



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, ГГТУ им. П. О. Сухого,
Р. В. ЕМЕЛЬЯНОВ, ТОО «Восток-Универсал»

УДК 621.74

РЕКУПЕРАТОР ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОДОГРЕВА ДУТЯ

Высокотемпературный ($\geq 500^\circ\text{C}$) подогрев дутья является наиболее эффективным средством интенсификации работы топливных печей, в том числе и плавильных. В металлургии нагрев воздуха и газового топлива до максимально возможных по условиям безопасной эксплуатации уровней используется достаточно широко и успешно. В то же время для обеспечения нагрева в диапазоне температур $500\text{--}1000^\circ\text{C}$ и более требуются значительные капиталовложения. Ориентировочно удельные капитальные затраты составляют $80\text{--}100$ долл. США на $1\text{м}^3/\text{ч}$ высокотемпературного дутья. Однако достигаемая при этом экономия топлива обеспечивает окупаемость таких воздухоподогревателей в течение $1,5\text{--}2$ лет.

Еще более рентабельным является применение рекуператоров – воздухоподогревателей, использующих тепловую энергию отходящих печных газов, срок окупаемости рекуператоров, как правило, не более чем полгода.

В литейном производстве высокотемпературный подогрев дутья используется пока недостаточно широко, в частности, в РБ практически не используется. В лучшем случае нагрев ведется до $350\text{--}400^\circ\text{C}$, чаще до $250\text{--}300^\circ\text{C}$. В то же время из практики работы плавильных печей известно, что повышение температуры дутья на каждые $15\text{--}20^\circ\text{C}$ снижает расход топлива на 1% или соответственно повышает на $3\text{--}4^\circ\text{C}$ температуру жидкого металла. Улучшается также качество продукции: расширяются возможности внепечной обработки расплава, снижается содержание серы и других вредных примесей.

С учетом постоянного роста стоимости топлива актуальность использования воздухонагревателей и особенно рекуператоров возрастает. При этом приоритетным является высокотемпературный нагрев.

В I квартале 2011г. на заводе «Изотерм» казахстанской компании «Восток-Универсал» (г. Усть-Каменогорск) на 5-тонной минераловатной вагранке закрытого типа был введен в эксплуатацию двухступенчатый рекуператор, разработанный УП «Технолит» (г. Минск) и сотрудниками кафедры МиТЛП ГГТУ им. П. О. Сухого (г. Гомель).

Встроенный рекуператор обеспечивает высокотемпературный нагрев дутья до $500\text{--}600^\circ\text{C}$ и представляет собой агрегат с камерой дожигания (топкой) и двумя теплообменными блоками – ра-

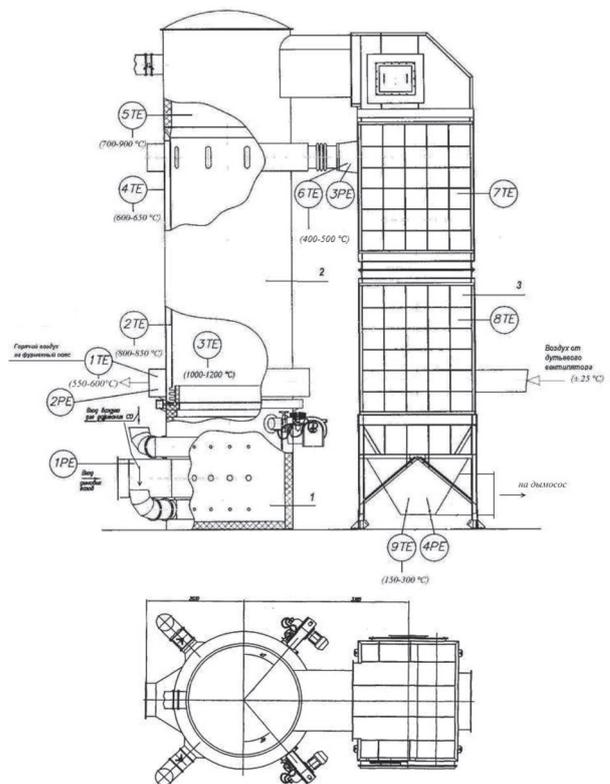


Рис. 1. Двухступенчатый выносной рекуператор с камерой дожигания 1, радиационным 2 и конвективным 3 теплообменниками

