



УДК 621.745.5
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-50-57

Поступила 25.07.2018
Received 25.07.2018

ЭКОЛОГИЯ ПЕЧЕЙ

*С. Л. РОВИН, УП «ТЕХНОЛИТ», г. Минск, Беларусь, Я. Коласа, 24. E-mail: technolit@tut.by,
Л. Е. РОВИН, Л. Н. РУСАЯ, О. В. ГЕРАСИМОВА, Гомельский государственный технический
университет им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by*

В статье рассматриваются вопросы пылегазоочистки выбросов от плавильных агрегатов, приведен анализ взаимосвязи энергоэффективности печей и их экологических параметров, представлены комплексные системы, обеспечивающие высокую эффективность очистки газов, аспирируемых от плавильных агрегатов, при минимальных энергетических и инвестиционных затратах.

Ключевые слова. Пылегазоочистка, энергоэффективность, рекуперация.

Для цитирования. Ровин С. Л. Экология печей / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, Л. Н. Русая, О. В. Герасимова // Литье и металлургия. 2018. Т. 92. № 3. С. 50–57. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-50-57.

FURNACE ECOLOGY

*S. L. ROVIN, Technolit Co, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: technolit@tut.by,
L. E. ROVIN, L. N. RUSAYA, O. V. GERASIMOVA, Gomel State Technical University named after
P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus, 48, Ochyabrya ave. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by*

The article studies the issues of dust and gas cleaning of emissions from smelting units, the analysis of the relationship of furnaces energy efficiency and their environmental parameters, the complex systems that insure high efficiency of gas purification which are aspirated from the melting units are provided, with minimal energy and investment costs.

Keywords. Dust and gas cleaning, energy efficiency, recuperation.

For citation. Rovin S. L., Rovin L. E., Rusaya L. N., Gerasimova O. V. Furnace ecology. Foundry production and metallurgy, 2018, vol. 92, no. 3, pp. 50–57. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-50-57.

Современные печи литейных цехов благодаря высокому уровню научного, конструкторского и металлургического обеспечения, автоматического, включая компьютерное, управления надежно обеспечивают получение металла с заданными характеристиками. Выбор типа агрегата для решения конкретных производственных задач определяется экономическими и экологическими факторами. Конечно, при этом речь не идет об устаревшем оборудовании, выработавшем ресурс 20–50 лет назад, но благодаря своей физической выносливости, эксплуатирующемся на некоторых предприятиях.

Экономические параметры, прежде всего, определяются затратами на энергоносители. Проследить эту зависимость можно на примере плавки чугуна – наиболее значимой доли выпускаемого в нашей стране литья.

Наиболее энергетически выгодным плавильным агрегатом для чугуна по-прежнему остается коксовая вагранка. В ней полезно используется до 45% затрачиваемой энергии при холодном дутье (устаревшая схема) и 60–65% – при горячем дутье с использованием рекуперации. Высокий КПД в вагранке обусловлен интенсивным теплообменом между шихтой и продуктами горения, который осуществляется в противотоке в шахте печи и приводит к интенсивному нагреву шихты до температуры плавления металла. В электропечах стадия нагрева шихты происходит при КПД < 20%.

В то же время перегрев металла в вагранках и получение высоких температур затруднительны: КПД вагранки при перегреве жидкого металла не превышает 10%. В электропечах, напротив, на стадии перегрева коэффициент полезного использования тепла достигает 60% и более. Однако если в электропечах используется энергия, получаемая с тепловых станций, где КПД ~ 25–30%, то очевидно, что общий ко-

