

Л. Е. РОВИН, А. В. ТКАЧЕНКО,
ГГТУ им. П.О. Сухого, С. Л. РОВИН, БГПА

РЕКУПЕРАЦИЯ ТЕПЛА ТОПЛИВНЫХ ПЕЧЕЙ

УДК 621.74

Использование вторичных энергоресурсов (ВЭР), к которым относятся высокотемпературные отходящие газы топливных печей, является актуальной задачей.

При сжигании кокса в вагранках с отходящими газами теряется до 40—50% тепловой энергии в виде физического (10—15%) и так называемого химического (скрытого) тепла (30—35%). Первое определяется температурой газов после выхода из слоя шихты, которая равна 200—350 °С, второе — концентрацией CO, которая колеблется в пределах 12—18%. В нагревательных печах различного типа, работающих на природном газе, отходящие газы имеют температуру, близкую к температуре нагреваемого тела (заготовки), т. е. от 750 до 1300 °С. При этом термический к. п. д. составляет от 7 до 30%. На

The article gives analysis of the operation efficiency of various foundry furnaces, in particular, the cupola and forging furnaces. It studies heat balances of the furnaces and possible application of secondary power resources (SPR) — exhaust gases heat. It gives evaluation of the cupola and heating furnace SPR exergy with study and presentation of the most rational variants of solutions providing for the SPR minimization.

рис. 1, 2 представлены примерные тепловые балансы вагранки и нагревательной печи для кузнечных заготовок.

Эффективность использования ВЭР и термический к. п. д. установки определяются, как правило, методом баланса тепловой энергии без учета качества полученной энергии. Более точной оценкой качества теплоносителей с точки зрения их последующего использования является эксергия и соответственно эксергетический к. п. д. Понятие эксергии вытекает из второго закона термодинамики:

$$B = I - TdS, \quad (1)$$

где I — энтальпия; S — энтропия.

Эксергия — способность энергии осуществить полезную работу относительно энергетического уровня среды

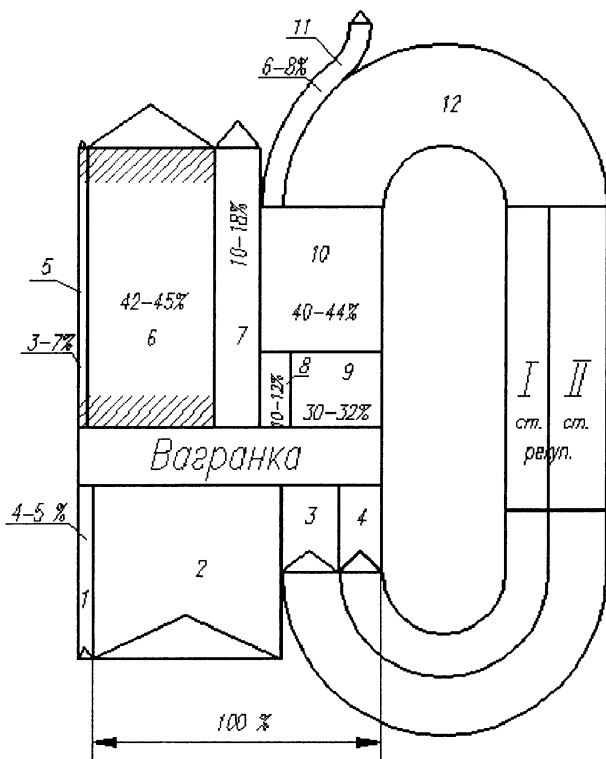


Рис. 1. Баланс тепловой энергии вагранки: 1 — 4 — приход тепла (1 — реакции окисления; 2 — кокс; 3, 4 — горячий воздух после I и II ступени рекуператора); 5 — 12 — расход тепла (5 — шлак; 6 — металл; 7 — потери в окружающую среду; 10 — тепло отходящих газов, в том числе: 8 — физическое; 9 — химическое; 11 — газы после рекуператора; 12 — тепло, утилизируемое в рекуператоре). Расход кокса при холодном дутье 15% (3,6 млн кДж/т)