диационным и конвективным (рис. 1). Рекуператор установлен по трассе ваграночных газов после системы очистки, которая состоит из циклонов и тканевого фильтра. Аспирация ваграночных газов осуществляется ниже уровня завалки шихты. После очистки от пыли в циклонах до уровня примерно 0,5 г и снижения температуры с исходного (250–300 °С) до заданного уровня (не более 140 °С) с помощью разбавления холодным воздухом газы подаются в фильтр, где очищаются до уровня не более 0,02 г/м³.

Далее ваграночные газы, содержащие до 12–20% СО, подаются в камеру дожигания (топку) рекуператора. В камере установлены две блочные жидкотопливные горелки типа «WM-L/R «Weishaupt» мощностью по 1 МВт (~100 л/ч), работающие в автоматическом режиме: расход топлива изменяется в соответствии с изменением содержания СО в отходящих газах, обеспечивая его полное дожигание (до уровня ~0,1%) и поддержание температуры в топке в заданном интервале. Газы вводятся в топку через сопла диаметром по 0,1 м и смешиваются с воздухом, который подается струями из двух коллекторов, расположенных ниже и выше «топливного» коллектора. Струйная подача обеспечивает эффективное образование и перемешивание газозвушной смеси и соответственно улучшает условия воспламенения и сжигания. Камера футеруется огнеупорным кирпичом, так как температура в ней при оптимальном соотношении газ – воздух достигает 1000–1200 °С.

Из топки горячие газы поступают в радиационный блок, где отдают тепло воздуху, нагревая его от 400–500 до 550–600 °С. При этом температура дымовых газов снижается до 700–850 °С и они поступают в конвективную часть рекуператора. В последней воздух нагревается от исходной температуры (±25 °С) до 400–500° С, а дымовые газы охлаждаются до 150–300 °С и с помощью дымососа ДРГ-13,5У выбрасываются через дымовую трубу в атмосферу.

Практика показала, что после выхода на рабочий режим (20–30 мин с момента розжига кокса) стенки камеры дожигания раскаляются до температуры, достаточной для воспламенения смеси ваграночных газов с воздухом и без подачи топлива. Это позволяет снизить расход топлива до 20–25% от номинала.

Радиационный блок представляет собой щелевой теплообменник, работающий по схеме «противоток» (рис.2). Ширина кольцевого зазора, по которому течет воздух, составляет 80 мм, высота теплообменной части 5,5 м, диаметр дымового канала 1,2 м. Теплообменник выполнен из стали 12Х18Н10Т толщиной 10 мм. Для компенсации температурных расширений установлен сильфонный компенсатор («гофры»), в нижней части теплообменника – экран для защиты наиболее термически напряженного узла – места ввода горящего факела. При противотоке стенка рекуператора в этой зоне разделяет горячий воздух с температурой 600 °С и более и факел с температурой до