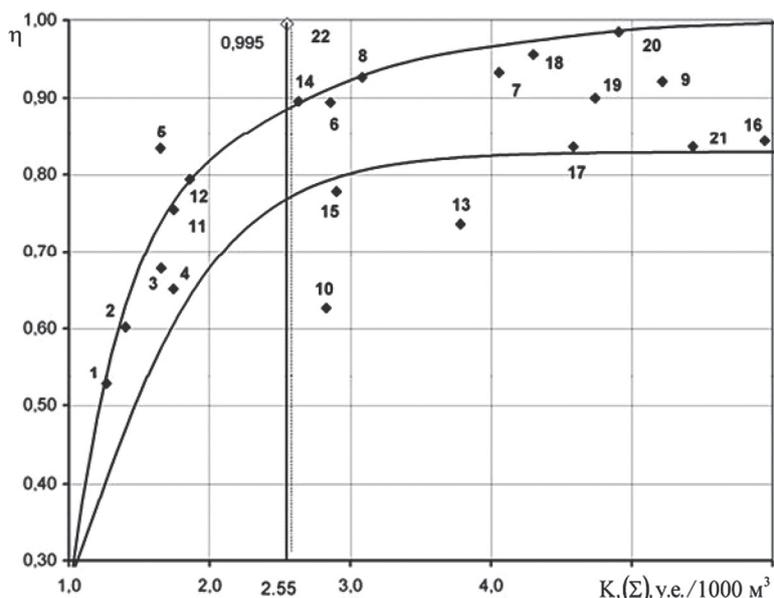


Рис. 1. Эффективность аппаратов очистки выбросов в зависимости от энергозатрат и их стоимости: 1 – инерционный пылеуловитель; 2 – циклон; 3 – циклон прямоточный; 4 – мультициклон скоростной; 5 – мультициклон; 6 – электрофильтр; 7, 8 – фильтр рукавный со встряхиванием; 9 – фильтр со струйной продувкой; 10 – эжекторный скруббер Вентури; 11 – мокрый циклон; 12 – ротоклон; 13 – полый скруббер; 14 – скруббер с насадкой; 15 – барботажный аппарат; 16 – дезинтегратор; 17 – мокрый электрофильтр; 18–21 – скрубберы Вентури: соответственно круглый, щелевой, средне- и высокоскоростной; 22 – комплексная система со II ступенью конденсационного типа

эффективнее использования топлива составляет около 15%, соответственно растет и стоимость энергии, затрачиваемой на плавку.

Именно поэтому вагранка, особенно в составе дуплекс-процесса, сохраняет свое лидирующее положение в выплавке чугуна в мировой практике: Японии, Германии, Англии, США и др. Лишь в единичных случаях, в тех странах, где в избытке дешевая электроэнергия, доля ваграночного чугуна меньше 50%, например, во Франции (~ 40%), где основную часть электроэнергии производят атомные станции.

Удельный расход кокса на 1 т чугунных отливок в Беларуси составляет 250–280 кг или 150–180 кг на 1 т жидкого чугуна. В ряде случаев этот расход еще выше – до 300 и 200 кг соответственно. Практически все чугуноплавильные вагранки в Беларуси, России и на Украине и в других странах СНГ работают на холодном дутье. В мировой практике подавляющая часть вагранок работает с подогревом дутья, что позволяет снизить расход кокса до 100–120 кг на 1 т жидкого металла, а при высокотемпературном нагреве и качественном коксе – до 80–90 кг/т. Примерно такой же расход поддерживают коксогозовые вагранки, в которых 30% кокса заменяются природным газом.

Принцип энергетической целесообразности применим и при выборе оптимальных средств очистки выбросов в зависимости от требований экологии. На рис. 1 представлена классификация известных средств очистки выбросов плавильных агрегатов исходя из соотношения «эффективность очистки (η) / приведенная стоимость ($K(\Sigma)$)» с учетом удельных затрат на эксплуатацию и стоимость аппаратов очистки.

Общее количество высокодисперсных частиц (Z) в выбросах плавильных агрегатов коррелируется с удельными расходами энергии ($E_{уд}$), затрачиваемыми на 1 т жидкого металла, и с максимальной температурой в рабочем пространстве: $Z = f(E_{уд}, t_{max})$.

В вагранке на 1 т чугуна расходуется $(2,5-3,0) \cdot 10^3$ кДж, а максимальная температура (t_{max}) составляет 1750–1850 °С. При горячем дутье $t_{max} = 1900-2100$ °С.

Для расчета Z используют зависимость переноса частиц от энергии:

$$Z = Ae^{\alpha E_{уд}^\beta}, \ln Z = f(\alpha E_{уд}^\beta),$$

где коэффициенты A , α и β определяются экспериментально для каждого типа-размера плавильного агрегата и зависят от типа топлива, используемого сырья и технологического режима, для вагранок: $\alpha = 2,89-2,91$, $\beta = 0,42-0,44$. Коэффициент A коррелируется с производительностью печи.

Ваграночные аэрозоли фракцией $d < 5$ мкм содержат до 21–22% оксидов железа, а в распределенном составе – 8–9%; SiO_2 – 20–22%, среднее содержание – 40–50%; оксида магния – до 6,5%, марганца – 5, соединений серы – 2,5, меди – 2,8, цинка – 3,5% (в усредненном составе содержание указанных элементов

не превышает десятых долей процента каждого компонента). Также отличается плотность частиц: средняя – 2,0–3,0 г/см³ против 4,1–4,3 г/см³ для высокодисперсной фракции. Отличаются и магнитные свойства высокодисперсной фракции: магнитная проницаемость составляет 10⁻² ед. против 10⁻⁴ ед. для усредненных значений, что важно при использовании магнитных пылеуловителей и осадителей шлама в отстойниках.

