



УДК 669.1:662.6:631.22

А.А. РЕДЬКО, докт. техн. наук, профессор, **А.И. КОМПАН**, аспирант, **С.В. ПАВЛОВСКИЙ**, аспирант
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры (ХНУСА), г. Харьков

КОГЕНЕРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА В ТЕПЛОВОЙ СХЕМЕ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Приведены результаты численного исследования термодинамической эффективности теплоутилизационных циклов выработки электроэнергии в случае применения вторичных энергоресурсов отходящих газов топливоиспользующих агрегатов и промышленных печей с температурой до 350 °С.

Ключевые слова: когенерационная установка, вторичные энергоресурсы, топливоиспользующие агрегаты, термодинамическая эффективность, теплоносители, энергоносители, циклы Ренкина.

Значительными объемами вторичных энергоресурсов (ВЭР) отходящих газов характеризуются топливоиспользующие агрегаты и печи в различных отраслях промышленности (металлургической, машиностроительной, химической, нефтегазовой, стекловаренной, це-

ментной и др.) [1–4]. Температурный потенциал отходящих газов изменяется в диапазоне 150–350 °С и выше. Наиболее существенны потери теплоты отходящих газов доменных печей (от 70 до 116 т ут. на тонну чугуна, т.е. около 15 %) [2, 3] и компрессорных станций магистраль-

ных газопроводов, ежегодный тепловой потенциал ВЭР которых составляет $3,3 \cdot 10^7$ Вт. Его использование может обеспечить выработку более 9,5 млрд кВт·час электроэнергии в год и экономию 3,1 млрд м³ природного газа.

Рост добычи мелкокусковых руд приводит к преимущественному применению агломерата в доменной шихте. Современные условия требуют от металлургических предприятий увеличения объемов производства и экономии энергоресурсов. В настоящее время технико-экономические показатели различных обжиговых конвейерных машин отличаются по удельным затратам топлива и электроэнергии в 2–2,5 раза, по удельной производительности – на 20–30 %, что свидетельствует об использовании неэффективных технических решений, конструктивных и режимных параметров [5–10, 28]. При этом в себестоимости металлопродукции цены на электроэнергию, топливо и транспорт составляют 50–55 %, причем они ежегодно увеличиваются [11].

Энергоемкость производства чугуна в Украине на 25–30 % выше, чем в странах ЕС и Китае [11]. Наиболее энергоемкое – доменное производство (до 40–60 % всего энергопотребления отрасли). Основные металлургические агрегаты – доменные и мартеновские печи, кислородные конвертеры, прокатные станы, печи обжига известняка – являются источниками топливных и тепловых ВЭР. В металлургической отрасли основное потребление природного газа приходится на доменное (40,1 %), сталеплавильное (17,3 %) и прокатное (16,1 %) производство. Доля природного газа в общих затратах энергоресурсов составляет: в доменном производстве – 18 %, мартеновском – 78 %, прокатном – 45 %. При мартеновском способе производства стали на выпуск 1 т расходуется около 100 м³ природного газа. С ростом объемов производства чугуна увеличивается использование топливных ВЭР (доменного и коксового газов): их доля в топливном балансе ТЭЦ доходит до 80–100 %. Это приводит к тому, что только около 22 % указанного газа сжигается на свече. Альтернативным решением использования топливных ВЭР могло бы стать производство электроэнергии.

Тепловые ВЭР металлургических предприятий представляют собой теплоту дымовых газов (продуктов сгорания), которая применяется для генерирования пара в котлах-утилизаторах и системах испарительного охлаждения. В общем потреблении тепловой энергии металлургических предприятий объем пара составляет 35–46 % [2, 12, 13] и практически полностью удовлетворяет их производственные и бытовые потребности. В настоящее время наметилась тенденция к снижению использования пара на 44 %, поскольку основным направлением в энергосбережении стало обеспечение металлургиче-

ских предприятий собственной тепловой и электроэнергией. За счет топливных и тепловых ВЭР предприятие может производить до 90 % электроэнергии для собственных нужд, что позволит снизить объемы закупаемых энергоносителей, вдвое уменьшить энергоемкость продукции и втрое – негативное воздействие на окружающую природную среду.