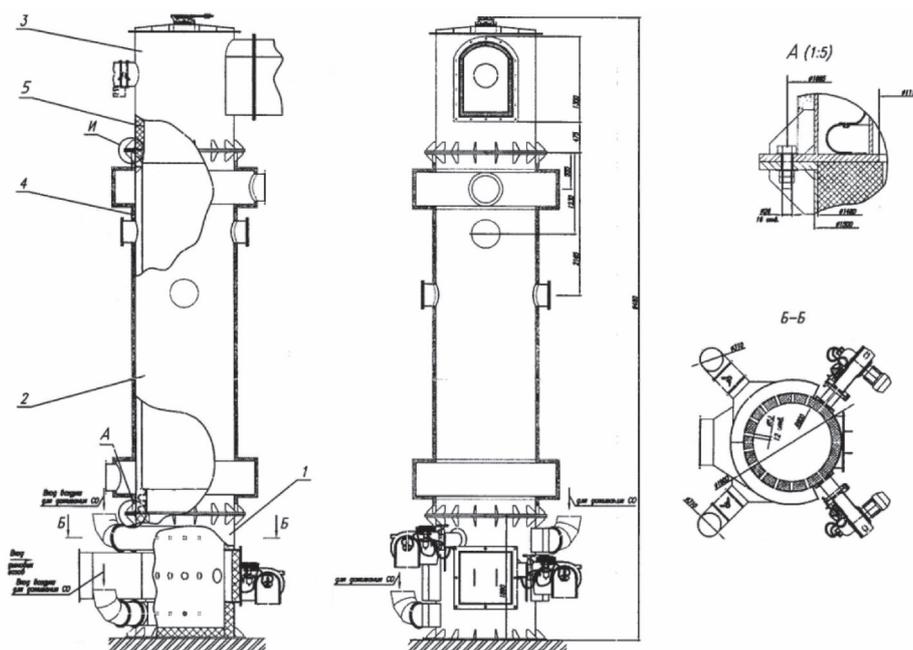


Рис. 2. Радиационный блок: 1 – камера дожигания (топка); 2 – радиационный теплообменник; 3 – верхняя секция; 4 – теплоизоляционная ткань; 5 – футеровка огнеупорным кирпичом

1200 °С, что приводит к нагреву стенки до предельных рабочих температур. Экран снижает эту нагрузку до уровня 700–750 °С. Дополнительной защитой служит слой гарнисажа, образующийся из отложений пыли на поверхности внутренней обечайки рекуператора и в зазоре между экраном и обечайкой.

Отложения пыли вследствие термопреципитации на гладкой поверхности внутренней обечайки образуются пропорционально концентрации пыли в газах и температурному градиенту. Слой гарнисажа достигает толщины 2–3 мм, после чего отслаивается от подложки при теплосменах и процесс повторяется. Экран является съемной частью и заменяется по мере износа.

Наружный корпус рекуператора и камеры дожига теплоизолируется. Для этой цели использованы теплоизоляционные маты и ткань «Fiber fax Dura-blanket H» толщиной 13 мм, которая по своим теплоизоляционным характеристикам значительно превосходит минеральную вату: $t_{\text{раб.}} \approx 1350 \text{ } ^\circ\text{C}$.

На выходе из радиационной части температура дымовых газов поддерживается на уровне 700–800 °С. Для регулирования температуры газов предусмотрена дополнительная подача воздуха в переходник между блоками и в камеру дожига (топку).

При избыточном количестве горячего дутья в топку рекуператора вместо холодного воздуха на

дожигание ваграночных газов направляется горячий. При этом расход топлива на горелки перекрывается. Контроль режима ведется по температуре в камере дожига (на входе в радиационную часть) и на входе в конвективную часть (в переходнике).

Конвективная часть рекуператора состоит из четырех секций гладкостенных труб из жаропрочной стали диаметром 50 мм, расположенных по схеме «противоток – перекрестный ход» (рис. 3). Дымовые газы движутся снаружи, воздух поступает по трубам. Количество труб в каждой секции 270 шт.

Наиболее сложные вопросы при проектировании и эксплуатации воздухонагревателей, в том числе рекуператоров, – это обеспечение герметичности воздушного тракта и компенсации неравномерных температурных расширений сочленяемых элементов конструкции.

Для решения задачи компенсации температурного расширения теплообменная часть конвективного рекуператора была разделена на четыре секции, в которых длина труб составляет 1,2 м, что соответственно уменьшает абсолютную величину удлинения с 30–40 мм как в радиационной части до 5–6 мм на входе дымовых газов и 3–4 мм на выходе их из конвективного блока рекуператора. Компенсация этого удлинения производится за счет подвижного крепления торцевых стенок блока труб на входе в коллектор.