Создание эффективных установок для дожигания оксида углерода и очистки колошниковых газов от пыли позволяет использовать вагранки в городской черте без нарушения санитарных норм. Современные экологические требования к вагранкам предполагают переоборудование установок открытого типа в закрытые агрегаты, т. е. оснащение их системой отбора и очистки газов с дополнительным побудителем тяги – дымососом. В состав таких систем входят узел дожигания газов (СО), аппараты очистки от пыли, дымосос, дымовая труба, системы КИПиА, система водооборота (в случае использования аппаратов очистки мокрого типа).

Отбор газов из вагранки может быть осуществлен ниже и выше завалочного окна. Первый способ требует использования быстродействующей, надежной аппаратуры для обеспечения безопасной эксплуатации системы.

Вторая схема использует для дожигания газов трубу вагранки, дальнейшая транспортировка газов происходит в безопасных условиях, т.е. надежность обеспечивается самой схемой системы очистки. Термический КПД обеих схем примерно одинаков, капитальные затраты по второму варианту ниже.

Для очистки от пыли промышленных выбросов широко используются сравнительно простые низкоэнергетические аппараты с удельными затратами не более 0,1 кВт·ч на 1000 м³ газа. Это циклоны различной конструкции и скрубберы (мокрые пылеуловители (МПУ)). Они обеспечивают высокую степень очистки (до 93–95%) при улавливании грубодисперсных аэрозолей с медианным диаметром $d_m \approx 50$ мкм. Однако с повышением дисперсности частиц эффективность таких аппаратов падает экспоненциально: фракции размером < 5 мкм улавливаются не более чем на 20%, а микронные частицы практически не осаждаются.

Доля мелких фракций при вторичной плавке металлов составляет 20–90% в зависимости от типа агрегата и максимальных температур в рабочей зоне.

В настоящее время используются три основных типа аппаратов тонкой очистки: трубы (скрубберы) Вентури, электро- и тканевые фильтры.

Трубы Вентури отличаются простотой конструкции, компактностью, сравнительно низкими капитальными затратами, возможностью применения для очистки высокотемпературных, агрессивных и горючих газов. Но они имеют высокие энергозатраты (> 5–10 кВт·ч на 1000 м³), что обусловлено инерционным механизмом пылеулавливания. Системы очистки выбросов плавильных агрегатов с трубами Вентури (рис. 2), разработанные специалистами БНТУ и ГГТУ им. П. Сухого, успешно прошли апробацию на вагранках, электродуговых печах и даже конвертерах (Дарницкий ВРЗ, г. Киев).

В качестве ресурса снижения удельных энергозатрат можно использовать для пылеосаждения эффект конденсации и транспортную магистраль, имеющую в двух- и многоступенчатых системах очистки значительную протяженность (до 100 м). При этом время пребывания аэрозолей в них составляет 3–10 с против 0,3–0,5 с в скрубберах (мокрых пылеуловителях) и 0,08–0,05 с в трубах Вентури. Такое увеличение продолжительности обработки существенно повышает эффективность осаждения мелких фракций пыли за счет термодиффузионного (диффузиофорез) и градиентного механизмов пылеосаждения, которые в скоростных аппаратах не играют заметной роли, так же как и механизм зацепления. Отмеченная на рис. 1 двухступенчатая система пылегазоочистки с конденсационным пылеуловителем 22 имеет наиболее высокое соотношение «эффективность/энергозатраты» вследствие сочетания нескольких механизмов пылеулавливания, включая конденсационный.

Эффективность улавливания пыли N_q за счет различных механизмов конденсации зависит от количества водяных паров (Δy), сконденсировавшихся в аппарате. Математическая обработка данных позволила получить уравнение:

$$N_q = 1,97\Delta y^{0,34}.$$

Наилучшие результаты могут быть получены при высокой начальной температуре газов и подаче на орошение горячей воды, что фактически происходит при длительной работе печей.

Суть очистки газов от пыли с использованием эффекта конденсации заключается в том, что процесс осуществляется на частицах пыли, служащих центрами конденсации. В результате на частичках форми-