Теплота отходящих газов может использоваться (с учетом технологических ограничений, которые имеет данный метод) для подогрева воздуха или газа, подаваемого в горелочные устройства, а также для подогрева обратной сетевой воды системы теплоснабжения предприятия. Еще один способ применения теплоты отходящих газов – выработка электроэнергии для собственных нужд производства (привод вентиляторов, компрессоров, дымососов, циркуляционных насосов и т.д.). Величина расхода электроэнергии на собственные нужды определяется тепловой мощностью агрегатов и их количеством.

Широкое применение находят энергетические установки, реализующие низкотемпературный цикл Ренкина, термодинамическая эффективность которого зависит от выбора рабочего вещества цикла, эффективности теплообменного оборудования, КПД турбины и насоса [15–20]. Результаты исследований [24] показывают, что для газотурбинной установки мощностью 16 МВт при температуре пара 300 °С мощность турбины утилизационного n-пентанового цикла достигает 9,0–9,5 МВт.

В [20] приведены результаты исследования цикла Ренкина с фреоновым теплоносителем (R12) для производства электроэнергии. Источником теплоты являлся пар системы испарительного охлаждения с температурой 120 °С. Мощность опытного турбогенератора составляла 750 кВт. Использование пара системы испарительного охлаждения позволяло обеспечить до 60 % затрат электроэнергии на собственные нужды.

В настоящей работе исследуется термодинамическая эффективность циклов Ренкина с различными рабочими веществами, использующими теплоту отходящих газов промышленных печей с температурой 300–350 °С. Обжиговая конвейерная машина осуществляет упрочняющий обжиг железорудных окатышей в плотном фильтрующем слое с развитой системой газоздушных потоков и непрерывным процессом загрузки, термообработки и разгрузки окатышей. Окатыши последовательно поступают в зоны сушки, подогрева, обжига, рекуперации и охлаждения.

Тепловая схема обжиговой машины (рис. 1) включает значительное количество потребителей электроэнергии. Среди них – двигатели привода машины, дозаторы, питатели, смесители, грануляторы, дымососы, вентиляторы и другие механизмы. К примеру, мощность привода дымососа составляет 2–5 тыс. кВт.

Теплотехнические показатели обжиговой машины зависят от конструктивных и технологических решений:

- по зоне сушки;
- по зоне утилизации теплоты из зоны охлаждения в зону нагрева:
 - вентиляторная система с разбавлением теплоносителя;
 - безвентиляторная и беспереточная с переточным коллектором;
 - система с двумя и более переточными коллекторами;
- по системе отопления горно-обжиговой машины:
 - с двухпроводными турбулентными горелками;
 - с инжекционными горелками;
- по организации процесса охлаждения:
 - реверсивное охлаждение;
 - охлаждение в выносном охладителе;
 - охлаждение атмосферным воздухом;
 - комбинированное охлаждение (нагретым и атмосферным воздухом).

Потери теплоты обжиговой машины подразделяются следующим образом, % [4]:

- теплота отходящих газов – 38,3;
- потери теплоты в окружающую среду – 16,8;
- теплота металла ленты – 16,5;
- теплота испарения влаги – 11,7;
- теплота охлаждения окатышей – 8,2;
- химическая энергия на диссоциацию известняка – 4,9;
- теплота донной и бортовой «постели» – 3,6.

Исследование влияния конструктивных решений на снижение расходов топлива и электроэнергии [12, 13] показали следующее:

1. Сушки с просасыванием теплоносителя или полойной загрузкой менее эффективны по сравнению с реверсивной сушкой;
- система возврата теплоты с переточным коллектором (безвентиляторная) с точки зрения расхода топлива и электроэнергии более экономична;
- системы отопления с инжекционными горелками более эффективны, чем с двухпроводными горелками;
- охлаждение атмосферным воздухом или комбинированное охлаждение эффективнее реверсивного.

