



*Heat recovery is an effective method of shortening specific energy consumption. New constructions of recuperators for heating and cupola furnaces have been designed and successfully introduced. Two-stage recuperator with computer control providing blast heating up to 600 °C and reducing fuel consumption by 30% is of special interest.*

С. Л. РОВИН, УП «ТЕХНОЛИТ», Л. Е. РОВИН, А. В. ТКАЧЕНКО, ГГТУ им. П. О. СУХОГО

УДК 621.74

## РЕКУПЕРАЦИЯ ТЕПЛА

Рекуперация тепла отходящих газов топливных печей – наиболее эффективный метод энергосбережения. Возврат в печь тепловой энергии, теряемой с отходящими газами, является не только средством повышения термического к. п. д., но и улучшает технологические и экологические характеристики агрегата. Горячее дутье повышает производственную гибкость печей, что, конечно, реализуется при соответствующем уровне информационных технологий: развитой системе КИПиА, компьютерном управлении, квалифицированном персонале.

Рекуператоры нашли широкое применение на нагревательных печах различной мощности, в первую очередь отапливаемых природным газом. Отходящие газы в этом случае имеют сравнительно низкую запыленность, высокую температуру, низкие концентрации горючих компонентов и стабильный режим. Требования к нагреву дутья в нагревательных печах, как правило, не превышают 350–400 °С, безопасность системы рекуперации обеспечивается отсутствием либо минимальными количествами CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и сажи. Это обстоятельство исключает необходимость в дожигании

газов и сооружений камер горения. Как правило, рекуператоры для нагревательных печей устанавливаются вне рабочего пространства печи, например на крыше (своде), что облегчает их обслуживание и ремонт. Все это позволяет успешно использовать конвективные металлические трубчатые теплообменники.

Конечно, любые рекуператоры – достаточно сложные теплотехнические устройства и при их разработке необходимо решать не только задачи интенсивности теплообмена, но и температурной компенсации, герметизации, термопреципитации (отложения пыли на холодной поверхности) и последующей очистки, надежности и техобслуживания, безопасности и т. д. В связи с этим разработаны различные конструкции рекуператоров, адаптированных к конкретным условиям и характеристикам печей. Достаточно универсальным является блочный трубчатый рекуператор, разработанный УП «Технолит» и ГГТУ им. П. О. Сухого (рис. 1), на основе длительных исследований и опыта производственной эксплуатации рекуператоров различной конструкции на нагревательных печах наиболее распространенных типов.

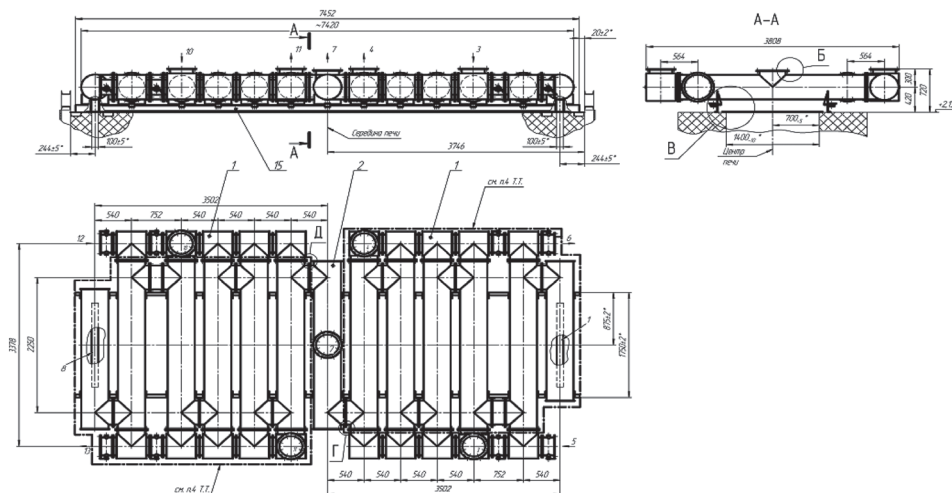


Рис. 1. Блочный трубчатый рекуператор

Блочная конструкция позволяет за счет изменения схемы соединения унифицированных блоков последовательно, параллельно, комбинированно, горизонтально, вертикально и т. п. создавать различные варианты рекуператоров, отличающиеся по производительности и температуре нагрева дутья, одновременно снимать с теплообменника воздух, нагретый до разных температур, варьировать режимы нагрева путем переключения блоков или секций, а также переключения схемы нагрева: противоток, прямоток и их комбинации.