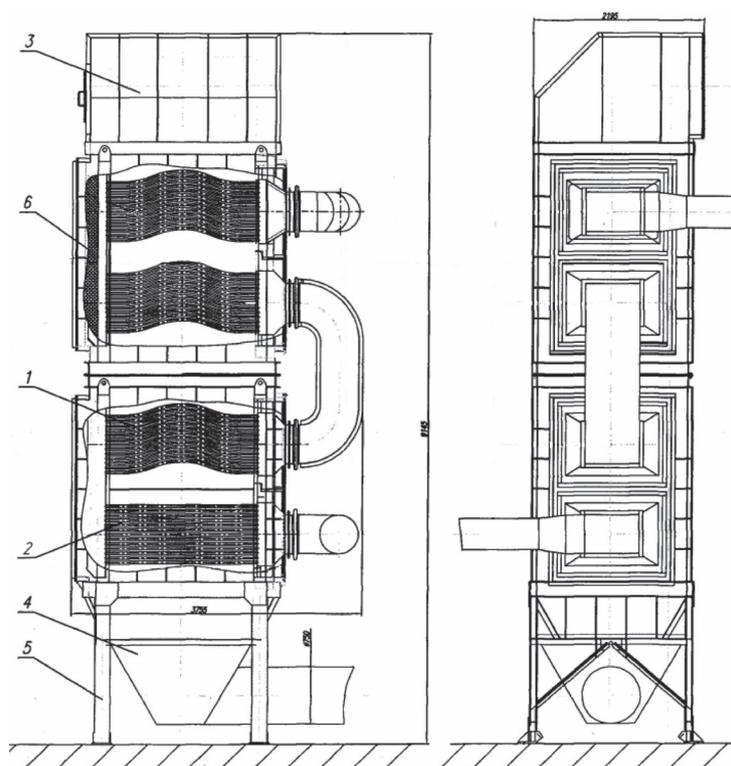


Рис. 3. Конвективный блок: 1, 2 – секции теплообменника; 3 – верхняя камера; 4 – нижняя камера; 5 – опоры; 6 – теплоизоляция

Различия в удлинении труб, входящих в каждый блок, незначительны и компенсируются за счет изогнутой конфигурации труб.

Герметичность соединений между секциями и блоками рекуператора обеспечивается путем использования компенсаторов на всех участках трубопроводов и в переходнике. То же относится к коллекторам на вагранке, причем были использованы как цилиндрические (до 500 мм в диаметре), так и прямоугольные компенсаторы (свыше 500 мм).

Наиболее эффективным теплообменным аппаратом зарекомендовал себя конвективный блок. Так, при входной температуре дымовых газов 600–700 °С достигнутая температура нагрева воздуха составляла 450–500 °С. При этом скорость подъема температуры достигала 25–30 град/мин. К. п. д. теплоотдачи, рассчитанный по остаточной температуре дымовых газов в конвективной части, составляет 52–57%, в том числе доля тепла, аккумулированная воздухом, – 43–48%.

Инерционность радиационной части значительно больше. Разогрев ее при запуске составляет 5–10 град/мин. Таким образом, при запуске вагранки или включении после длительной остановки, например, в третью смену, нагрев дутья осуществляется только за счет работы конвективной части. После выхода на режим при температуре стенки радиационного блока ≥ 600 °С примерно через 1 ч работы вагранки радиационная часть также начинает «догревать» дутье, т. е. увеличивать температуру воздуха, поступающего из конвективной ча-

сти. Существенно ниже и коэффициент теплоотдачи в радиационной части, однако нужно учитывать, что радиационный блок работает при меньшем градиенте температур, «догревая» воздух, поступающий из конвективного блока с достаточно высокой температурой, а площадь его поверхности теплообмена на порядок меньше, чем теплообменная поверхность конвективного блока. Радиационная часть в данном рекуператоре выполняет не только функцию теплообменника, но и своеобразного буфера или стабилизатора между топкой и конвективным блоком. В ином случае необходимо было бы разбавлять дымовые газы холодным воздухом, что снижало бы эффективность работы рекуператора в целом.