В [13] установлено, что поток, отходящий из зоны охлаждения, необходимо смешивать таким образом, чтобы теплоноситель с наиболее высокой температурой направлять в один коллектор, имеющий меньшую температуру – в другой и т.д.

Реверсирование теплоносителя в зоне охлаждения приводит к снижению удельной производительности и температурного потенциала воздуха, а также к увеличению его удельного расхода. Рост количества тепло-

ты, поступающей в зону нагрева за счет использования сбросного тепла нагретого воздуха в зоне охлаждения, достигает 7,2 %, однако это сопровождается увеличением удельного расхода электроэнергии на 68 %.

При использовании теплоты отходящих газов с температурой 180–350 °С в первой секции охлаждения необходимо учитывать, что подача нагретого воздуха приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии и снижению производительности зоны. При этом существенное значение имеет температура слоя на входе в зону охлаждения.

Эффективность процесса охлаждения зависит от температуры воздуха. Так, повышение температуры от 20 до 80 °С приводит к тому, что удельная производительность зоны охлаждения снижается на 23 %, а удельный расход электроэнергии увеличивается на 47 %. Необходимо учитывать эти факторы с целью оптимизации теплового баланса при использовании сбросного нагретого газозоудного потока с температурой 180–350 °С в секции охлаждения.

Указанные положения были учтены при разработке сотрудниками НИИМТ тепловой схемы (рис. 2), в которой газозоудный поток с температурой 350 °С из секции охлаждения подается дымососом ДЗ в секцию сушки.

В тепловой схеме по двухпоточному переточному коллектору (рис. 3) осуществляется безвентиляторная

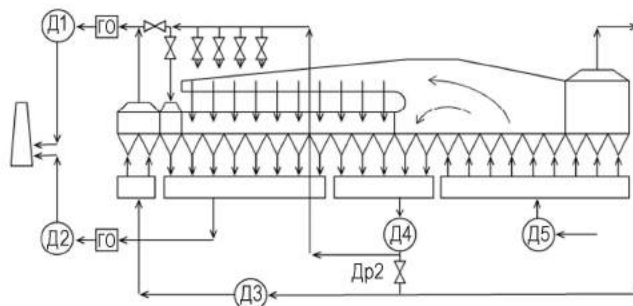


Рисунок 2 – Теплотехническая схема обжиговой машины (схема 1):

Д1–Д5 – тягодутьевое устройство (ТДУ); ГО – газоочистка

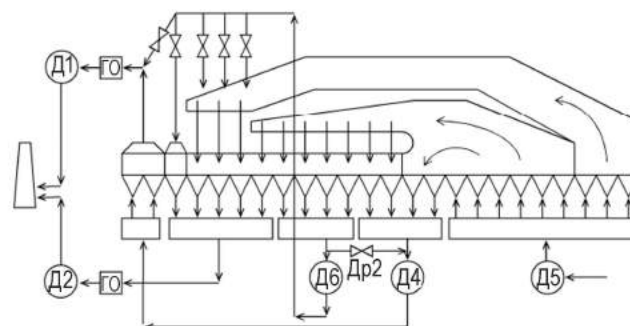


Рисунок 3 – Теплотехническая схема обжиговой машины (схема 2)



подача высокотемпературного газа в зону обжига, низкотемпературного – в зону сушки и подогрева. Однако, по мнению разработчиков, существенным недостатком такой схемы является обратная связь зон обжига и рекуперации с секцией сушки. Поэтому, используя преимущества данной тепловой схемы, в настоящей работе предложено направлять газоздушный поток от дымохода Д6 не в зоны сушки и подогрева, а на выработку электроэнергии. В зону сушки он должен поступать только после охлаждения в испарителе. Для этого канал следует снабдить теплообменником-испарителем утилизационной энергетической установки, подключенным к силовому контуру, т.е. к турбине с генератором, конденсатору и насосу. Циклы установки показаны на рис. 4.