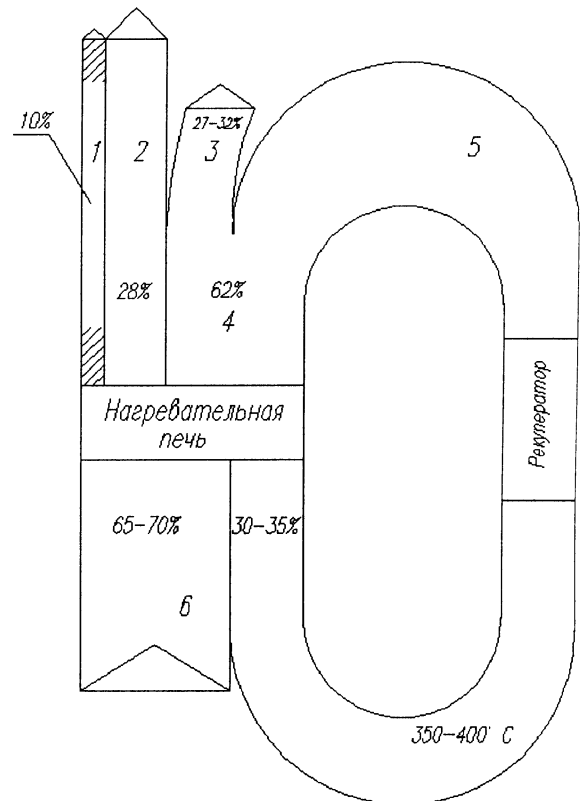


Рис. 2. Тепловой баланс нагревательной печи: 1 — нагрев заготовки; 2 — потери в окружающую среду; 3 — тепло отходящих газов после рекуператора; 4 — тепло отходящих газов из печи; 5 — тепло, утилизируемое в рекуператоре; 6 — природный газ

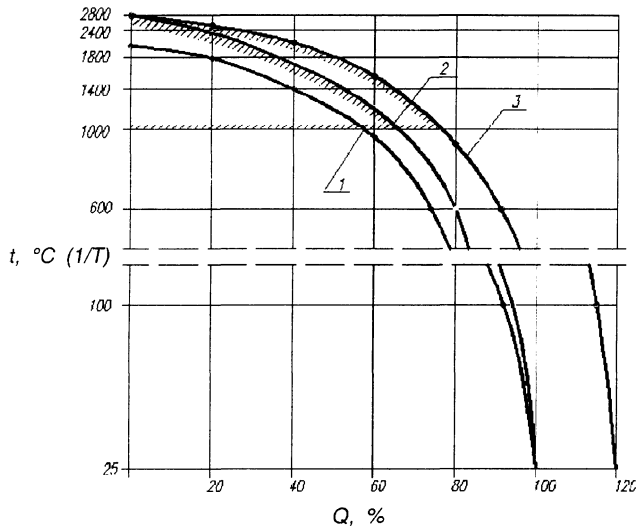


Рис. 3. Диаграмма эксергии тепла: 1 — для продуктов сгорания кокса; 2 — то же при кислородном (26,2%) дутье; 3 — то же при подогреве до 500 °С

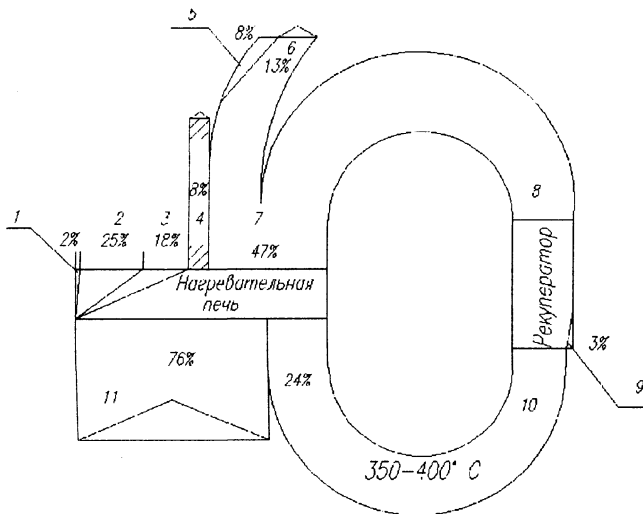


Рис. 4. Баланс эксергии нагревательной печи: 1 — потери при теплопередаче; 2 — потери в окружающую среду; 3 — потери в камере печи; 4 — эксергия заготовки; 5 — потери эксергии с продуктами сгорания; 6 — отходящие газы после рекуператора; 7 — отходящие газы на выходе из печи; 8 — эксергия газов в рекуператоре; 9 — потери в рекуператоре; 10 — эксергия горячего дутья; 11 — приход тепла от сжигания топлива

[1]. Изменение эксергии системы при температурном переходе от T_1 к T_2 равно:

$$\Delta B = \Delta Q T_0 \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right), \quad (2)$$

где ΔQ — количество тепловой энергии или энтальпия системы; T_0 — температура окружающей среды или базовая температура процесса.