Использование тепла отходящих газов плавильных агрегатов значительно сложнее из-за экстремальных и постоянно изменяющихся режимных и физико-химических параметров отходящих газов. Наиболее актуальной с точки зрения ресурсосбережения и в то же время сложной является рекуперация тепла в вагранках, которые, как показывает мировая практика, не только конкурентоспособные, но и вполне перспективные плавильные агрегаты для плавки чугуна, минерального расплава, выплавки ряда цветных металлов. Современные комплексные ваграночные установки полностью автоматизированы плавильными агрегатами непрерывного действия с компьютерным управлением, надежной системой пылегазоочистки, обеспечивающими заданную производительность и качество жидкого металла (материала), с устойчивым рабочим процессом (с положительным коэффициентом самовыравнивания) и т. п., позволяющими получать расплав с минимальной по сравнению с электропечами себестоимостью. Конечно, экономичность ваграночной плавки зависит от соотношения цен на энергоносители и термического к. п. д. (т. к. п. д.) агрегата.

До настоящего времени в нашей стране, странах СНГ и большинстве государств дальнего зарубежья стоимость ед. тепловой энергии, полученной от сжигания топлива, в том числе и самого дорогого вида – кокса, значительно ниже полученной от трансформации электроэнергии, особенно производимой на топливных электростанциях.

В вагранках холодного дутья т. к. п. д. не превышает 35–40%, что является для топливных печей хорошим показателем в сравнении с 25–30% теплоэлектростанций или 15% нагревательных печей. Вместе с тем, отходящие газы уносят из вагранок в виде физического (высокая температура) и химического (наличие горючих компонентов) тепла до 40% от общего количества энергии, полученной при сжигании топлива. Использование хотя бы половины этого количества позволило бы сократить расход топлива (кокса) не менее чем на 30%. При этом на 1 т выплавляемого чугуна в ва-

гранках холодного дутья расходуется 120–160 кг кокса при условии качественной шихты и кокса, а при низком качестве исходных материалов расход кокса возрастает до 170–200 кг. Таким образом, очевидна значимость рекуперации как приоритетного средства ресурсосбережения для ваграночной плавки. При этом эффективность рекуперации, в конечном счете, определяется температурой подогрева дутья. В шахтных печах, к которым относятся вагранки, температура подогрева дутья напрямую коррелируется с основными показателями плавки: прежде всего, с температурой расплавов – металла и шлака. Опыт свидетельствует, что на каждые 100 °С подогрева дутья температура жидкого чугуна на желобе вагранки при прочих равных условиях повышается в среднем на 15–20 °С. Как правило, в вагранках стремятся довести нагрев дутья до уровня 500–600 °С. В домнах нагрев доводят до 1000–1500 °С, однако это приводит к резкому удорожанию воздухонагревателей и системы подачи дутья.

При горячем ходе вагранки уменьшаются потери кремния и марганца на угар, окисление железа, пригар серы, что способствует повышению качества металла даже при некотором снижении качества исходных шихтовых материалов. Режим плавки становится более ровным, фурмы чистыми, настыли, особенно в области фурм, не образуются. В результате более интенсивных теплообменных процессов увеличивается производительность печей. Вагранка становится более мобильной, чувствительной к управляющим воздействиям, в том числе к изменениям в расходе дутья, режима загрузки, соотношению топливо – дутье. Эти бесспорные преимущества являются стимулом к активным поискам технических решений, позволяющих обеспечить высокотемпературный подогрев дутья и надежную работу рекуператоров.

Ваграночные газы, выходящие из слоя шихты, имеют температуру 250–350 °С, таким образом, физическое тепло ваграночных газов не может обеспечить высокотемпературного нагрева. 80% энергии, которую несут отходящие газы, приходится на «химическое» тепло, которое выделяется при дожигании СО (угарного газа). При сгорании СО температура дымовых газов повышается до 1000–1100 °С, что дает возможность довести температуру дутьевого воздуха в теплообменнике до уровня 500–600 °С.

Однако задача осложняется высокой запыленностью ваграночных газов: от 5 до 15 г полидисперсной пыли на 1 м<sup>3</sup>. При работе на таких запыленных газах теплообменные поверхности быстро

покрываются пылью: за 1 смену образуется корка (гарнисаж) толщиной 2–3 мм. Тепловое сопротивление корки в 5–10 раз выше, чем у металлической стенки, соответственно снижаются теплопередача от дымовых газов нагреваемому воздуху и эффективность работы рекуператора.

В таких условиях единственной альтернативой является применение радиационного рекуператора, выполненного из жаростойкой хромоникелевой стали, например 12Х18Н10Т, которая имеет оптимальное сочетание служебных свойств, включая низкую адгезионную способность по отношению к ваграночной пыли.