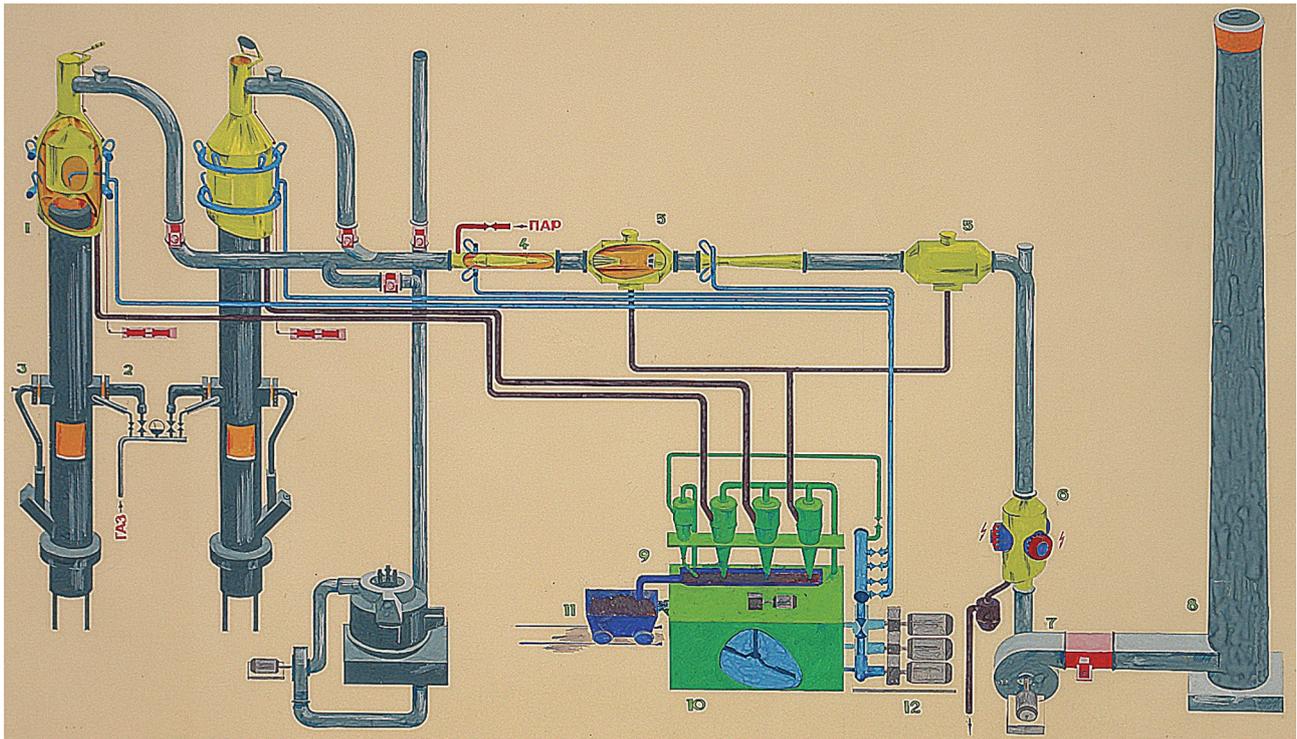


Рис. 2. Комплексная система пылегазоочистки, реализованная на Дарницком ВРЗ (г. Киев, Украина): 1 – мокрый пылеуловитель (МПУ); 2 – узел дожигания CO с помощью природного газа; 3 – узел дожигания CO с помощью отвода части ваграночных газов из шахты вагранки; 4 – труба (скруббер) Вентури; 5 – лопастной каплеуловитель; 6 – каплеуловитель с электромагнитной системой пылесажения; 7 – дымосос; 8 – труба дымовая; 9 – гидроциклон; 10 – резервуар сливной; 11 – бак для шлака; 12 – насос

руются капли, которые по мере укрупнения могут быть удалены из газового потока при помощи простых каплеулавливающих аппаратов. При использовании эффекта конденсации для очистки необходимо создать условия пересыщения за счет охлаждения. При этом скорость охлаждения газов должна соответствовать скорости выделения скрытой теплоты парообразования:

$$\frac{dq}{d\tau} J \leq \frac{dt}{d\tau} (c_p).$$

Охлаждение газа и его пересыщение водяными парами может происходить в результате адиабатического расширения, разбавления более холодным газом или подачи диспергированной воды.

По тракту потока газов, отбираемых из МПУ, происходит интенсивная конденсация паров при их охлаждении до температуры перед дымососом 30–35 °С. За счет каплеуноса и образования конденсата на расстоянии 10 м от пылеуловителя в 1 м³ газа содержится до (2–5) · 10⁵ капель воды размером до 1 мм.

Концентрация пыли по тракту очистки до дымовой трубы включительно уменьшается до 0,05–0,15 г/м³. Энергозатраты в системе, включая транспортирование газа, составляют 2,0–2,2 кВт·ч/1000 м³, что примерно втрое ниже, чем требуется для обеспечения очистки той же эффективности в напорной трубе Вентури. Система позволяет сократить удельный расход воды на очистку за счет ликвидации потерь капельной влаги из пылеуловителей и конденсации паров. Абсолютная влажность газов снижается с 250–400 до 30–50 г/м³, т. е. в 8–10 раз.

Эффект конденсации дает возможность создать систему пылеулавливания, где выбросы от плавильного агрегата доводят до состояния насыщения обработкой в мокром аппарате очистки, а затем охлаждают, в результате чего происходит конденсация в объеме. Частицы пыли с конденсированной на них жидкостью будут оседать под действием силы тяжести, тем самым, очищая газы от пыли.

