрегатов с температурой около 350°C возможна значительная выработка электроэнергии (5–10МВт и выше), при этом мощность турбины существенно зависит от свойств используемого рабочего вещества и параметров цикла.

Список литературы

1. Пятничко В. А. Утилизация низкопотенциального тепла для производства электроэнергии на компрессорных станциях / В. А. Пятничко, Т. К. Крушневич, А. И. Пятничко. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. – № 4. – С. 3–7.
2. Артеменко С. В. Выбор рабочих тел для низкотемпературных циклов Ренкина на органических веществах. II. Фторированные эфиры / Артеменко С. В., Никити Д. Н. // Холодильная техника і технологія. – 2010. – № 1 (123). – С. 6–10.
3. Редько А. А. Методы повышения эффективности систем геотермального теплоснабжения. – Макеевка: ДонНАСА, 2010. – 302 с.
4. Совершенствование клапанов горячего дутья доменных воздухонагревателей./ Шед В. И., Чирков С. Г., Брагинский А. М. и др. // – Бюл. – Черная металлургия. – М. – 2011. – № 1. – С. 62–70.
5. Влияние технического перевооружения сталеплавильного производства на энергопотребление в черной металлургии./ Сталинский Д. В., Литвиненко В. Г., Ботштейн В. А. и др. // – Экология и промышленность. – 2011. – № 1. – С. 58–63.
6. Интегрированные энергосберегающие технологии в стекольном производстве

В. Л.Товажнянский, В. М. Кошельник, В. В. Соловей и др. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – 628 с.

7. Грищенко С. Г. Энергоэффективность как доминанта развития горно-металлургического комплекса Украины./ Грищенко С. Г., Грабовский В. К. // – Экология и промышленность. – 2011. – № 3. – С. 4–9.

8. Использование вторичных энергоресурсов на металлургических предприятиях Украины. / Ботштейн В. А., Каневский А. Л., Литвиненко В. Г., Скоромный А.Л. // – Экология и промышленность. – 2011. – № 1. – С. 85–90.

HEAT RECOVERY OF EXHAUST GASES OF INDUSTRIAL FURNACES AND FUEL-USING PROCESS UNITS FOR POWER GENERATION

A. A. REDKO, Dr. Scie. Tech., Pf.

A. I. KOMPAN, graduate student

Results of numerical studies of the thermodynamic efficiency of heat recovery cycle of power generation using waste energy flue gas from using fuel assemblies and industrial furnaces with temperatures up to 350°C.

Поступила в редакцию 06.04 2012 г.
