

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНЫМИ ГОРЕЛКАМИ В КУЗНЕЧНОЙ ПЕЧИ КАМЕРНОГО ТИПА

*Выполнена сравнительная оценка эффективности применения высокоскоростной рекуперативной горелки ГСР-150КР и зарубежных аналогов по показателям: коэффициент полезного действия рекуператора и коэффициент использования тепла печи, оборудованной этими горелками. Проведен анализ особенностей управления высокоскоростными рекуперативными горелками и проведено сравнение ориентировочных показателей инвестиций в нагрев газом и электричеством в применении для высокотемпературных процессов.*

**Ключевые слова:** кузнечная печь, высокоскоростная рекуперативная горелка.

### Постановка проблемы

При эксплуатации кузнечных печей важная проблема – это повышение энергоэффективности агрегата. На большинстве работающих подобных печах с отходящими газами теряется более 50 % потенциала тепловой энергии. Следовательно, потенциал энергосбережения в данной ситуации является весьма существенным, а грамотное использование этого потенциала даст возможность сократить издержки предприятий.

### Анализ последних исследований и публикаций

Изначально рекуперативные горелки были разработаны для того, чтобы рационально использовать тепло дымовых газов для подогрева воздуха горения в непосредственной близости от агрегата, без потерь тепловой энергии при транспортировке горячих газов по трубопроводам [1,2].

Любой рекуператор представляет собой теплообменник, который обеспечивает подогрев поступающего воздуха горения за счет тепловой энергии отходящих газов и экономит около 30 % энергии по сравнению с системой, использующей холодный воздух горения.

Но рекуператор, как правило, не может обеспечить подогрев воздуха до температуры, превышающей 550...600 °С. Рекуперативные горелки используются, в том числе, и при достаточно высокой рабочей температуре процесса (до 800...1300 °С) [3,4,5].

Высокоскоростные рекуперативные горелки дают реальную возможность снизить удельный расход природного газа и сократить текущие эксплуатационные затраты теплового агрегата. Подобные горелки оснащены высокоэффективным теплообменником-рекуператором либо из

металла, либо из керамики, в котором воздух, идущий на горение, нагревается до 700...770 °С. При этом, коэффициент использования топлива находится на уровне 80...86 % [6,7].

Весьма важное ограничение для современных рекуперативных горелок – это противоречие между требованиями по сокращению выбросов вредных веществ в окружающую среду и требованиями энергоэффективности технологии. Объемы образования  $\text{NO}_x$  при использовании топлив, не содержащих азот, зависят, в основном, от температуры сжигания топлива, концентрации кислорода и времени нахождения газов в зоне горения в печи.

При сжигании при традиционной технологии результатом подогрева воздуха до значительных температур является высокая пиковая температура пламени, которая в сочетании со значительным временем пребывания приводит к существенному увеличению интенсивности образования  $\text{NO}_x$ , что неприемлемо по современным требованиям по экологической безопасности [3,8].

### Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является провести оценку эффективности применения высокоскоростной рекуперативной горелки на кузнечных печах камерного типа, используя в качестве горелки новую высокоскоростную рекуперативную горелку типа ГСР-150КР, и изучить особенности по управлению подобными горелками в печах, а также провести анализ по мощности и стоимости различных рекуперативных горелок.

### Основной материал исследования

Чтобы в достаточной мере обеспечить необходимые параметры качества нагрева металла,

нужно использовать новые горелочные устройства. Также это даст возможность обеспечить равномерный нагрев всех заготовок в печи, что особенно актуально для кузнечных печей камерного типа.

Преимущество новых рекуперативных горелок перед старыми состоит в том, что они снабжаются блоками автоматики, которая дает возможность эффективно регулировать соотношение газ – воздух в тепловом агрегате без вмешательства специалистов.