Одно и то же количество тепла ΔQ при разных температурных уровнях будет иметь разную «работоспособность». Полезность для принятия оптимальных инженерных решений эксергетического анализа можно оценить на примере оценки эффективности различных методов интенсификации ваграночной плавки (рис. 3). Для удоб-

ства пользования на диаграмме $\left(\frac{1}{T} - Q \right)$ по оси ординат указаны не значения $1/T$, а соответствующие им величины T . Кривая 1 соответствует сжиганию кокса при номинальном расходе кокса 15%, кривая 2 — при обогащенном на 20% дутье ($O_2 = 26,2\%$), кривая 3 — при подогреве дутья на 500 — 550 °С.

Как следует из диаграммы, эффективность теплообменных процессов при использовании вариантов 2 и 3 сопоставима только в наиболее высокотемпературной зоне, где расходуется 10—15% тепла. При расширении

диапазона температур от 2800 до 1000 °С величина $\frac{\Delta B}{T_0}$

(площадь диаграммы между Q и $(Q + \Delta Q)$ и соответствующими значениями T_1 и T_2), характеризующая энергию, заметно различается (рис. 3), хотя затраты на осуществление этих процессов и максимальные температуры примерно равны. Отсюда следует, что кислородное дутье полезно в основном для повышения температуры перегрева чугуна, что подтверждено практикой и менее эффективно для повышения производительности плавки и экономии топлива. Подогрев дутья повышает эффективность теплообменных процессов во всех зонах печи.

Значение понятия энергии хорошо иллюстрируется анализом процесса дожигания ваграночных газов. Неорганизованный подсос воздуха через завалочное окно в количестве, как правило, в 2,0—2,5 раза превышающем стехиометрическое, энтальпию газов не уменьшает (строго говоря, даже несколько увеличивает), а эксергию уменьшает. Избыточный подсос приводит к сокращению доли используемой энергии в рекуператоре: из-за уменьшения температуры газов нагрев дутья снижается, возникает срывы горения, увеличивается сопротивление и т. п.

Прирост эксергии при сжигании топлива на горячем дутье выше, чем собственно эксергия, внесенная подогретым воздухом, что связано с повышением температурного «напора» $\Delta T = T - T_m$, где T_m — температура рабочего тела [2].

Пример составления баланса эксергии представлен на рис. 4. Параметры работы печи те же, что и на рис. 2.

Существует несколько способов утилизации тепла отходящих газов: рекуперация, подогрев воздуха для технологических целей или отопления цеха, нагрев воды для бытовых нужд. Каждый из них имеет свои особенности и технические средства, выбор определяется экономическими показателями и конкретными заводскими условиями. В первом приближении можно считать, что с помощью воздухоподогревателей можно использовать 60—70% тепла отходящих газов, охладив их таким образом до 80—100 °С на выходе. Водоподогреватели (экономайзеры) позволяют получать несколько большую эффективность утилизации тепла — до 70—75%. Вместе с тем использование воздухоподогревателей носит сезонный характер, а установки воды требуют ресиверов, компенсирующих несинхронность подачи и потребления воды.