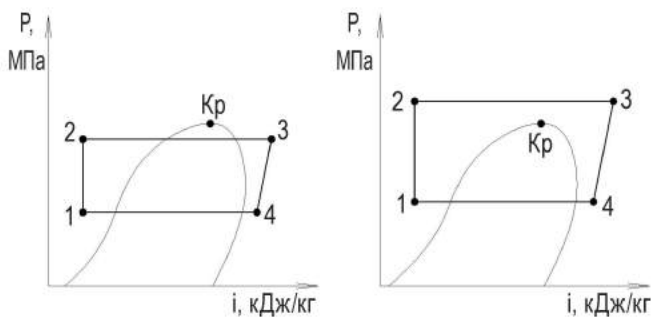


Рисунок 4 – Циклы утилизационной установки:
а – докритический; б – сверхкритический

Циклы Ренкина на органических веществах, получившие название органических циклов Ренкина, или ORC (The Organic Rankine Cycle), оказались эффективнее пароводяных циклов, благодаря чему их широко применяют в качестве новых технологий утилизации сбросной теплоты различных процессов в промышленности и сельском хозяйстве. В низкотемпературных циклах Ренкина различного назначения – геотермальных, когенерационных, утилизационных и др. – используются различные рабочие вещества, в частности пропан, бутан и их смеси, озонобезопасные хладоны R134a, R142в, R161, R170, аммиак и водоаммиачные смеси [15–26].

Исследовались одноступенчатые докритические и сверхкритические циклы. Расчеты показывают, что величина полученной максимальной электрической мощности зависит от значений давления и температуры пара рабочего вещества перед турбиной, расхода рабочего вещества, минимального температурного напора в испарителе и конденсаторе (Δt_{\min}), температуры окружающей среды (Δt_{oc}). Влияние минимального температурного перепада наиболее существенно. Так, при уменьшении (Δt_{\min}), от 10–15 К до 3–5 К выработка электроэнергии в цикле увеличивается на 20–25 %. Рост мощности турби-

ны наблюдается при увеличении внутреннего КПД турбины и насоса. Повышение КПД турбины с 70 до 85 % приводит к увеличению КПД установки с 12,2 до 14,7 %. При сезонном снижении температуры атмосферного воздуха и уменьшении температуры конденсации наблюдается увеличение мощности на 20–25 %.

Существует большое количество критериев эффективности ORC. При оптимизации параметров проектируемых энергетических установок исходят из необходимости достижения компромисса между тремя критериями – энергетическим, экономическим и экологическим. В качестве критерия эффективности рабочего вещества в настоящей работе приняты вырабатываемая мощность турбины и коэффициент утилизации теплоты в цикле, так как коэффициент тепломеханического преобразования COP (Coefficient of Performance) обозначающий отношение мощности обогрева к потребляемой мощности, изменяется незначительно при температуре до 350 °С в испарителе, 15 °С в-конденсаторе и составляет 0,12–0,15 практически для всех исследуемых рабочих веществ.

Таблица 1 – Значения удельной мощности турбины в циклах с различными органическими веществами ($t_{yx} = 350\text{ °C}$)

Рабочее вещество	$t_{кр}/P_{кр}$, °С/кПа	N, кВт/(кг/с)	η_c	η_y	$N_{н}$, 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

*сверхкритические циклы; t_{yx} – температура уходящих газов; N, $N_{н}$ – соответственно удельная мощность турбины и насоса; η_c – КПД цикла; η_y – коэффициент утилизации теплоты.