Эффективность любой современной рекуперативной горелки можно оценить, используя такой показатель, как коэффициент полезного действия ( $\eta_r$ ) рекуператора. При этом коэффициент полезного действия рекуператора находится как соотношение между количеством теплоты, полученной воздухом в рекуператоре, и количеством теплоты, содержащейся в продуктах сгорания, входящих в рекуператор, по следующей формуле [1]:

$$\eta_r = \frac{L_B \times (C_{B2}t_{B2} - C_{B1}t_{B1})}{B_H \times V_\alpha \times c_{ПГ} \times t_{ПГ}} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $B_H$  – расход топлива через горелку, м<sup>3</sup>/с;  $L_B$  – действительное количество воздуха, подаваемое для сжигания единицы топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $C_{B2}$  – теплоемкость воздуха при температуре его подогрева в рекуператоре, кДж/(м<sup>3</sup>К);  $t_{B2}$  – температура подогрева воздуха в рекуператоре, °С;  $C_{B1}$  – теплоемкость воздуха при температуре  $t_{B1}=20$  °С, кДж/(м<sup>3</sup>К);  $V_\alpha$  – объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании единицы топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c_{ПГ}$  – теплоемкость продуктов сгорания на входе в рекуператор, кДж/(м<sup>3</sup>К);  $t_{ПГ}$  – температура продуктов сгорания на входе в рекуператор, °С.

Расчет коэффициента полезного действия, проведенный по формуле [1], для известных рекуперативных горелок иностранных производителей, на основании данных рекламных материалов компаний – производителей горелок по температуре подогрева воздуха и температуре продуктов сгорания при коэффициенте расхода воздуха 1,1, продемонстрировал, что этот показатель составляет 40 %.

Для горелки ГСР-150КР, предложенной для оснащения в кузнечных печах камерного типа при температуре подогрева воздуха 770 °С, температуре в печи 1300 °С и коэффициенте расхода воздуха 1,15 коэффициент полезного действия составит 60,7 %.

Можно сделать вывод, что коэффициент полезного действия высокоскоростной горелки ГСР-150КР более чем на 20 % превышает КПД

известных горелок подобного типа.

Кроме этого, эффективность использования рекуперативной горелки можно оценить и по коэффициенту использования тепла для печи  $\eta_{ИТ}$ , оборудованной данными горелками.

Этот коэффициент может быть рассчитан по следующей формуле [2]:

$$\eta_{ИТ} = \left( 1 \times \frac{V_\alpha \times c_{ПГ1} \times t_{ПГ1}}{Q_H^P + L_B \times (C_{B2}t_{B2} - C_{B1}t_{B1})} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

где  $L_B$  – действительное количество воздуха, подаваемое для сжигания единицы топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $C_{B2}$  – теплоемкость воздуха при температуре его подогрева в рекуператоре, кДж/(м<sup>3</sup>К);  $t_{B2}$  – температура подогрева воздуха в рекуператоре, °С;  $C_{B1}$  – теплоемкость воздуха при температуре  $t_{B1}=20$  °С, кДж/(м<sup>3</sup>К);  $V_\alpha$  – объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании единицы топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c_{ПГ1}$  – теплоемкость продуктов сгорания после горелки, кДж/(м<sup>3</sup>К);  $t_{ПГ1}$  – температура продуктов сгорания после горелки, °С.

Если провести расчет по формуле (2) для известных зарубежных горелок с учетом температуры продуктов сгорания после горелки 550 °С при их температуре на входе в горелку 1000 °С, то этот коэффициент использования тепла составит 75,6 %.

В то время как для высокоскоростной горелки ГСР-150КР при температуре дыма после горелки 400 °С, этот показатель будет достигать отметки в 85,5 %.

Если проанализировать вышеприведенные данные расчетов, теплотери в кузнечной печи при использовании наших высокоскоростных горелок ГСР-150КР примерно на 10 % ниже, чем при использовании известных подобных марок горелок.

Отсюда следует, что высокоэффективные горелки ГСР-150КР, рекомендованные к установке на кузнечной печи камерного типа, позволят экономить примерно на 10 % больше газового топлива в сравнении с рекуперативными горелками, которыми оснащены данные тепловые агрегаты в настоящий момент.

Помимо того, невысокая температура продуктов сгорания после рекуператора, объясняющаяся высокой температурой подогрева воздуха, дает широкие возможности по снижению расхода воздуха на эжекцию продуктов сгорания в высокоскоростных горелках ГСР-150КР, т.к. не нужно разбавлять продукты сгорания воздухом для того, чтобы снизить их температуру при последующей их транспортировке по дымопроводам.

В высокоскоростной рекуперативной горелке ГСР-150КР соотношение между расходом воздуха на эжекцию и горение примерно 0,9, тогда как в других известных рекуперативных горелках этот показатель колеблется в пределах 1,7...2. Это приводит к дополнительным энергетическим затратам на привод вентилятора, что, в свою очередь, существенно сокращает общую эффективность применения горелок подобного типа.