В отходящих газах плавильных печей содержатся токсичные оксиды серы (особенно в ваграночных газах) и азота (последние особенно характерны для дуговых печей). Первые хорошо растворяются в воде и поэтому одновременно с обеспыливанием происходит их абсорбция. Причем увеличение времени пребывания оксидов в насыщенных парах воды существенно повышает эффективность абсорбции. В свою очередь присутствие оксидов серы повышает точку росы, увеличивая таким образом интенсивность каплеобразования и обеспыливания. Вода на сливе из каплеуловителей приобретает кислую реакцию

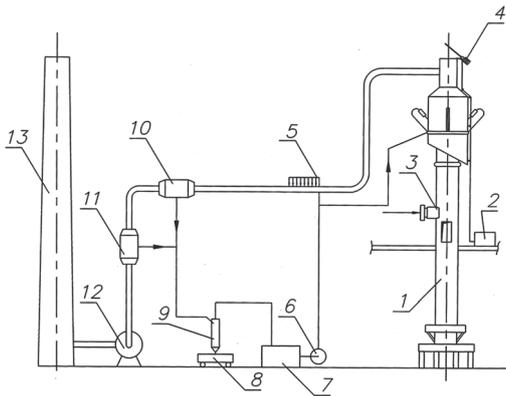


Рис. 3. Схема системы очистки с конденсационным пылеулавливанием: 1 – вагранка; 2 – привод клапана; 3 – узел дожигания; 4 – клапан; 5 – система орошения; 6 – гидронасос; 7 – бак оборотной воды; 8 – тележка с бадьей для шлама; 9 – гидроциклон; 10 – каплеуловитель горизонтальный; 11 – каплеуловитель вертикальный; 12 – дымосос; 13 – дымовая труба

(рН 6–6,5 и ниже), что требует ее периодической нейтрализации в сливном резервуаре. Концентрация оксидов серы на выходе из системы снижается до 0,02–0,05 г/м³ при исходной 0,2–3,0 г/м³. Концентрация NO снижается с 0,05–0,15 до 0,02–0,04 г/м³.

Система мокрой пылегазоочистки с использованием конденсационного эффекта была апробирована на ряде предприятий Беларуси и РФ. В качестве примера можно привести данные по эффективности очистки ваграночных газов на заводе «Стройэк» в г. Челябинск, вагранки которого оснащены низкоэнергоемкой двухступенчатой системой пылегазоочистки. Вагранки были спроектированы УП «Технолит» совместно с ГГТУ им. П. О. Сухого и введены в эксплуатацию в 2016 г. (рис. 3).

Качество очистки выбросов в указанной системе характеризуют следующие данные по остаточным концентрациям основных загрязняющих веществ: пыль (взвешенные частицы) – 19,96±4,99 мг/м³; CO – 200,95±50,24; NO – 9,77±0,99; SO₂ – 15,52±1,38 мг/м³. Полученные концентрации существенно ниже, чем требования норм ПДВ и ТНПА.

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 КПД, но и улучшает экологические характеристики агрегата. Горячее дутье повышает производственную гибкость печей, что, конечно, реализуется при соответствующем уровне автоматизации (развитой системе КИПиА, компьютерном управлении) и квалифицированном персонале.

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. Еще более заметно повышение температуры шлака, что сказывается на его активности в металлургических процессах. Отсюда стремление довести нагрев дутья вагранок до уровня 500–600 °С.

Такой рекуператор по заказу казахстанской фирмы ООО «Восток-Универсал» был разработан УП «Технолит» и ГГТУ им. П. О. Сухого и внедрен на заводе «Изотерм» (г. Усть-Каменогорск) для комплексной ваграночной установки, включающей водоохлаждаемую вагранку закрытого типа, систему очистки отходящих газов от пыли, состоящую из циклона, тканевого фильтра и дымососа, систему дозирования и загрузки шихты, систему КИПиА с компьютерным управлением и установкой технического зрения.

Разработанный рекуператор представляет собой выносной двухступенчатый агрегат, состоящий из камеры дожигания ваграночных газов, радиационного щелевого рекуператора, конвективного трубчатого рекуператора, системы подачи воздуха с управляющей арматурой и вентилятором и системы КИПиА. Рекуператор устанавливается на трассе отходящих газов после тканевого фильтра на стороне дымососа и соответственно на трассе подачи дутья между нагнетателем и вагранкой (рис. 4, 5). Отходящие газы проходят последовательно циклон и тканевый фильтр ФРИК-455, где обеспыливаются до уровня <20 мг/м³, после чего подаются в камеру дожигания рекуператора.