Приведенные в табл. 1 результаты показывают, что при температуре отходящих газов 350 °С в силовом цикле Ренкина эффективными являются рабочие вещества с критической температурой выше 200 °С – хладоны R30, R113, R141, R601a, R602. Смеси органических веществ (например, R600a/R141в; R600a/R161; R600a/R602 и др.) с $t_{кр} < 200\text{ °C}$ при повышении температуры до 350 °С становятся менее эффективными, в связи с чем выработка электроэнергии в цикле снижается.

Применение когенерационных установок в тепловых схемах обжиговой машины ОК-324/336 путем подачи газозвдушного потока с температурой 350 °С и расходом 213000 м³/час в испаритель когенерационной установки может обеспечить выработку 10600–10900 кВт мощности, которую можно использовать для собственных нужд – привода обжиговой машины, дымососов, вентиляторов и другого оборудования.

В качестве примера выполнены расчеты вырабатываемой электроэнергии для доменных печей различного объема (табл. 2). Результаты показывают, что рост мощности связан с увеличением потенциала тепловых ВЭР. Для печи объемом 1030 м³ выработка мощности составляет около 4440 кВт, а для печи объемом 5500 м³ – от 13,5 до 23,6 МВт (в зависимости от рабочего вещества цикла).

Таблица 2 – Значения вырабатываемой мощности турбины при использовании различного потенциала тепловых ВЭР доменных печей при $t_{ух} = 350$ °С

Объем печи, м ³	Объем отходящих 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 показали, что применение теплоты отходящих газов промышленных печей и топливоиспользующих агрегатов с температурой около 350 °С позволяет вырабатывать значительное количество электроэнергии (5–10 МВт·час и выше). При этом мощность турбины существенно зависит от свойств используемого рабочего вещества и параметров цикла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние технического перевооружения сталеплавильного производства на энергопотребление в черной металлургии / Д.В. Сталинский, В.Г. Литвиненко, В.А. Ботштейн, Т.А. Андреева, А.Л. Скоромный // Экология и промышленность. – 2011. – № 1. – С. 58–65.
2. Использование вторичных энергоресурсов на металлургических предприятиях Украины / В.А. Ботштейн, А.Л. Каневский, В.Г. Литвиненко, А.Л. Скоромный // Экология и промышленность. – 2011. – № 1. – С. 85–90.
3. Колобков, П.С. Использование тепловых вторичных энергоресурсов в теплоснабжении / П.С. Колобков. – Х. : Основа, 1991. – 222 с.
4. Грищенко, С.Г. Энергоэффективность как доминанта развития горно-металлургического комплекса Украины / С.Г. Грищенко, В.К. Грабовский // Экология и промышленность. – 2011. – № 3. – С. 4–9.
5. Коротич, В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке / В.И. Коротич. – М. : Металлургия, 1978. – 207 с.
6. Коротич, В.И. Агломерация рудных материалов / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУУПИ, 2003. – 400 с.
7. Сулименко, Е.И. Производство окатышей / Е.И. Сулименко. – М. : Металлургия, 1988. – 129 с.
8. Производство агломерата. Технология, оборудование, автоматизация / В.П. Шилкин, Д.Н. Доронин ; под ред. Г.А. Шалаева. – Екатеринбург : УЦПР и рекламы, 2004. – 292 с.
9. Мищенко, И.М. Развитие агломерации – основное направление энергосбережения и повышения эффективности в доменном производстве / И.М. Мищенко, Н.С. Хлапонин // Металл и литье Украины. – 2006. – № 3–4. – С. 11–15.
10. Теплотехника окусковывания железорудного сырья / С.Г. Братчиков, Ю.А. Берман, Я.Л. Белоцерковский и др. – М. : Металлургия, 1970. – 344 с.
11. Энергопотребление при агломерации / Я.Л. Белоцерковский, В.И. Клейн, Л.И. Леонтьев и др. – Екатеринбург : УРО РАН, 1998. – 57 с.
12. Сравнительный анализ теплотехнических схем современных обжиговых конвейерных машин / Н.Н. Колоть, А.Б. Воробьев, С.С. Гончаров, А.А. Буткарев, А.П. Буткарев // Сталь. – 2010. – № 3. – С. 8–13.
13. Буткарев, А.А. Исследование и оптимизация теплотехнических схем обжиговых конвейерных машин и режимов термообработки железорудных окатышей : автореферат дис. ... докт. техн. наук / Буткарев А.А. – Екатеринбург, 2012. – 40 с.
14. Голышев, А.М. Резервы использования теплоты промышленных выбросов для нужд коммунального хозяйства Кривбасса / А.М. Голышев, С.И. Задорожный, А.В. Герасимчук // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. – К. : КНУБА, 2011. – Вип.15. – С. 66–70.