При всех вышеуказанных преимуществах высокоскоростная рекуперативная горелка ГСР-150КР имеет примерно такие же габариты, как и зарубежные горелки схожего типа, но она существенно дешевле импортных горелок от известных производителей, таких как ECOMAX, RECUMAT, RECUFIRE и др.

Проведем сравнение между конвекционной системой с центральным рекуператором и рекуперативными горелками (рис. 1). Главное различие заключается в расположении и конструкции теплообменника в печи.

В рекуперативных горелках проточные каналы и поверхность теплопередачи лучше оптимизированы по технологическим параметрам, чем при применении центрального рекуператора в печи, и естественно, обеспечивается намного

более высокая удельная мощность теплопередачи.

При применении высокоскоростных рекуперативных горелок нужные для центрального рекуператора воздушные короба и трубопроводы на «горячей» стороне для подачи теплого воздуха просто отсутствуют за ненадобностью. А сами уходящие газы при их использовании собираются в коллектор, изоляция при этом обычно не нужна.

Для центральных рекуперативных систем автовентиля горячего воздуха обязаны надежно функционировать на всех горелках при воздействии высокой температуры и при давлениях от 2 до 6 кПа при достаточно высокой частоте включения вентилялей. Кроме того, существуют серьезные проблемы по равномерному распределению горячего воздуха на каждую отдельную горелку в кузнечной печи.

К сожалению, не существует общего мнения у специалистов-теплотехников и специалистов-производственников на металлургических предприятиях по расходам в системах с центральным рекуператором и с рекуперативными горелками при одинаковой обратной теплоотдаче. Необходимо проводить комплексные исследования на печах для каждого конкретного случая.