Использование горячего воздуха для других технологических агрегатов, например для сушки песка, стержней и т. п., предполагает параллельный режим работы и умень-

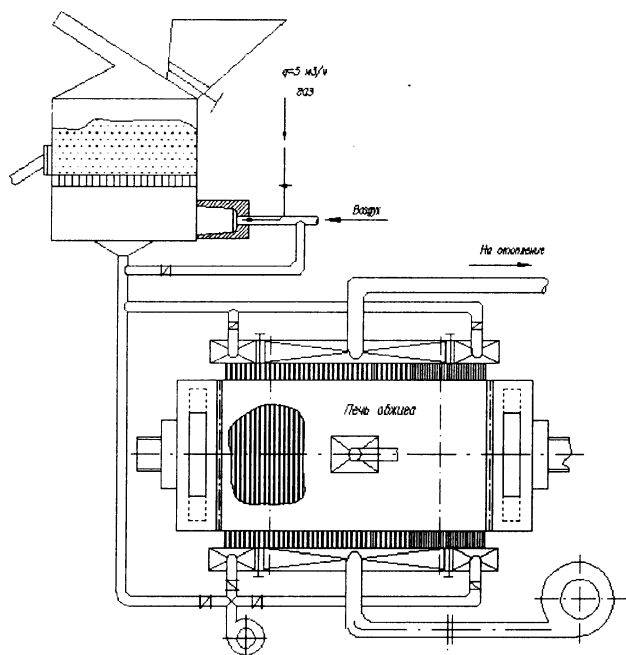


Рис. 5. Комбинированная схема использования ВЭР для отопления и технологических нужд цеха

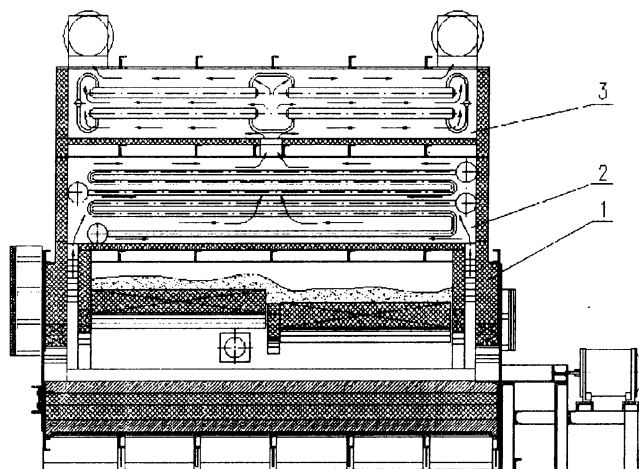


Рис. 6. Схема установки рекуператора и водоподогревателя (экономайзера) на нагревательной печи: 1 — нагревательная печь; 2 — рекуператор; 3 — водоподогреватель (экономайзер)

шает маневренность оборудования. Как правило, в подобных случаях необходимо сохранять альтернативные источники тепла: газовые горелки, электронагреватели и т. п.

Более рациональным является объединение подобных систем (рис. 5), что позволяет использовать ВЭР круглый год и получить дополнительный эффект за счет технологических факторов.

Рекуперация (возврат) части тепловой энергии в печь сохраняет автономность печной установки и позволяет существенно улучшить ее технологические характеристики, хотя термический к. п. д. рекуператора при высокотемпературном подогреве дутья ниже, чем в первых случаях.

Рекуператоры нагревательных газовых печей выполняются, как правило, в виде конвективных трубчатых теплообменников. При температуре отходящих газов 750—850 °С такие рекуператоры позволяют получить необхо-

димое для горения газа количество воздуха, подогретого до 350—450 °С. Коэффициент теплоотдачи k в них зависит в основном от направления потоков и режима движения дымовых газов. При противотоке и скорости 12—15 м/с $k = 15—20$ Вт/(м²·К), прямотоке — 10—12 и перекрестном движении $k = 12—18$ Вт/(м²·К).

Как показала практика, оребрение труб с целью увеличения площади поверхности теплообмена ($Q = \alpha \Delta t_{\Delta} F$) в данных случаях не дает ощутимого эффекта, так как отвод тепла теплопроводностью через малую площадь контакта тонкого ребра с телом трубы затруднен

$$\left(Q = \frac{\lambda}{S} \Delta t_{\Delta} f_k \right).$$

Здесь α — коэффициент конвективного теплообмена; Δt_{Δ} — разность температур газа и пластины; F — площадь поверхности пластины; λ — теплопроводность; Δt — разность температур пластины и трубы; S — половина высоты пластины; f_k — площадь контакта пластины с трубой. В результате пластины оребрения перегреваются, коробятся, тем самым f_k уменьшается еще более. Загрязнение поверхности теплообменных труб пылью и сажей в результате термопреципитации (осаждения на холодных поверхностях вследствие термодиффузии) при сжигании природного газа незначительно. Так, на Белорусском металлургическом заводе рекуператор из гладких стальных труб на методической печи успешно работает, нагревая дутье до 300—350 °С, в течение 12 лет без очистки поверхностей теплообмена.