Выносной рекуператор подобного типа – достаточно дорогостоящее сооружение, однако экономический эффект, полученный от его реализации, составил около 800 тыс. долл. США и обеспечил окупаемость системы менее чем за 1 год.

Для вагранок открытого типа разработана и апробирована конструкция двухходового щелевого рекуператора, встроенного в шахту (трубу) вагранки. Пример исполнения такого рекуператора на вагранке производительностью 15 т/ч показан на рис. 6. 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 300–350 °С.

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 температурой ~1000 °С

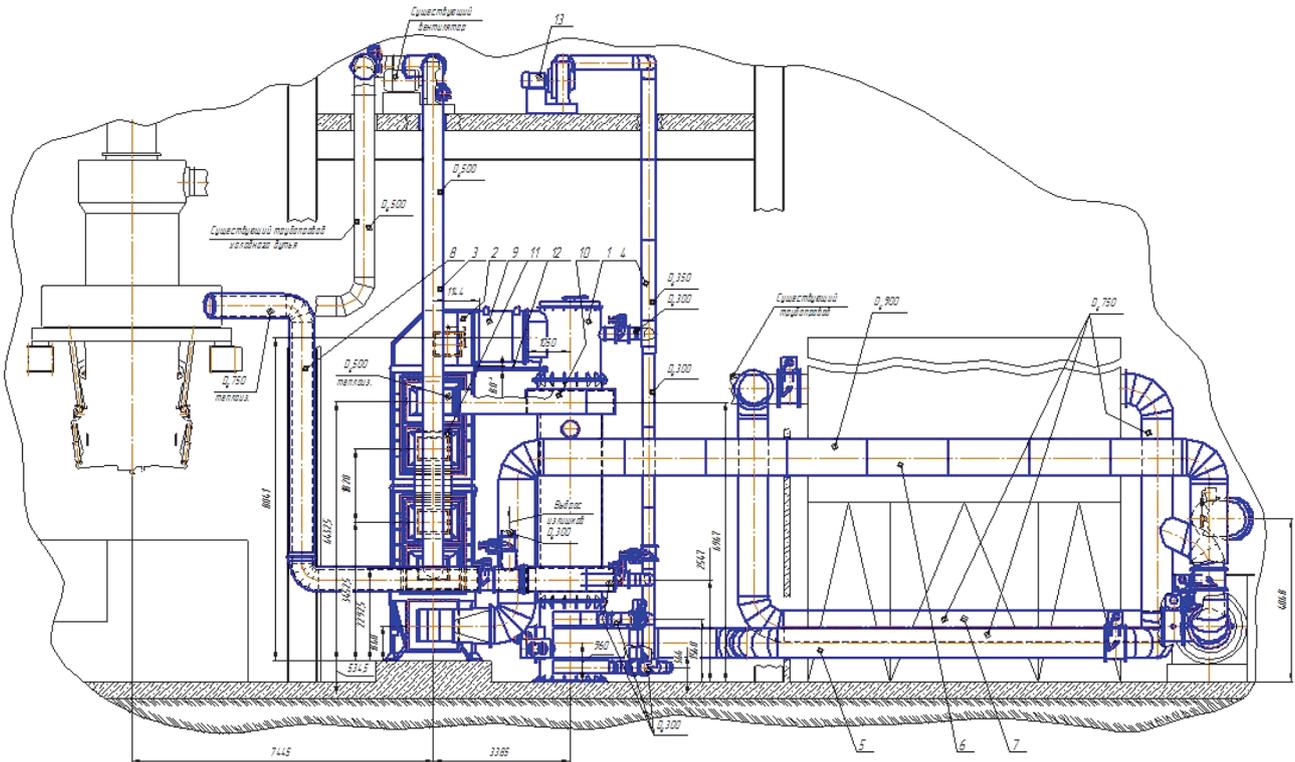


Рис.4. Система рекуперации тепла вагранки закрытого типа (цветом выделен рекуператор)