15. Анализ когенерационных установок. Ч. 1. Классификация и основные показатели / Б.И. Басок, Е.Г. Базеев, В.М. Диденко, Д.А. Коломейко // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 3. – С. 83–89.
16. Анализ когенерационных установок. Ч. 2. Анализ энергетической эффективности / Б.И. Басок, Д.А. Коломейко // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 4. – С. 79–83.
17. Степаненко, В. Реконструкция промышленной энергетики Украины в 21 веке / В. Степаненко // ЭСКО : электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2005. – № 7.
18. Долинский, А.А. Эффективность когенерационных тепловых схем / А.А. Долинский, Б.И. Басок, Д.А. Коломейко. – К. : ИТТР, 2008. – Т. 61, Вып. 4в. – С. 30–38.
19. Барков, В.М. Когенераторные технологии: возможности и перспективы / В.М. Барков // ЭСКО : электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2004. – № 7.
20. Клименко, В.Н. Использование технологии глубокой утилизации тепла уходящих газов в когенерационных схемах / В.Н. Клименко, А.В. Збарщенко // Наукові праці МДГУ ім. П. Могили. – 2006. – Т. 61, вип. 48. – С. 207–208.
21. DiPippo, R. Geothermal Power Plants: Principles, Applications and Case Studies. – Oxford OX51GB, UK, 2005. – 450 с.
22. Алхасов, А.Б. Геотермальная энергетика : проблемы, ресурсы, технологии / А.Б. Алхасов. – СПб. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с.
23. Редько, А.А. Методы повышения эффективности систем геотермального теплоснабжения / А.А. Редько. – Макеевка : ДонНАСА, 2010. – 302 с.
24. Пятничко, В.А. Утилизация низкопотенциального тепла в энергетических установках с органическими теплоносителями / В.А. Пятничко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 5. – С. 10–14.
25. Артеменко, С.В. Выбор рабочих тел для низкотемпературных циклов Ренкина на органических веществах. II Фторированные эфиры / С.В. Артеменко, Д.Н. Никитин // Холодильна техніка і технологія. – 2010. – № 1 (123). – С. 6–10.
26. Редько, А.А. Рациональные термодинамические параметры циклов многоступенчатой геотермальной станции / А.А. Редько // Проблемы машиностроения. – ИПМаш НАНУ, 2010. – Т. 13, № 4. – С. 76–82.
27. Зысин, В.А. Комбинированные парогазовые установки и циклы / В.А. Зысин. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 185 с.
28. Бережний, М.М. Збагачення та окускування сировини : монографія / В.П. Мовчан; під ред. М.М. Бережного. – Д. : Пороги, 2002. – 365 с.

Поступила в редакцию 15.04.2013

Наведено результати чисельного дослідження термодинамічної ефективності теплоутилізаційних циклів вироблення електроенергії у разі застосування вторинних енергоресурсів відведених газів паливовикористовуючих агрегатів і промислових печей з температурою до 350 °С.

Results of numerical study of thermodynamic efficiency of heat recovery cycles of power generation at using waste energy of spent gas of fuel-used plants and industrial furnaces with temperatures up to 350 °C are given.