Использование лучистой составляющей в рекуператорах газовых печей нецелесообразно. Во-первых, подогрев дутья выше 400—450 °С может привести к преждевременному воспламенению смеси, уменьшению длины факела и одновременно повышению его температуры, что соответственно требует изменения потоков в рабочей зоне печи и повышения термостойкости огнеупоров. Кроме того, массовый расход воздуха уменьшается за счет нагрева в 2,5 раза, что вызывает необходимость увеличения скорости подачи дутья.

При внедрении рекуператоров на печах, использующих инжекционные горелки, необходимо предусматривать замену последних на двухпроводные с соответствующим автоматическим регулированием.

Глубокой утилизации ВЭР можно добиться, дополнив рекуператор водоподогревателем (экономайзером) (рис. 6).

Печи, работающие на твердом топливе, например коксовые вагранки, при рекуперации тепла не имеют технологических ограничений по температуре нагрева дутья. Поэтому в мировой практике широко используются как одноступенчатые (низко- и среднетемпературные), так и двухступенчатые рекуператоры с нагревом дутья до 550—750 °С. Основные трудности при использовании рекуператоров на вагранках — высокая запыленность отходящих газов (до 3—6 г/м³ и в отдельные периоды до 10 г/м³), а также наличие горючих компонентов (12—18% СО).

Существуют две основные схемы рекуперации. Первая предполагает отбор ваграночных газов ниже уровня завалки на 1,5—2,0 м, тем самым, предотвращая подсос

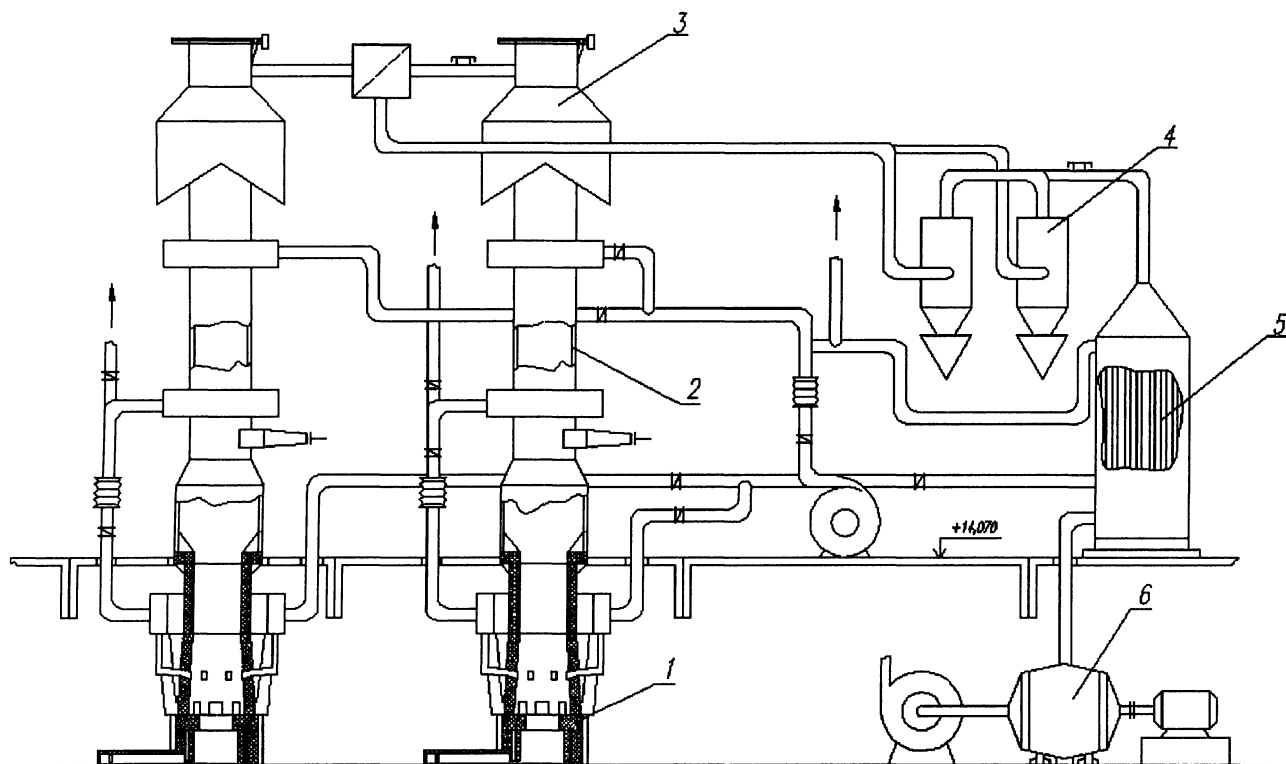


Рис. 7. Схема установки двухступенчатого подогрева ваграночного дутья: 1 — вагранка ($Q = 15 \text{ т/ч}$); 2 — радиационный рекуператор; 3 — сухой пылесуловитель; 4 — циклон; 5 — конвективный рекуператор; 6 — мокрый фильтр

воздуха и образование взрывоопасной смеси с CO . Газы охлаждаются, очищаются от пыли, затем поступают в топку рекуператора, где подогреваются и сжигаются. Такая система требует быстродействующей и надежной автоматизации плавки, в том числе контроля уровня шихты и состава отходящих газов, герметизации завалки и др.

По второй схеме ваграночные газы сжигаются в трубе вагранки, в которую встраивается радиационный щелевой рекуператор, а затем газы отводятся во вторую ступень подогрева, где устанавливается радиационный трубчатый рекуператор. На выходе газы дополнительно очищаются в скрубберах или мокрых фильтрах (рис. 7). Первая ступень может использоваться автономно, в этом случае для очистки применяется мокрый пылеуловитель, а дымосос не требуется. Радиационный рекуператор выполняется двухходовым и дает возможность нагревать дутье до $300\text{--}350^\circ\text{C}$. Простота и надежность такой системы позволяют использовать ее на любых действующих вагранках открытого типа. Изготовить такой рекуператор можно силами завода.

Для уменьшения отложений пыли на теплообменных поверхностях конвективный рекуператор выполняется из вертикальных кольцевых труб, внутри и снаружи омываемых дымовыми газами. Такая конструкция обеспечивает высокую удельную площадь и возможность периодической очистки путем продувки сжатым воздухом.

Расчет рекуператоров в настоящее время производится методом теплового баланса по стационарной схеме. Как показала практика, это приводит к погрешностям на уровне 25%. Точное решение возможно путем совместного решения системы уравнений Фурье—Кирхгофа, Навье—

Стокса и сплошности с граничными условиями на стороне дымовых газов и воздуха. Уравнения баланса тепла рассматриваются как дополнительное условие. Температура стенки может при этом рассчитываться исходя из соотношения коэффициентов конвективного теплообмена.

Высокая экономическая эффективность применения рекуператоров на вагранках обусловлена не только сокращением расхода импортного кокса (~ 130 долл/т), но и улучшением параметров плавки. Температура чугуна повышается примерно на 20°C на каждые 100°C подогрева, улучшается качество металла за счет интенсификации металлургических процессов в системе металл — шлак, снижается количество серы и т. п., улучшается ход плавки. Кроме того, утилизация ВЭР уменьшает выбросы в окружающую среду, т. е. имеет и экологический эффект.

ГГТУ им. П. О. Сухого и УНПП «Технолит» разработали ряд конструкций теплообменных установок (рекуператоров, воздухо- и водоподогревателей) как для вагранок производительностью от 5 до 15 т/ч, так и для нагревательных печей различного типа (рис. 5—7). Подобными системами могут оснащаться действующие агрегаты без длительной остановки на модернизацию. Окупаемость затрат на внедрение систем рекуперации и утилизации тепла ВЭР, как правило, не превышает 0,5—1 года даже при условии использования легированных жаростойких сталей в высокотемпературных рекуператорах.

Литература

1. Глинков М. А., Глинков Г. М. Общая теория печей. М.: Металлургия, 1978.
2. Шаргут Я. Теплоэнергетика в металлургии. М.: Металлургия, 1976.