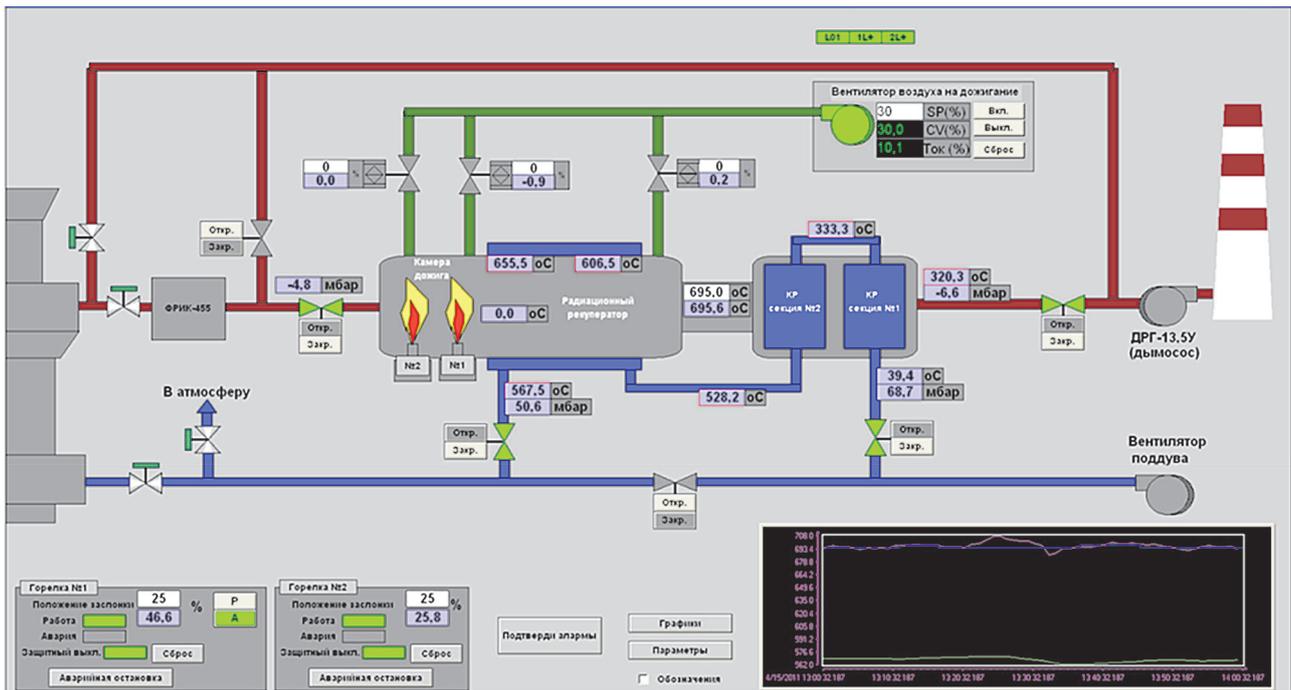


Рис. 5. Дисплей управляющего компьютера системы рекуперации

в течение не менее 0,5 с, или в пересчете – при высоте трубы вагранки, выполняющей роль камеры дожигания, не менее 8–10 диаметров в свету. Целесообразно для интенсификации горения (обеспечения достаточного количества окислителя – кислорода) вводить ниже уровня завалочного окна на 0,5–1,0 м воздух в количестве примерно 5–10% от расхода дутья.

Одно из условий стабильной работы узла дожигания – отсутствие случайных разбавлений ваграночных газов воздухом, подсосываемым через завалочное окно. В связи с этим наиболее рациональным является применение боковой завалки шихты.

Переход на боковую загрузку существенно улучшает условия труда на колошниковой площадке, снижает трудозатраты и численность обслуживающего персонала. Обязательным условием стабильной рабо-

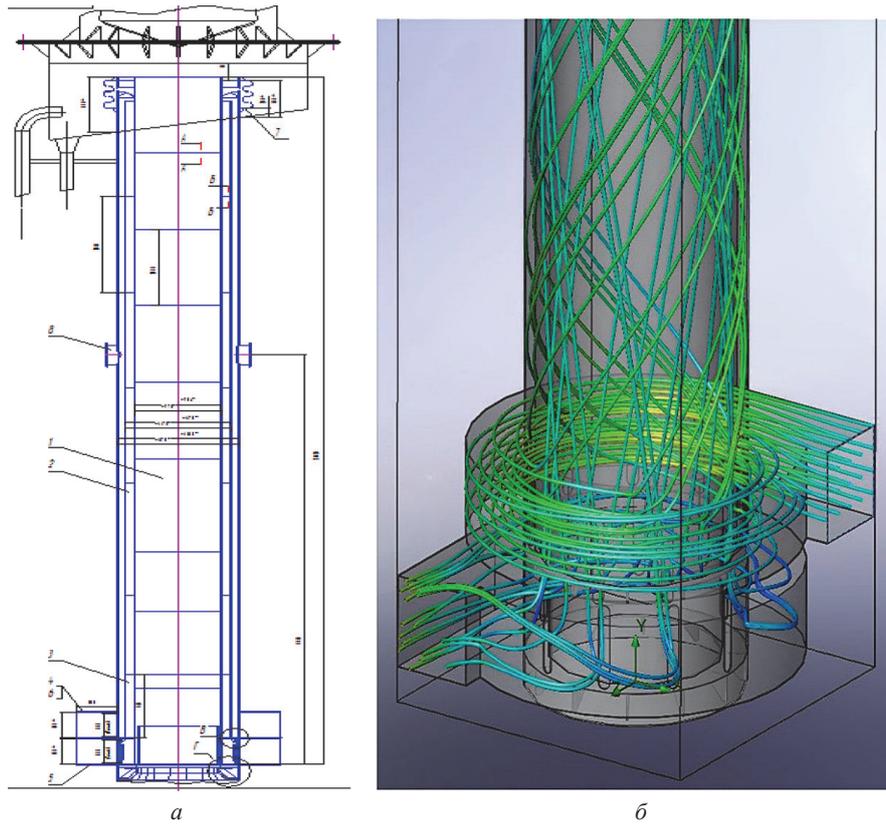


Рис. 6. Радиационный рекуператор для вагранки открытого типа: а – общий вид рекуператора, встроенного в вагранку 15 т/ч; б – траектории течения воздуха в рекуператоре

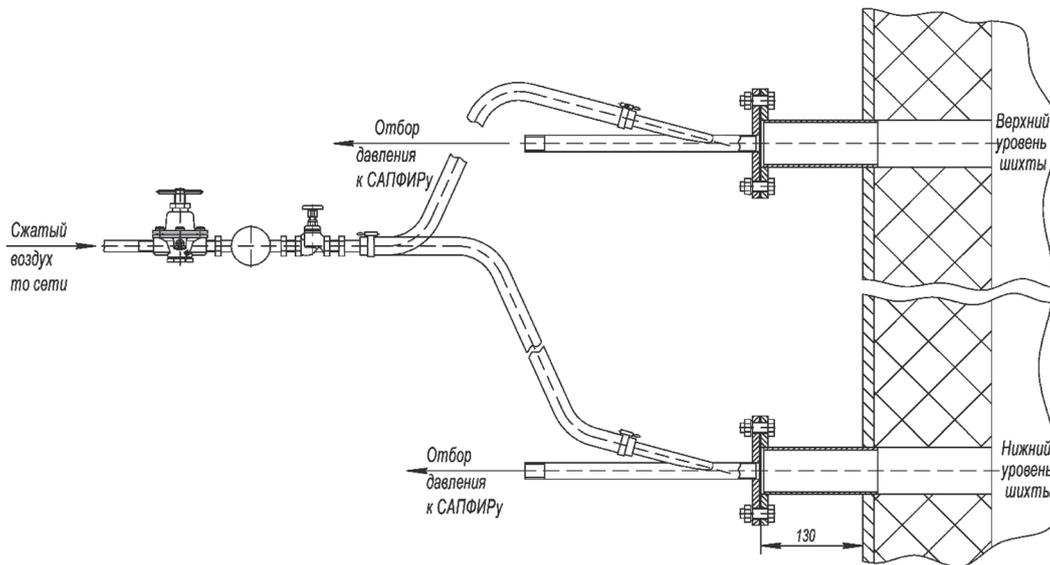


Рис. 7. Схема установки датчиков контроля уровня завалки

ты вагранки и узла дожигания является поддержание заданного уровня шихты, что обеспечивается путем оснащения печи системой контроля уровня завалки. УП «Технолит» и ГГТУ им. П. Сухого предлагают простое и надежное решение этой задачи – систему контроля, работа которой основана на использовании электроконтактных датчиков давления, стабильно фиксирующих наличие или отсутствие шихты в шахте вагранки на уровне установки датчика (рис. 7). Система впервые была опробована на модернизированной 10-тонной вагранке ОАО «Могилевский металлургический завод» в 2005 г., и сегодня уже с успехом используется на вагранках различной производительности как в Беларуси, так и на российских предприятиях.

Энергоэффективность печей коррелируется с их экологическими параметрами: чем выше КПД печи, тем меньше энергии она затрачивает на «производство» вредных выбросов. Поэтому все мероприятия

по сокращению удельных энергозатрат автоматически приводят к улучшению экологических характеристик плавильных агрегатов.

Комплексный подход к решению экологических проблем при плавке металлов является наиболее эффективным и обеспечивает снижение затрат на системы пылегазоочистки и минимальные сроки их окупаемости.

Сегодня низкоэнергоемкие многоступенчатые системы мокрой пылеочистки со второй ступенью очистки конденсационного типа, предлагаемые УП «Технолит» и ГГТУ им. П. О. Сухого, уже достаточно хорошо известны не только в Беларуси, но и за её пределами. Только за первую половину 2018 г. заявки на проектирование и внедрение таких систем поступили от ОАО «Транспневматика» (г. Первомайск, Нижегородская обл., РФ), ОАО «Пуховичский опытно-экспериментальный завод» и ОАО «Лидский литейно-механический завод» (Беларусь).