Рекуператор оснащается необходимой системой КИПиА, автоматикой безопасности, компьютерным пультом управления с наглядной мнемосхемой, позволяющей оператору-вагранщику четко контролировать и дистанционно управлять всеми блоками системы рекуперации, так же как и вагранкой в целом (рис. 4).

Высокотемпературный нагрев дутья является одним из наиболее эффективных способов ресурсосбережения. Так, при внедрении описываемого рекуператора практически достигнута 30%-ная экономия кокса, цех отказался от использования кислорода как средства интенсификации плавки, сократились потери расплава при простоях, горячее дутье позволило даже в отсутствии кислорода стабилизировать температуру расплава на желобе

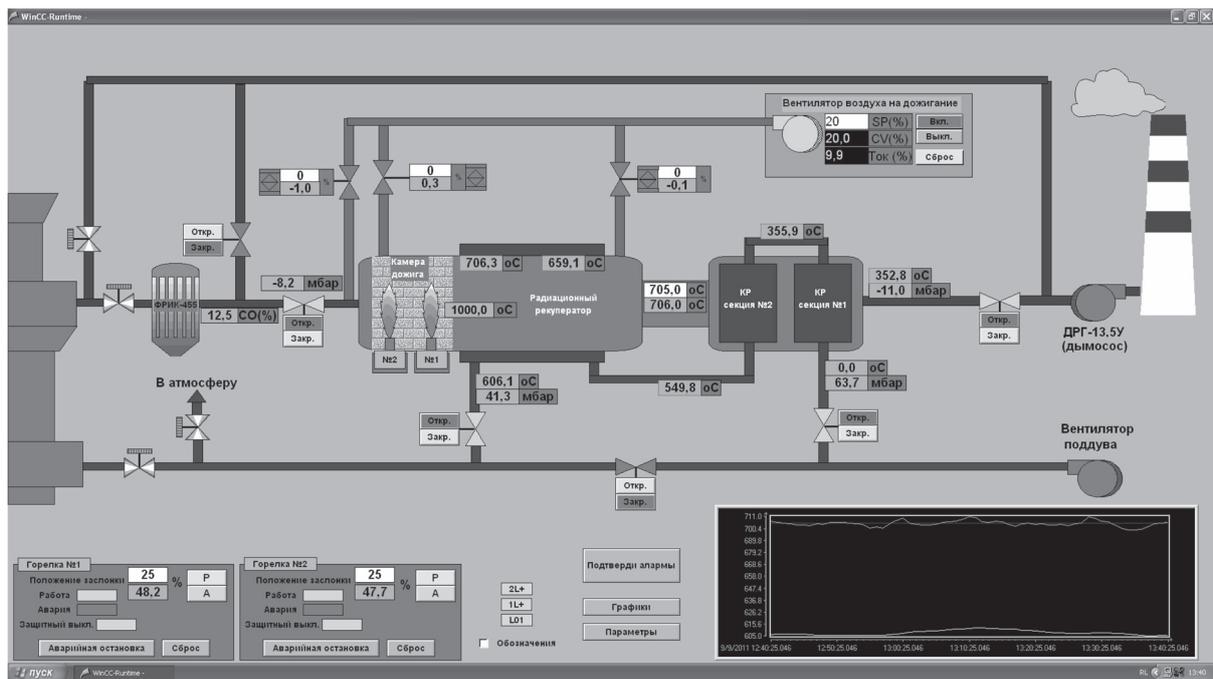


Рис. 4. Мнемосхема системы рекуперации на экране ПК оператора вагранки (в нижнем правом углу экрана отражаются изменения температуры дутья и дымовых газов (между радиационным и конвективным блоками) в течение последнего часа работы рекуператора)

вагранки в узком заданном интервале 1450–1470 °С.