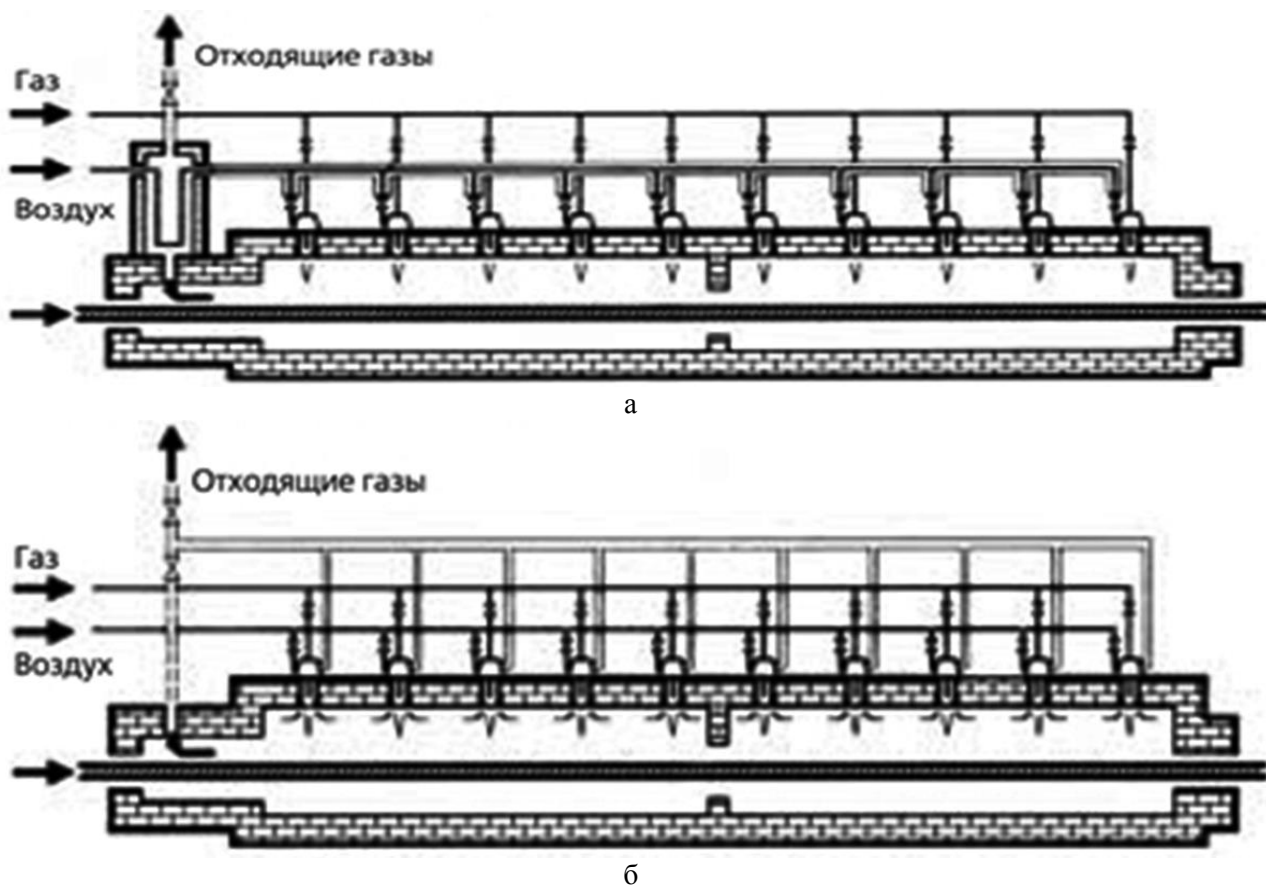


Рис. 1. Варианты конструкционного расположения теплообменника в печи: а – система с центральным рекуператором; б – система с рекуперативными горелками

В кузнечных печах камерного типа предварительный подогрев воздуха с температурой примерно на 50 % выше температуры дымового газа до рекуператора печи. Реально этого можно добиться только в современных высокоскоростных рекуперативных горелках, в частности на ГСР-150КР.

Показанная на рис. 1 часть потока отходящего газа позже проходит через зону предварительного подогрева.

Важная область в любых научных разработках в горелочной технике – это управление высокотемпературным горением, т.е. работой современных высокоскоростных рекуперативных горелок в кузнечных печах камерного типа.

Высокий импульс пламени может быть использован только на горелке с управлением вкл./выкл. Подвод энергии полностью достигается с помощью тактового или кругового управления, несмотря на псевдопостоянное регулирование. Для таких систем необходимо достаточное количество горелок, в особенности, если регулировочное число велико и из-за давления в печи необходима постоянная работа минимум одной горелки.

При управлении вкл./выкл., которое сегодня довольно широко используется, трубная разводка становится проще, чем при пропорциональном зональном управлении. Поток газа, сжигаемого воздуха и отходящего газа настраивается на каждой горелке на единственно возможную оптимальную рабочую точку. Естественно, наилучшие результаты работы управления вкл./выкл. достигаются при подключении к цифровой компьютерной системе.

Хотя избыток воздуха у рекуперативных горелок из-за низкой температуры отходящего газа не так сильно влияет на потери, необходимо стараться удерживать смесь в узком диапазоне с отклонением до 10 %. Так как сопротивление рекуператора изменяется вместе с температурой предварительного нагрева, обычная регулировка для постоянного давления здесь неприменима.

Пневматическая регулировка соотношения может держать постоянной смесь, а не потоки. При пуске при холодной горелке они становятся максимальными, что нежелательно для стабильности сгорания. Регулировка соотношения применяется при пропорциональном управлении зонами, но для каждой отдельной горелки это очень проблематично.

При регулировании потоки газа, равно как и воздуха, в рабочей точке удерживаются постоянными с помощью регулятора разности давления, также регулируется и горючая смесь. Колебания давлений в сети, которые неизбежны из-за

конструктивной формы вентилятора или системы трубопроводов, компенсируются на каждой горелке, равно как и колебания встречного давления в рекуператоре, печи или системе отвода дымовых газов.

Дымовые газы, как правило, просто отсасываются с помощью воздушного потока через каждую горелку, для чего к эдуктору подводится воздух по объему до 1,5 раза больше, чем объем воздуха для горения. Если этого необходимо избежать, то отходящие газы отсасываются через соответствующий клапан. Тепло отходящего газа в таком случае может быть использовано в дальнейшем. С помощью давления отсоса можно регулировать давление в печи.

Настройка рециркуляции отходящего газа каждой горелки не оказывает большого воздействия на рекуперацию тепла.

Рабочая область и область стабилизации описанных рекуперативных горелок для различных размеров представлены на рис. 2. В нижнем стехиометрическом режиме отходящий газ может использоваться для получения защитной атмосферы.

Пламя остается стабильным также при большом избытке воздуха, так что в особых случаях газ может регулироваться в соотношении 4:1 при полном объеме воздуха. Таким образом, импульс горелки в печи остается сохраненным при умеренных затратах, так как воздух на горение предварительно сильно нагревается.