Для обеспечения максимальной передачи тепла разработана и апробирована конструкция двухходового щелевого рекуператора, встроенного в шахту (трубу) вагранки. Пример установки такого рекуператора на вагранке производительностью 15 т/ч показан на рис. 2. Холодный воздух поступает во внешнее кольцо (щель) между наружной и промежуточной обечайками и движется снизу вверх. Затем разворачивается вниз и движется вниз по внутреннему кольцу по схеме противоток – навстречу дымовым газам. Несущей конструкцией рекуператора служит корпус самой вагранки. Холодный воздух в первой щели нагревается примерно до 100 °С, во второй – до 350–400 °С. Сум-

марная толщина двухходового теплообменника составляет около 200 мм, что позволяет встраивать его вместо футеровки выше завалочного окна. Высота рекуператора, необходимая для нагрева дутья до названных температур, составляет 12–15 м, что также соответствует высоте трубы.

Образующийся гарнисаж на гладкой внутренней поверхности рекуператора при температурных колебаниях дымовых газов, что характерно для работы вагранок, отслаивается и «слущивается» с поверхности обечайки. Натурные испытания показали, что такое динамическое равновесие – нарастание до 2–3 мм и отслаивание гарнисажа обеспечивают длительную эксплуатацию рекуператора при сохранении стабильных теплотехнических характеристик.

Единственным необходимым условием эффективности является высокая температура теплоносителя.

Дымовые ваграночные газы при горении достигают температуры 1000 °С и более, но режим и характеристики газов, выходящих из слоя шихты, являются нестабильными. Примерно 40–60% времени плавки газы не горят.

Для того чтобы стабилизировать дожигание газов внутри рекуператора и, следовательно, температуру нагрева дутья, были проведены исследо-

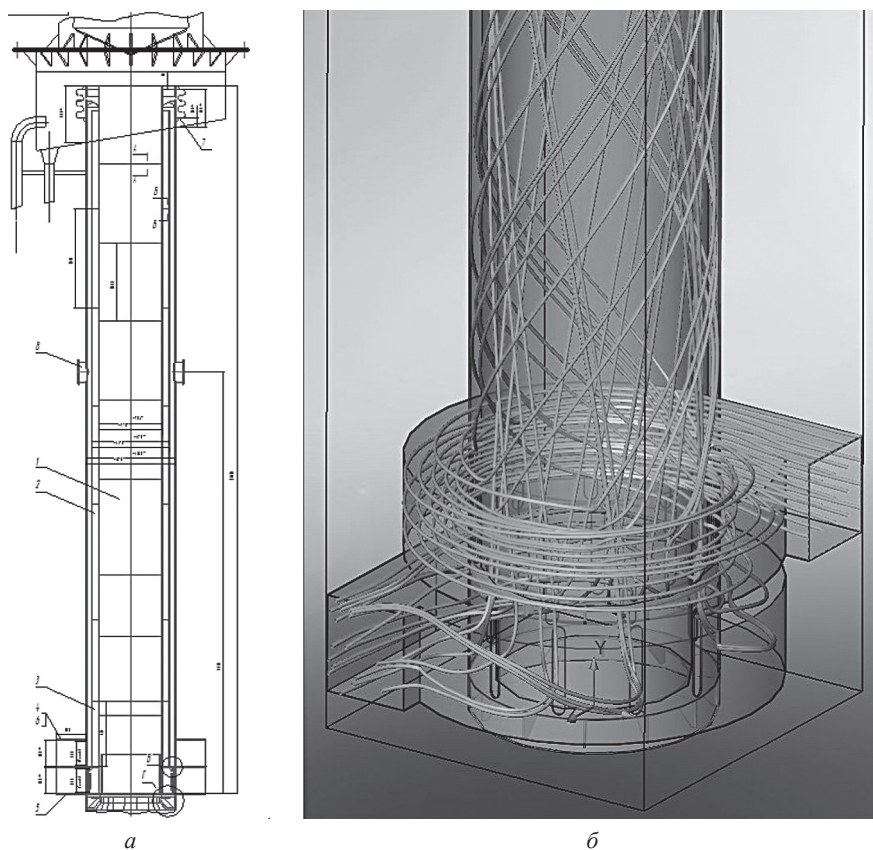


Рис. 2. Радиационный рекуператор для вагранки открытого типа: а – общий вид рекуператора, встроенного в вагранку 15 т/ч; б – траектории течения воздуха в рекуператоре

вания процессов горения газов с учетом физико-химических и режимных параметров, а затем предложена схема расчета процесса, разработанная на основе тепловой теории горения.

Модель, как и сам реальный процесс, условно включает в себя две части: диффузионную и термо-химическую, состоящую из воспламенения и непосредственно горения с учетом теплоотвода. Причем последняя рассчитывается по одномерной схеме, характерной для горения в трубах.