Для сокращения пускового периода рекуператор включается на разогрев сразу после розжига холостой колоши. Газы, образующиеся при розжиге вагранки, отсасываются с помощью дымососа по тракту аспирации, минуя рекуператор. В рекуператоре включаются обе горелки на полную мощность. Воздуходувка (нагнетатель, подающий дутье в вагранку) и дымосос при этом включаются на 30–50% мощности, ее регулировка осуществляется с помощью инверторов. Дутье в период разогрева сбрасывается в атмосферу. В течение 25–35 мин, когда идет загрузка шихты, воздух нагревается до температуры 300–350 °С. После этого ступенчато повышается подача дутья в вагранку, а ваграночные газы подаются в топку рекуператора, где поджигаются, что соответственно повышает температуру и расход теплоносителя в рекуператоре. По мере разогрева рекуператора, в основном радиационной части, и повышения температуры нагрева дутья сокращается расход жидкого топлива с 200 до 40 л/ч. Среднечасовой расход жидкого топлива по всей плавильной кампании, как показали первые 6 мес эксплуатации, составляет 60 л/ч.

После разогрева рекуператора устанавливается рабочий режим системы: расход дутья – 6–7 тыс. м³/ч, температура – 550–600 °С, расход дымовых газов – 11–13 тыс. м³/ч, давление дутья – 10–12 кПа, разрежение в точке отбора ваграночных газов – 50–100 Па, перед дымососом – 1,0–1,5 кПа. Сопротивление рекуператора на воздушной стороне – 2,0–2,2 кПа, в том числе конвективной части – 1,6–1,8 кПа.

Помимо экономической составляющей, использование рекуператора имеет и экологический эффект. При дожигании газов резко сокращаются выбросы СО: с 10–20% до уровня ниже 0,1%, что соответствует санитарным нормам.

Рекуператор подобного типа является достаточно дорогостоящим сооружением, ориентировочная стоимость представленного в статье рекуператора составляет около 800 тыс. долл. США,

соответственно его окупаемость обеспечивается при использовании на вагранках мощностью от 5–10 т/ч и выше при годовом фонде рабочего времени 2–3 тыс. ч и более и естественно при стабильной работе вагранок и цеха в целом. Так, на предприятии «Изотерм», где был внедрен данный рекуператор, срок окупаемости составил примерно 0,5 года (годовой фонд работы вагранки на предприятии 7200 ч). Аналогичные данные приводятся и зарубежными исследователями.

Описанный выше двухступенчатый выносной рекуператор превосходит по своей эффективности известные зарубежные аналоги.

На вагранках, используемых в РБ, наиболее близкое к описанному техническое решение применено на чешских ваграночных установках, внедренных для производства минеральной ваты на ОАО «Гомель-стройматериалы». Эти рекуператоры представляют собой выносные конвективные теплообменники, размещенные после вынесенной в отдельный блок камеры дожигания, и обеспечивают нагрев дутьевого воздуха до 500–550 °С, однако средний расход природного газа при этом составляет около 150 м³/ч. В то же время на представленном в статье рекуператоре среднечасовой расход составляет не более 60–70 л/ч.

Эффективность разработанного рекуператора можно оценить также, сопоставив его с характеристиками камер дожигания ваграночных газов, установленных в 2011 г. итальянской фирмой «Termoventil Tecnica» на 15-тонных чугуноплавильных вагранках Минского завода отопительного оборудования: габариты камеры в 4 раза больше, чем в представленном рекуператоре, расход природного газа составляет около 400 м³/ч при одинаковой эффективности обезвреживания СО.

Разработанный рекуператор и его элементы могут эффективно использоваться на любых минераловатных и чугуноплавильных вагранках производительностью не менее 5–10 т/ч как в Беларуси, так и за ее пределами, а также при решении задач использования тепла отходящих газов для других печей литейных и термических цехов.