Проанализируем такие важные характеристики, как мощность и стоимость рекуперативной горелки.

Рекуперативные горелки используются в различных типах печей в температурном диапазоне 500...1300 °С. При мощности более 250 кВт достигаются предельно допустимые габариты горелок с предварительным нагревом воздуха. Поэтому рекуперативные горелки мало находят применение для нагревательных печей очень большой мощности, например, на прокатных станах, но идеально подходят для небольших кузнечных камерных печей для нагрева штамповок и поковок.

Влияние вида газа, исключая «бедные» газы, незначительно, поскольку количество воздуха для горения на единицу мощности остается почти постоянным (1 м<sup>3</sup>/ч на 1 кВт).

Относительный предварительный нагрев воздуха несколько увеличивается при одинаковых условиях вместе с температурой отходящих газов, так как возрастает коэффициент теплопередачи.

Давление в камере сгорания напрямую влияет на мощность рециркуляции в печи.

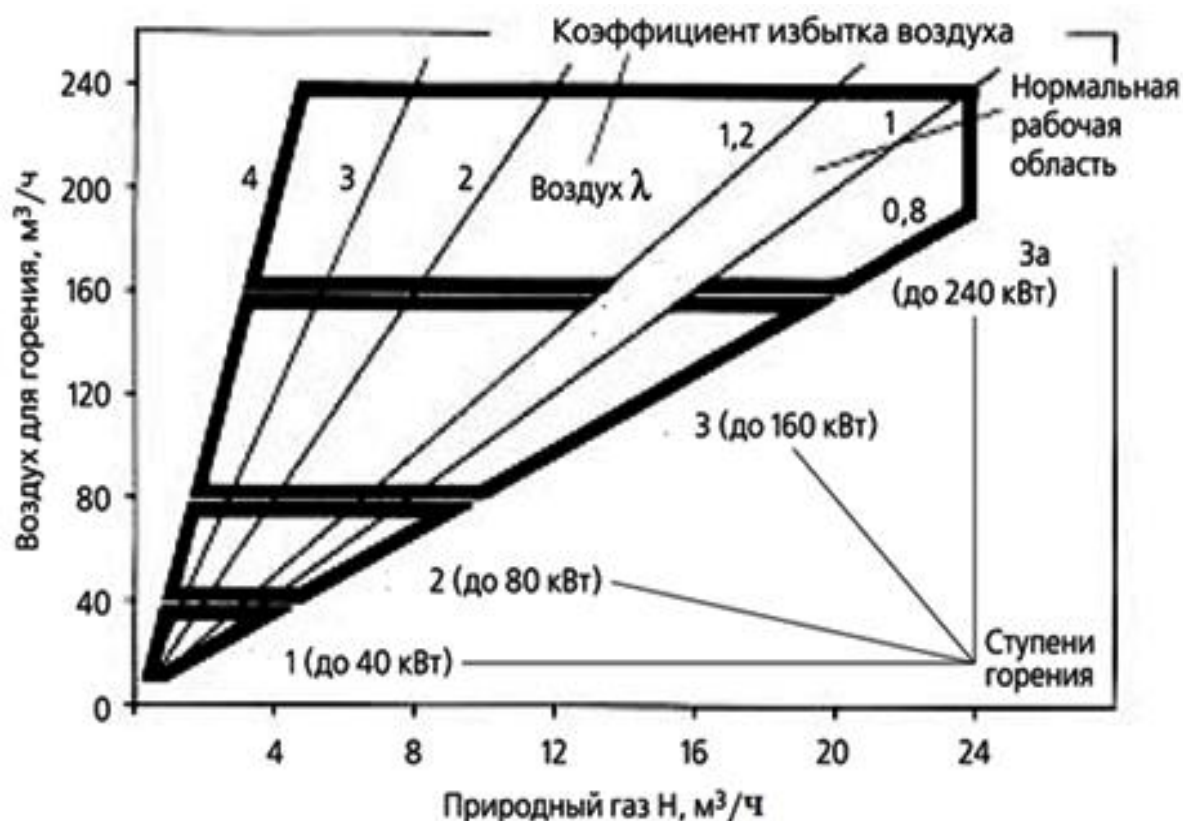


Рис. 2. Рабочая область и участок стабилизации высокоскоростной рекуперативной горелки

Диапазон давления от 1 до 2 кПа, достигаемый с помощью одноступенчатых вентиляторов (максимально 10 кПа), при необходимости может увеличиться при увеличении предварительного давления воздуха, но при этом следует обратить внимание на коэффициент шума.