Для первой части – стадии смешивания природного газа с воздухом ( $\frac{d\varphi}{d\tau} = 0$ ) время пребывания и длина пути смешивания – расстояние, которое проходят газы до воспламенения, определяются по безразмерным уравнениям теплопередачи излучением и конвекцией:

$$\tau_{nk} = \frac{0,25}{\sigma\theta_M^3} \left[ \ln \frac{(\theta_M + \theta)(\theta_M - \theta_0)}{(\theta_M - \theta)(\theta_M + \theta_0)} + 2 \left( \arctg \frac{\theta}{\theta_M} - \arctg \frac{\theta_0}{\theta_M} \right) \right],$$

$$\xi = \frac{k_0 x}{\omega_0} = \frac{0,25}{\sigma\theta_0\theta_M^2} \ln \frac{(\theta_M^2 + \theta^2)(\theta_M^2 - \theta_0^2)}{(\theta_M^2 - \theta^2)(\theta_M^2 + \theta_0^2)}.$$

При этом рассматривается нагрев поступающей в зону воспламенения газозвушной смеси от горящего факела за счет излучения и конвекции.

Безразмерная координата  $\xi$  определяет и место установки горелок для поджигания газов – высоту трубы вагранки.

Далее в зоне горения ( $\frac{d\varphi}{d\tau} \neq 0$ ) расчет проводили по выражениям:

$$\varphi = 1 - e^{-\int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{(\tau_{\partial k} + e^{1/\theta})\sigma(\theta_M^n - \theta^n)}},$$

$$\tau_{nk} = \frac{\varphi}{1 - \varphi} e^{\frac{1}{\theta_0 + \varphi v}}.$$

Здесь  $\varphi = 1 - \frac{c}{c_0}$  – коэффициент полноты сгорания;  $c_0, c$  – начальная и текущая концентрации CO соответственно;  $\tau_{nk} = \frac{\tau_n}{\tau_k}$ ,  $\tau_{\partial k} = \frac{\tau_{\partial}}{\tau_k}$  – безразмерное время пребывания и время диффузии;  $\tau_n = \frac{x_0}{\omega_{cp}}$  – время пребывания смеси в исследуемой зоне;  $x_0$  – длина пути;  $\omega_{cp}$  – средняя скорость газов;  $\tau_k = \frac{1}{k_0}$  – кинетическое время, обратное по величине констан-

те скорости химической реакции ( $k_0$ );  $\tau_{\partial} = \frac{1}{\alpha_{\partial}}$  – время диффузии, обратное по величине коэффициенту диффузионного обмена;  $\alpha_{\partial} = \frac{\alpha_k}{c_p}$  – коэффициент диффузионного обмена;  $\alpha_k$  – коэффициент конвективного теплообмена;  $c_p$  – теплоемкость смеси при  $p = \text{const}$ ;  $v = \frac{E^3 q c_0}{R^3 k_0 c_p}$  – приведенная теплоемкость смеси;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $q$  – тепловой эффект реакции;

$\sigma = \frac{E^3 c'_{пр}}{R^3 k_0 c_p}$  – приведенный безразмерный коэффициент теплоотдачи излучением;  $c'_{пр} = c_{пр} + \alpha_k \frac{T_M - T}{T_M - T_0^4}$  – приведенный коэффициент теплоотдачи излучением;  $T_M, T_0, T$  – максимальная начальная и конечная температуры соответственно;  $c_{пр}$  – приведенный коэффициент излучения;  $\theta_M = \frac{RT_M}{E}$ ,  $\theta_0 = \frac{RT_0}{E}$ ,  $\theta = \frac{RT}{E}$  – безразмерные максимальная и начальная температуры соответственно.

Задавая исходные значения концентраций CO, температур и скоростей ваграночных газов, рассчитываем:

$$t_{\text{газ}} = f(H), C_{\text{CO}} = \varphi(H),$$

т. е. изменения температуры и концентрации CO по высоте вагранки.

Стабильное горение ваграночных газов является обязательным условием не только для работы рекуператора, но и для обеспечения экологических требований: остаточные концентрации CO не должны превышать 0,1%. Это условие выполняется при осуществлении горения газов с  $t \geq 1000$  °C в течение  $\geq 0,5$  с или с учетом скорости движения газов в трубе вагранки, выполняющей роль камеры дожига, на пути, составляющем не менее 8–10 м.

При сбивании пламени при загрузке шихты или нарушениях дутьевого режима горение восстанавливается за счет горелок-запальников, устанавливаемых в зоне завалочного окна. Дополнительное топливо требуется и в случае недостаточно высокой температуры факела. При дожигании холодных ваграночных газов, прошедших очистку, также необходимо использовать горелки. Расчет мощности горелок (форсунок) производится по той же расчетной схеме, но с дополнительным те-



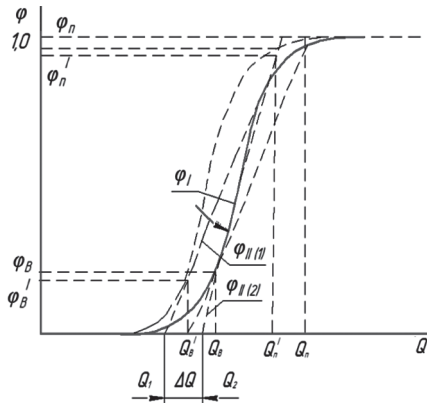


Рис. 3. Процесс горения СО с использованием дополнительного топлива

плоносителем. Графическая схема такого расчета приведена на рис. 3.

Для обеспечения эффективной работы встроенного рекуператора с автоматизированным узлом дожига необходимо, по возможности, минимизировать колебания давления и расхода газов и подсоса воздуха через завалочное окно. С этой целью при внедрении рекуперации тепла на вагранках открытого типа необходимо провести реконструкцию системы загрузки шихты. Простым и надежным решением задачи является переход к боковой загрузке шихты по склизу. Загрузка по склизу позволяет сократить размеры завалочного окна по высоте в 3–4 раза и устранить избыточные подсосы и разбавление газов, что повышает температуру и стабильность горения. Исследования характера движения кусковой шихты в вагранке показали, что на траектории, равной четырем завалкам шихты, составы нивелируются, несмотря на различия в способе загрузки, соответственно устраняется и некоторый перекося слоя в районе завалочного окна.

Современным требованиям к ваграночной плавке отвечают комплексные автоматизированные установки, в состав которых входят вагранки закрытого типа, система тонкой очистки выбросов и рекуператор как обязательный элемент, обеспечивающий высокие технико-экономические характеристики.

Оптимальная схема подобной установки предполагает предварительную (до дожига) очистку отходящих газов. Отбор газов осуществляется ниже завалочного окна и рекуператор должен выполняться выносным, в виде отдельного блока (системы).

Такой рекуператор по заказу компании «Восток-Универсал» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан) был разработан УП «Технолит» и ГГТУ им. П. О. Сухого для комплексной ваграночной установки, поставленной на завод «Изотерм», принадлежащий компании, Словенским производителем.

Сам комплекс включает в себя водоохлаждаемую вагранку закрытого типа производительностью 5 т/ч минерального расплава, что по основным параметрам соответствует 15-тонной чугуноплавильной вагранке, систему очистки отходящих газов от пыли, состоящую из циклона, тканевого фильтра и дымососа, систему подачи дутья и кислорода, систему дозирования и загрузки шихты, системы непрерывного слива и распыления минерального расплава и периодического слива чугуна, систему КИПиА с компьютерным управлением и установкой технического зрения. Для повышения эффективности работы вагранки и сокращения расхода кокса руководство компании решило дополнить ваграночный комплекс рекуператором тепла.

Разработанный рекуператор ТШСИ-210 представляет собой выносной двухступенчатый агрегат, состоящий из камеры дожига ваграночных газов, радиационного щелевого рекуператора, конвективного трубчатого рекуператора, системы подачи воздуха с управляющей арматурой и вентилятором и системы КИПиА с компьютерным управлением.

Рекуператор устанавливается на трассе отходящих газов после тканевого фильтра на стороне дымососа и соответственно на трассе подачи дутья между нагнетателем и вагранкой (рис. 4).

Ваграночные газы отводятся из вагранки через специальный кольцевой отбор на выходе из слоя шихты. При этом выше оси отбора автоматически поддерживается слой шихты, создающий сопротивление как выходу газов в атмосферу, так и подсосу воздуха в систему очистки и рекуперации. Контроль уровня завалки осуществляется с помощью датчиков уровня и тягонапоромера в узле отбора газов.

В зоне отбора ваграночных газов поддерживается нулевое давление или разрежение в пределах 0,1–0,2 мбар (1–2 мм вод. ст.).

Отходящие газы проходят последовательно циклон и тканевый фильтр ФРИК-455, где обеспыливаются до уровня < 20 мг/м<sup>3</sup>, после чего подаются в камеру дожига рекуператора.

В камере дожига установлены две блочные жидкотопливные горелки мощностью по 1 МВт каждая. Для горения ваграночных газов и управления температурой в рекуператоре в случае необходимости через коллекторы подается воздух от вентилятора. Количество подаваемого воздуха регулируется оператором в соответствии с температурой в камере дожига и радиационном рекуператоре.

Радиационный рекуператор представляет собой теплоизолированную цилиндрическую двух-

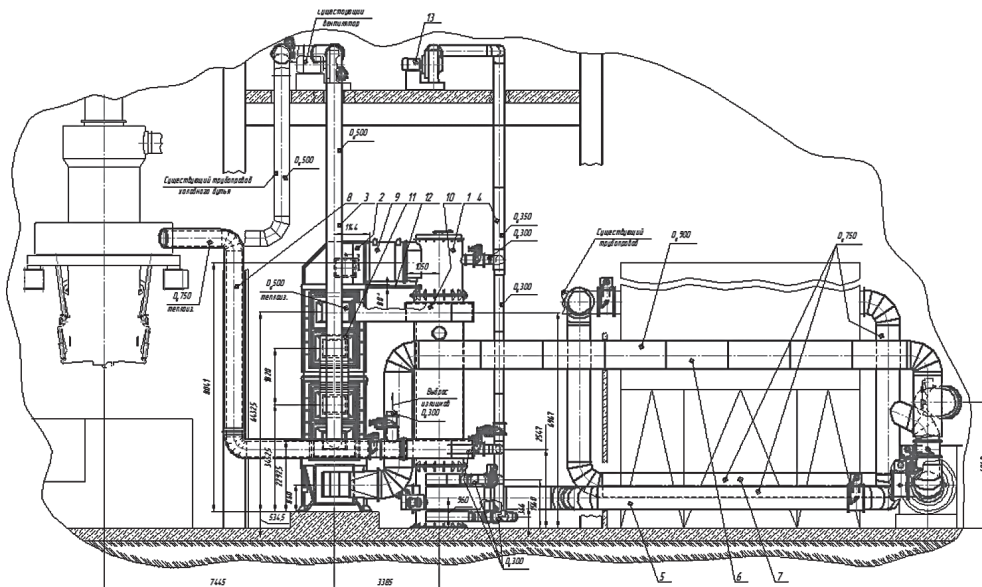


Рис. 4. Система рекуперации тепла вагранки закрытого типа

корпусную колонну из стали 12X18Н10Т высотой 5,5 м и диаметром внутренней части 1200 мм. Дымовые газы движутся вверх по внутреннему каналу, воздух, поступающий из конвективного рекуператора, движется вниз по кольцевому щелевому каналу шириной 100 мм (схема – противоток).

В верхней части рекуператора предусмотрен ввод охлаждающих газов от вентилятора, в случае превышения температура дымовых газов превысит критические значения: на выходе из радиационного рекуператора ~800 °С, на выходе из конвективного рекуператора ~400 °С.

После радиационного рекуператора газы поступают в конвективный трубчатый рекуператор. Рекуператор состоит из четырех секций жаростойких труб диаметром 39 мм, по 273 трубы в каждой. Секции расположены перпендикулярно потоку газов. Нагреваемый воздух (дутье) поступает от нагнетателя и движется последовательно по трубным секциям по схеме перекрестного тока.

После конвективного рекуператора дымовые газы с помощью дымососа ДРГ-13.5 выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу.

В ваграночной установке предусмотрена возможность отбора (аспирации) дымовых газов как через основной тракт, включающий рекуператор, так и по старой схеме, минуя рекуператор. Этот вариант аспирации может использоваться при запуске вагранки, длительных простоях или неполадках в системах рекуперации или аспирации.

Рекуператор может эксплуатироваться как в режиме рекуперации при подаче в камеру дожига ваграночных газов, так и в режиме автономного воздухоподогревателя: при отключении ваграночных газов за счет установленных горелок.

Рекуператор оснащен системой трубопроводов с регулирующей и запорной арматурой, предохранительными клапанами и системой КИПиА, выведенной на экран монитора с пультовой ваграночной установки. Компьютерное управление позволяет оператору осуществлять оперативный контроль и дистанционное управление работой рекуператора во взаимодействии с работой всех систем, входящих в состав ваграночного комплекса (рис. 5).

Рекуператор был изготовлен, смонтирован на заводе заказчика и введен в эксплуатацию в марте 2011 г. В настоящее время ваграночный комплекс работает в непрерывном режиме с плановыми горячими остановами через 10 дней на 8 ч без вы-



Рис. 5. Пульт управления ваграночного комплекса

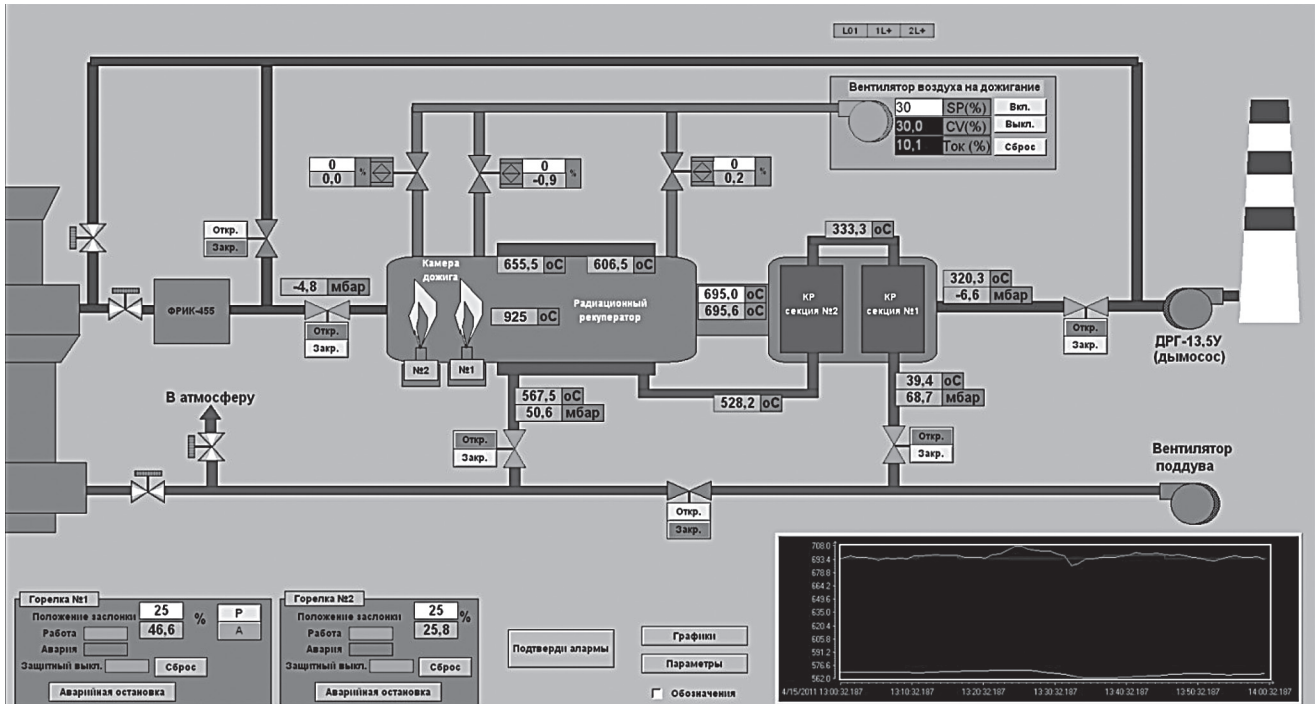


Рис. 6. Дисплей управляющего компьютера системы рекуперации

бивки вагранки для проведения ТО. Годовой фонд работы вагранки составляет 7200 ч. Рекуператор обеспечивает нагрев дутья до 560–600 °С при расходе печного топлива в камере дожигания 60–80 л/ч. В свою очередь, горячее дутье позволило сократить расход кокса на 30% и полностью отказаться от обогащения дутья кислородом (на холодном дутье подача кислорода обеспечивала поддержание заданной температуры расплава и составляла 120–130 м<sup>3</sup>/ч). Температура расплава на желобе вагранки поддерживается на уровне 1470±5 °С. Неизбежные колебания расхода и состава ваграночных газов при изменениях режима плавки корректируются с пульта управления вагранкой оператором путем изменения расхода жидкого топлива и подачи воздуха в камеру дожигания или рекуператор.

Эксплуатация подтвердила высокие проектные характеристики рекуператора, которые по некоторым параметрам даже превосходили требования Технического задания.

Наиболее эффективно как теплообменник работает конвективная часть рекуператора. Как видно из данных, представленных на мнемосхеме, взятой с монитора управляющего компьютера (рис. 6), при температуре дымовых газов 695 °С на входе в конвективную часть нагрев дутьевого воздуха после первых двух секций составил 333 °С, а на выходе из конвективного рекуператора – 528 °С.

На рис. 7 приведены графики, показывающие работу рекуператора при запуске: выход на рабочий режим после подачи ваграночных газов в рекуператор ( $\tau = 16:27:17$ ) занимает 60–90 мин. На

рис. 8 представлены текущие показатели температурного режима в процессе плавки, характеризующие стабильность работы рекуператора и всего ваграночного комплекса в целом.

Рекуператор ТШСИ-210 имеет сравнительно небольшое сопротивление по воздушной стороне – до 20 мбар (200 мм вод. ст.) и до 2 мбар на дымовой стороне, что позволило сохранить прежние нагнетатель и дымосос, обслуживающие вагранку.

Надежность работы рекуператора обеспечивает развитая система КИПиА, в частности, контроль за температурой не только газов и воздуха (дутья), но и стенок теплообменников, особенно в радиационной части. На входе продуктов горения в радиационный рекуператор для его защиты от перегрева установлен экран, для компенсации температурных расширений в верхней части радиационного рекуператора – специальный гофрированный (сильфонный) компенсатор. Компенсаторы находятся также по всему «горячему» тракту как по трассе движения дымовых газов, так и в трубопроводах подачи горячего дутья.

Рекуператор ТШСИ-210, как показали производственные испытания, имеет более высокие показатели по т. к. п. д., чем зарубежные аналоги. В РБ в модернизации с целью повышения технико-экономических и экологических характеристик нуждаются практически все действующие чугуноплавильные вагранки. В связи с этим апробация представленных выше технических решений безусловно может быть полезна для использования на отечественных предприятиях.



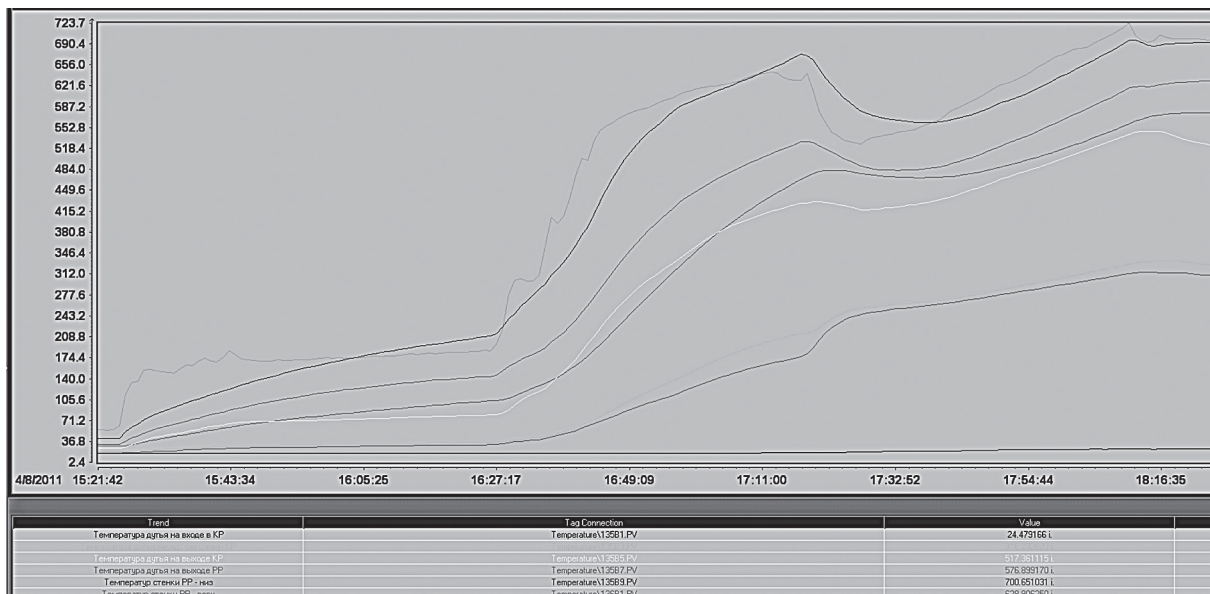


Рис. 7. Разогрев рекуператора

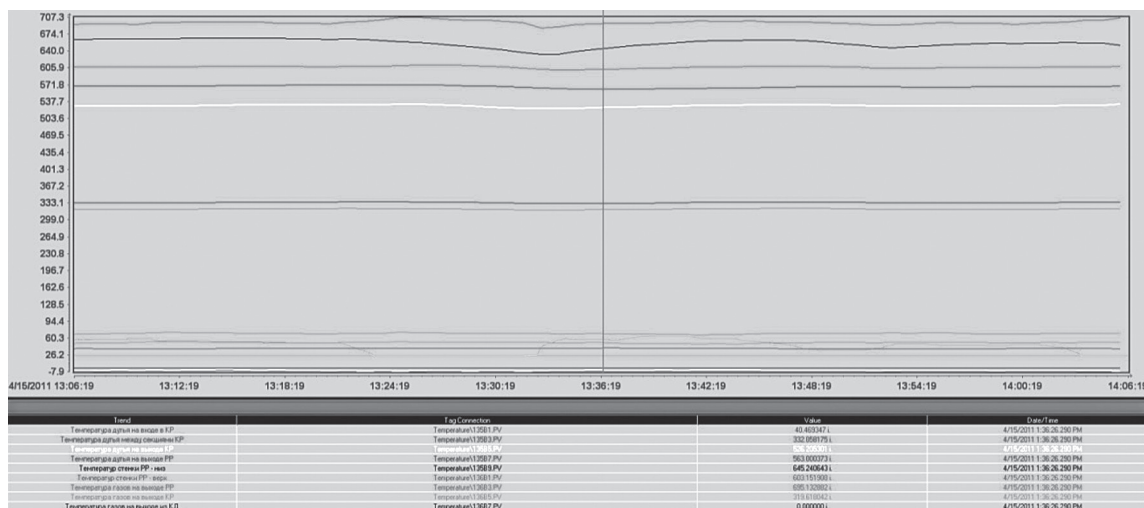


Рис. 8. Стабильный режим работы рекуператора



Рис. 9. Запуск рекуператора на заводе «Изотерм» (ООО «Восток-Универсал», Казахстан)

Выносной рекуператор, установленный на заводе «Изотерм», достаточно дорогостоящее сооружение, однако экономический эффект, полученный от его реализации, обеспечит окупаемость проекта уже в течение первых 6 мес экс-

плуатации (рис. 9). Расчет, выполненный заказчиком, показал, что эксплуатация рекуператора позволит сократить текущие затраты на кокс и кислород примерно на 1,7 млн. долл. США в год.