Показатель NO<sub>2</sub> в сухом отходящем газе необходимо всегда рассматривать с предварительным нагревом воздуха. Показатель 220 ppm NO<sub>2</sub> при предварительном нагреве 770 °С, отражает сегодняшний уровень развития.

В табл. 1 приведены ориентировочные показатели инвестиций в нагрев газом и электричеством в применении для высокотемпературных процессов. Инвестиции приведены в евро для удобства сравнения с зарубежными источниками.

Данные по инвестициям в табл. 1 относятся к величине потребляемой мощности горелки от 20 до 240 кВт.

У высокоскоростных горелок без рекуператоров удельные затраты зависят в основном от размера горелки. Это влияние у рекуперативных горелок снижается, в особенности у излучающих радиантных труб, так как требуемые поверхности рекуператоров и поверхности излучения радиантных труб увеличиваются пропорционально величине мощности.

Удорожание рекуператора в пределах 40...70

евро на 1 кВт должно в каждом случае сопоставляться с более высоким коэффициентом полезного действия (коэффициентом использования топлива). Ежегодная экономия в евро на 1 кВт мощности соответствует относительной экономии, умноженной на удельную цену газа в евро/кВт·ч и ежегодную эксплуатацию горелок в часах.

- это можно пояснить на следующем примере:
- удельная цена газа – 0,03 евро/кВт·ч;
- экономия благодаря предварительному нагреву воздуха – 30 %;
- время работы горелки в год – 5000 часов.

Соответственно, годовая экономия на 1 кВт мощности составит 45 евро при использовании высокоскоростных рекуперативных горелок.

В данном примере видно, что дополнительные расходы на рекуператор амортизируются в зависимости от размера горелки за период от одного до двух лет.

В зоне выдержки с меньшим временем работы горелок в год частично используются горелки с системой ступенчатого сжигания топлива, но без рекуператора.

В табл. 1 приведено сравнение нагрева печей с различным оснащением. Сегодня, как правило, с целью облегчения технического обслуживания используют элементы горелок, которые можно заменить снаружи.

Табл. 1. Сравнение размера инвестиций для печей на газовом и электрическом топливе

Вид нагрева	Инвестиции, евро/кВт
Высокоскоростные горелки с низким содержанием NO <sub>2</sub>	9...70
С исполнительным элементом, зажиганием и контролем	20...160
Дополнительно со встроенным рекуператором	50...230
Дополнительно с излучающей трубой	160...360
Электрический нагрев с несущей трубой в печи	≈35
Электрический нагрев с несущей трубой в печи в качестве вставки	≈140
Дополнительно трансформатор	≈250
Дополнительно с защитной трубой	≈350

В ценовые показатели для газового нагрева не включены данные по регулятору давления газа, вентилятору для воздуха горения и трубопроводу, а также по подводу электричества и силовой защите для электрического нагрева.

Для газового нагрева необходимо учитывать теплотехнический коэффициент полезного действия (коэффициент использования топлива). Сравнение показывает преимущества газового нагрева, так как удельные затраты на электрический ток почти втрое выше, чем для газа. Улучшение качества нагрева благодаря рециркуляции при прямом газовом нагреве при этом в расчет не принимается.

Высокоскоростные рекуперативные горелки предлагают значительные преимущества по сравнению с традиционными горелочными системами для кузнечных печей камерного типа в температурном диапазоне 1000...1300 °С.

Поток энергии, подаваемый в печь струей пламени, при правильном размере и расположении горелок, позволяет достичь оптимально равномерного распределения температуры.

Круговой нагрев, несмотря на режим вкл./выкл. каждой горелки, обеспечивает квазипостоянную регулировку подачи тепловой энергии.

У рекуперативных горелок относительный предварительный нагрев воздуха находится в диапазоне от 0,6 до 0,8, что выше, чем у системы с центральным рекуператором (менее 0,5). При использовании ступенчатого горения эмиссия NO<sub>2</sub> может быть значительно снижена.

### Выводы

Выполнена сравнительная оценка эффективности применения высокоскоростной рекуперативной горелки ГСР-150КР и зарубежных аналогов по показателям: коэффициент полезного действия рекуператора и коэффициент использования тепла для печи, оборудованной этими горелками.

В результате было аргументированно доказано, что высокоэффективные горелки ГСР-

150КР, рекомендованные к установке на кузнечной печи камерного типа, позволят экономить примерно на 10 % больше газового топлива в сравнении с рекуперативными горелками, которыми оснащены данные тепловые агрегаты в настоящий момент.

Всесторонне проработаны вопросы, связанные с управлением высокоскоростными рекуперативными горелками, и проведено сравнение ориентировочных показателей инвестиций в нагрев газом и электричеством в применении для высокотемпературных процессов. Сравнение показало преимущества газового нагрева, так как удельные затраты на электроток почти втрое выше, чем для газа, и экономия в год на 1 кВт мощности – 45 евро при использовании высокоскоростных рекуперативных горелок.

### Список литературы

1. Павловец, В.М. Рекуператоры для промышленных печей: учеб. пособие. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2012. – 218 с.
2. Теория тепломассообмена: Учебник для вузов / С.И. Исаев [и др.]; под ред. С.И. Исаева. – 3-е изд. испр. и доп. – М.: МГТУ, 2018. – 464 с.
3. Jouhara, H. Waste heat recovery technologies and applications // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2018. – No.6. – P. 268-289.
4. Ceramic heat pipes for high temperature application / N. Hack [et al.] // *Energy Procedia*. – 2017. – No.120. – P. 140-148.
5. Caillat, S. Burners in the steel industry: utilization of by-product combustion gases in reheating furnaces and annealing line // *Energy Procedia*. – 2017. – No.120. – P. 20-27.
6. Рекуперативные газовые горелки ECOMAX // LBE Elster GmbH. – 2015. – 10 с.
7. Рекуперативные горелки RECUFIRE // Industrie-Brenner-Systeme GmbH. – 2015. – 8 с.
8. Бурокова, А.В. К вопросу рекуперации теплоты газов печей термообработки металлических изделий / А.В. Бурокова, Ю.А. Рахманов // *Научный журнал НИУ*

V.V. Kashayev /Cand. Sci. (Eng.)/  
Donetsk National Technical University (Donetsk)

### CONTROL OF RECUPERATIVE BURNERS IN THE FORGE FURNACE OF CHAMBER TYPE

**Background.** One of the most critical problems in the industrial operation of chamber type forge furnaces is to increase the energy efficiency of such a thermal aggregate. Most of the furnaces of this type with waste gases lose more than 50 % of the thermal energy potential. Therefore, in this situation, the potential for energy saving is very significant, and the executive use of such potential will make it possible to reduce the costs of metallurgical enterprises significantly.

**Materials and/or methods.** The task is to assess the effectiveness of the use of high-speed recuperative burner in forge furnaces using a new high-speed recuperative burner and to study the features of controlling such burners in furnaces, as well as to analyse the power and cost of different recuperative burners. In order to fully ensure all the necessary parameters of the quality of heating of billets and to increase the energy efficiency of forge furnaces, it is necessary to use new burner devices which will give uniform heating of all the billets in the furnace, which is especially suitable for forge furnaces of chamber type. Given all the features of the new high-speed recuperative burner, it is especially important to consider all aspects of controlling high-temperature combustion, i.e. the operation of modern high-speed recuperative burners in forge furnaces.

**Results.** A comparative evaluation of the efficiency of high-speed recuperative GSR-150KR burner and foreign analogues on the efficiency of the recuperator and the heat utilisation factor for the furnace equipped with these burners. The evaluation showed that GSR-150KR burners recommended to install on the forge furnace chamber type will save about 10 % more gas fuel compared with recuperative burners. The analysis of features of control of high-speed recuperative burners carried out.

**Conclusion.** In addition, a comparison of the investment indicators for gas and electricity heating for high-temperature processes made, which demonstrated the advantages of heating with gas fuel, since the specific cost of electricity is almost three times higher than for gas, and the annual savings of 1 kW of power will be about 45 euro when using new high-speed recuperative burners.

**Keywords:** forge furnace, high-speed recuperative burner.

#### Сведения об авторе

**В.В. Кашаев**

SPIN-код: 6575-3376

ORCID iD: 0000-0002-1446-803X

Researcher ID: A-3228-2016

Телефон: +380 (71) 435-20-19

Эл. почта: mar\_70\_70@mail.ru

Статья поступила 11.03.2019 г.

© В.В. Кашаев, 2019

Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров