

Рекуперативные горелки для прямого нагрева промышленных печей*

J. Wüning¹⁾

Промышленные газовые горелки служат для преобразования энергии газа в технологическое тепло. Основные цели научных разработок представлены на рисунке 1. При прямом нагреве тепло передается преимущественно путем конвекции на материал и на стенки печи. Для косвенном нагреве это относится ко внутреннему пространству излучающих труб, так как эти трубы передают тепло печи преимущественно путем излучения.

На первом месте в целях научных разработок в горелочной технике стоит, естественно, оптимизация распределения температуры в печи. Затем следует экономичность с учетом коэффициента полезного действия преобразования энергии и инвестиции, влияние на окружающую среду из-за эмиссии вредных веществ и шума и, наконец, безопасность процесса с использованием автоматики не требующей, по возможности, технического обслуживания.

Расположение горелок и распределение поступающей в печь энергии

Во время оценки промышленной печи прежде всего возникает вопрос о наиболее благоприятном расположении горелок с целью наиболее равномерного распределения температуры. Для увеличения конвекции при прямом нагреве импульс пламени преобразуется в энергию потока, для чего наиболее приемлемым является, как правило, тангенциальное обтекание полезного пространства (Рисунок 2). Для снижения пика температур в пламени требуется определенная длина потока l в отношении к диаметру d сопел горелки, чтобы избежать высокотемпературных перегревов или же температурных пятен на противоположной стенке. Длина струи l должна быть больше чем на 50 d . Проточные каналы также должны обладать достаточными размерами, чтобы тепловой поток смог полностью покрыть полезное пространство.

Данная взаимосвязь четко показывает, что при высоких требованиях к равномерности температуры в печи, подача энергии в печь должна быть распределена между как можно большим количеством горелок. Это значит увеличение пространства нагрева, однако соответственно увеличиваются расходы на строительные работы и потери в следствии большей теплоотдачи стен печи.

Рекуперативные горелки

Существенное различие между конвекционной системой с центральным рекуператором и рекуперативными горелками (Рисунок 3) состоит в расположении и конструкции теплообменника. Проточные каналы и поверхность теплопередачи в рекуперативных горелках лучше оптимизированы, чем при использовании центрального рекуператора и таким образом достигается более высокая удельная мощность теплопередачи. При использовании рекуперативных горелок отсутствуют необходимые для центрального рекуператора воздушные короба и трубопроводы на «горячей» стороне для подачи теплого воздуха. Отходящие газы при их использовании собираются в коллектор, однако, изоляция обычно не требуется.

Для системы с центральным рекуператором вентили горячего воздуха должны надежно работать на каждой горелке при воздействии высокой температуры и при давлении от 2 до 6 кПа при высокой частоте включения. Также имеются проблемы с равномерным распределением горячего воздуха на каждую отдельную горелку.



Рисунок 1: преобразование энергии газа в высокотемпературное технологическое тепло

тангенциальное обтекание полезного пространства

сопло горелки $\varnothing d$

длина потока $l > 50 \cdot d$

Канал потока $b \cdot h > 100 d^2$

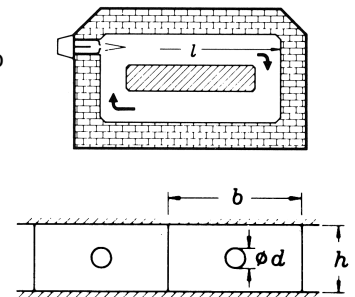
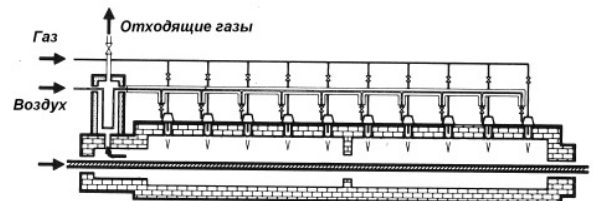


Рисунок 2: расположение горелок в печи

а) система с центральным рекуператором



б) система с рекуперативными горелками

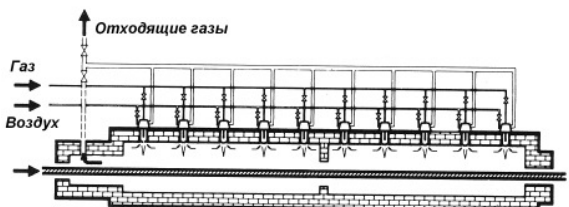


Рисунок 3: центральная рекуперативная система и система с рекуперативными горелками

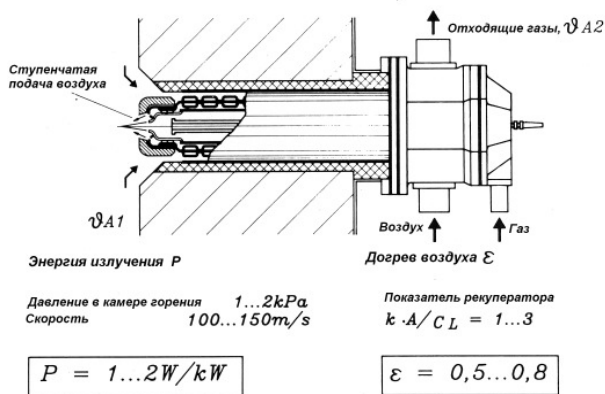


Рисунок 4: рекуперативная горелка со ступенчатым горением (немецкий патент № 34 22 229)

К сожалению, не существует общего мнения по расходам в обеих системах при одинаковой обратной теплоотдаче. Для этого необходимо исследовать отдельные случаи. Предварительный нагрев воздуха с температурой на 50% выше температуры дымового газа до рекуператора практически может достигаться только в рекуперативных горелках. Обозначенная на рисунке 3 часть потока отходящего газа позже поступает через зону предварительного нагрева.

Схема рекуперативной горелки со ступенчатым горением изображена на рисунке 4 (1). Отличительным признаком является ступенчатое сжигание в соплах в керамической камере горения, в выходном сопле которой преобладает избыточное давление от 1 до 2 кПа, приводящее к скорости на выходе от 100 до 150 м/с. Механическая энергия струи составляет тогда от 1 до 2 Вт на м³ сжигаемого воздуха или на 1 кВт общей мощности горелки. То есть горелка мощностью 100 кВт создает в печи потоки перемешивания приблизительно с такой же энергией, как и механический рециркуляционный вентилятор с рабочим колесом диаметром 400 мм. Следует отметить, что энергия потока не должна создаваться вентилятором, а происходить из увеличения объема при предварительном нагреве воздуха.

Относительный предварительный нагрев воздуха в зависимости от температуры отходящего газа на входе в рекуператор, зависит от расположения рекуператора и безразмерной величины k следующим образом A/CL (k - показатель теплопередачи в Вт/м²К, A - площадь в м², CL - теплоемкость потока воздуха горения в Вт/К). Средний предварительный нагрев воздуха $\varepsilon \approx 0,65$ означает при температуре отходящего газа на входе в 1000° температуру воздуха 650°.



Рисунок 5: тактовое управление вкл/выкл. горелкой

Основы расчета описаны в (2). При температуре печи свыше 1100°C носик горелки защищается керамическим экраном (рисунок 4).

Управление рекуперативными горелками

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 псевдо-постоянное регулирование (рисунок 5). Время горения 10 с является типичным для такого рода управления. Рисунок показывает последовательность такта горелок в отдельных зонах при различной потребности в нагреве. 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 ЭВМ (3).

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 (рис. 6).

Пневматическая регулировка соотношения может держать постоянную 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, удерживаются в рабочей точке постоянными по отдельности с помощью регулятора разности давления и тем самым также 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 раз 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.



Рисунок 6: регулировка смеси для рекуперативных горелок

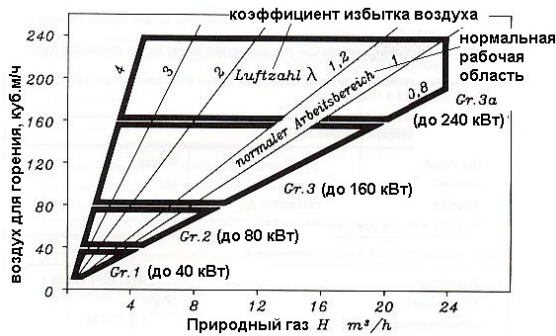


Рисунок 7: рабочая область и участок стабилизации рекуперативных горелок соответственно рисунка 4

Рабочая область и область стабилизации описанных рекуперативных горелок для различных размеров представлены на рисунке 7. 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.

Содержание NO₂ и CO при сильном предварительном нагреве воздуха

С усилением предварительного нагрева воздуха температура пламени возрастает и вместе с тем процентное содержание NO₂ в отходящем газе, поэтому рекуперативные горелки с сильным предварительным нагревом воздуха в особенности подвержены этой проблеме. Для известных мероприятий по сокращению выделения NO₂ (4,5), в особенности для ступенчатого горения и рециркуляции отходящего газа, были разработаны конструктивные решения специально для рекуперативных горелок, оправдавших себя при использовании на производстве.

Первая ступень горения с недостатком воздуха приблизительно 30% происходит в керамической камере горения при избыточном давлении от 1 до 2 кПа (смотри рисунок 4), причем газообразные продукты сгорания в выходном сопле увеличивают свою скорость до более чем 100 м/с. В данном случае предварительно нагретый вторичный воздух выходит при одинаковом давлении через отверстия вокруг основной струи, сначала смешивается с печными газами, а затем попадает в основную струю, которая уже смешалась с печными газами. Вследствие такого метода вторичного сжигания температура пламени повышается незначительно.

Высокая энергия перемешивания в основной струе является предпосылкой для полного сгорания, которое определяется содержанием CO в отходящем газе. При оптимизированной геометрии сопел, горелки могут работать также при условиях выше стехиометрических ($\lambda=1,05$, 1%O₂) с содержанием CO менее 5 ppm. Единственно, при старте может возникнуть необходимость временно увеличить коэффициент избытка воздуха.

Типичные показатели для горелки 40 кВт в излучающей трубе показаны на рисунке 8. Показатели NO₂ в сухом отходящем газе при температуре предварительного нагрева воздуха более чем 600°C сильно увеличиваются, но даже при нагреве около 700°C находятся всё еще ниже установленного граничного показателя 250 ppm для горелок с холодным воздухом (июль 86).

Мероприятия по снижению NO₂ действуют, естественно, и во время работы без догрева воздуха, что проявляется в измеряемой величине приблизительно



Рисунок 8: Замеры NO₂ в излучающей трубе

30 ppm. При полном использовании мощности горелки (расход газа 4 м³/ч) содержание NO₂ еще немного снижается из-за повышения скорости на выходе. При прямом нагреве показатели NO₂ при одном и том же предварительном нагреве воздуха ниже, чем в излучающей трубе, так как лучше рециркуляция отходящего газа. При этом у горелок с большим диаметром сопел и большей мощностью показатели NO₂ выше, что взаимосвязано продолжительностью реакции в объеме пламени. Распределение подачи энергии несколькими небольшими горелками также относится к мероприятиям по снижению содержания NO₂.

Предварительный нагрев воздуха и продукции в отдельных потоках отходящего газа

При ужесточении граничных значений на содержание NO₂ может возникнуть необходимость в ограничении предварительного нагрева воздуха, например, до 650°C, а тепло, выделяемое отходящими газами, использовать иначе. Для этого предлагается предварительный нагрев продукции в камере подогрева. На рисунке 9 схематически изображены возможности для рекуперации отходящих газов во время производственного процесса. Температура отходящего газа на выходе определяет коэффициент использования топлива КИТ. Для приблизительных расчетов используется отношение к адиабатической температуре пламени, которая составляет для большинства горючих газов приблизительно 2000°C. Процесс в камере нагрева, из которой отходящий газ уходит с температурой $t=1000^\circ\text{C}$, имеет коэффициент использования топлива около 50%, если предварительно не нагреваются ни воздух, ни продукт.

Существуют три варианта комбинации предварительного нагрева воздуха и продукта (рисунок 9с, d и e). Вариант с может, например, быть использован для печи с излучающими трубами, если весь отходящий газ принудительно отводится через рекуперативные горелки и затем направляется в камеру предварительного нагрева. Вариант d чаще всего применяется для центральных рекуператоров (смотри рисунок 3а) для защиты рекуператора от высокой температуры.

НК - топливная камера LV - предварительный нагрев воздуха
PV - предварительный нагрев продукта

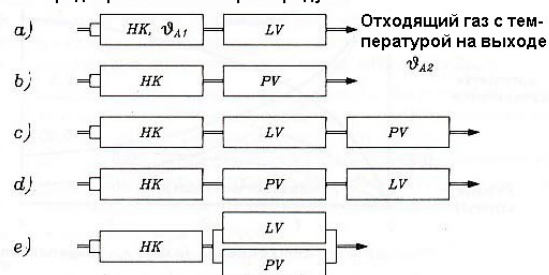


Рисунок 9: рекуперация тепла отходящих газов путем предварительного нагрева воздуха и продукции

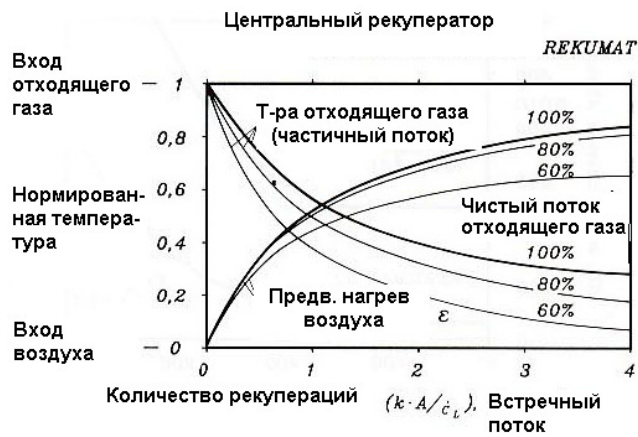


Рисунок 10: предварительный нагрев воздуха в части потока отходящего газа

При использовании рекуперативных горелок предлагается предварительный нагрев воздуха и продукции в части потока отходящих газов (вариант е) (смотри рисунок 2b). Как видно из рисунка 10, уменьшение потока отходящего газа до 80% оказывает лишь незначительное влияние на относительный предварительный нагрев воздуха, и даже при снижении потока отходящего газа на 60%, предварительный нагрев составляет от 50 до 60%. Часть потока отходящего газа в 60% очень сильно охлаждается, например, до 20% температуры отходящего газа до рекуператора. Оставшаяся часть потока отходящего газа может использоваться для предварительного нагрева продукции (рисунок 11), причем снова в распоряжении имеется полный перепад температур. Поскольку соотношение теплоемкостей частей потоков отходящих газов c_{λ} и продукции c_{ρ} смещается к незначительным величинам, температура отходящих газов снижается очень сильно в сравнении с предварительным нагревом продукции. При помощи обеих диаграмм на рисунках 10 и 11 можно получить ориентировочные показатели для установки рекуперативных горелок и для камеры предварительного нагрева, а также предварительный нагрев воздуха горения и продукции, а также общий КПД печи.

При обычной для термообработки температуре 1000°C, и использовании современных рекуперативных горелок с полным отводом отходящих, предварительный нагрев воздуха горения достигает 700°C, а коэфф. использования топлива - 80%. Используя предварительный нагрев воздуха горения и продукции можно добиться увеличения КИТ до 90% при незначительном выбросе NO₂.

Мощность и стоимость рекуперативных горелок

Рекуперативные горелки используются для различных типов печей в температурном диапазоне от 500 до 1300°C. При мощности более 250 кВт достигаются предельно допустимые габариты горелок с

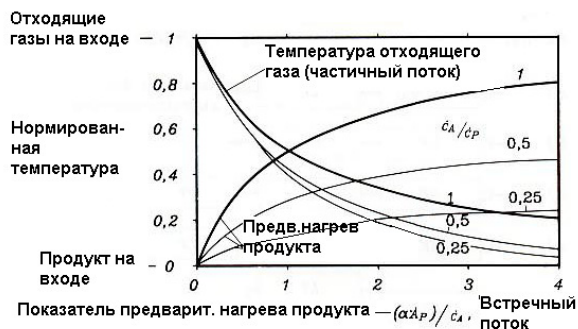


Рисунок 11: предварительный нагрев продукта в частичном потоке отходящего газа

Таблица 1: мощностные характеристики рекуперативных горелок для стандартного процесса при 1000°C

Стандартный высокотемпературный процесс при 1000°C	
- топливо	Природный газ
- коэффициент избытка воздуха λ	1,1
- температура отходящего газа на входе в рекуператор $\vartheta_{\lambda 1}$	1000°C
- обратная подача через рекуператор	100%
мощностные характеристики рекуперативных горелок	
- тип горелки	«REKUMAT» SJ1, Gr. 1
- величина потребляемой мощности	30 кВт
- предварительный нагрев воздуха	740°C ($\epsilon=0,74$)
- температура отходящих газов $\vartheta_{\lambda 2}$	415°C
- теплотехнический КПД %	0,81
- давление в камере сгорания	1,1 кПа
- NO ₂ в сухом отходящем газе	220 ppm

1) зарегистрированная торговая марка «WS Wärmeprozess Technik GmbH», Renningen

предварительным нагревом воздуха. Поэтому рекуперативные горелки мало находят применения для нагревательных печей очень большой мощности, например, на прокатных станах.

Для сравнения различных рекуперативных горелок целесообразно выбрать стандартный процесс при 1000°C и для него определить мощностные характеристики (таблица 1). С помощью измеряемых величин можно затем относительно просто и с достаточной точностью сделать перерасчет для других технологических условий (смотри рис. 10). Влияние вида газа, исключая «бедные» газы, незначительно, поскольку количество воздуха для горения на единицу мощности остается почти постоянной (1 м³/ч на 1 кВт). Относительный предварительный нагрев воздуха несколько увеличивается при одинаковых условиях вместе с температурой отходящих газов, потому что возрастает коэффициент теплопередачи κ .

Давление в камере сгорания напрямую влияет на мощность рециркуляции в печи. 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 NO₂ в сухом отходящем газе необходимо всегда рассматривать с предварительным нагревом воздуха. Показатель 220 ppm NO₂ при предварительном нагреве 740°C отражает сегодняшний уровень развития. С помощью относительного предварительного нагрева воздуха и КИТ можно определить режим экономии топлива для каждого конкретного случая (рисунок 12). В приведенном примере стандартный показатель

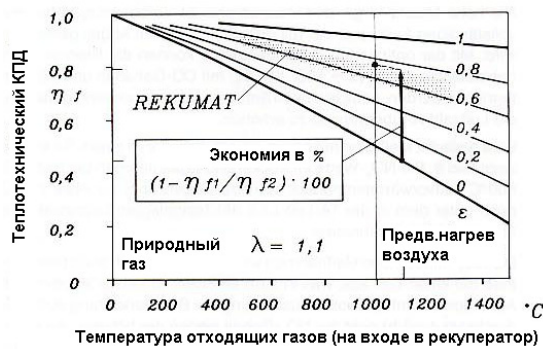


Рисунок 12: экономия энергии при предварительном нагреве воздуха

Таблица 2: инвестиции для печей на газовом и электрическом топливе

Вид нагрева	Инвестиции ¹⁾ в DM/кВт
1.0 Высокоскоростные горелки, с низким содержанием NO ₂	70...9
1.1 с исполнительным элементом, зажиганием и контролем	160...20
1.2 дополнительно со встроенным рекуператором	230...50
1.3 дополнительно с излучающей трубой	360...160
2.0 электронагрев с несущей трубой в печи	≈35
2.1 электронагрев с несущей трубой в печи в качестве вставки	≈140
2.2 дополнительно трансформатор	≈250
2.3 дополнительно с защитной трубой	≈350

1) относится к величине потребляемой мощности горелки от 20 до 200 кВт

1000°C экстраполирован до 1100°C, а экономия рассчитана по приведенной формуле (=41%). Для сравнения с процессом с малым предварительным нагревом воздуха используется та же схема. Четко видно, что с увеличением температуры увеличивается и потенциал экономии.

В таблице 2 приведены ориентировочные показатели инвестиций в нагрев газом и электричеством в применении для высокотемпературных процессов. У высокоскоростных горелок без рекуператоров удельные затраты зависят в основном от размера горелки. Это влияние у рекуперативных горелок снижается, и 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 DM на 1 кВт должно в каждом случае сопоставляться с более высоким КПД (КИТ). Ежегодная экономия в Евро на 1 кВт мощности соответствует относительной экономии, умноженной на удельную цену газа в $\frac{DM}{кВт\cdotч}$ и ежегодную эксплуатацию горелок в часах. Это можно пояснить на следующем примере:

Удельная цена газа	0,03 $\frac{DM}{кВт\cdotч}$
Экономия благодаря пред. нагреву воздуха (рис.12)	30%
Время работы горелки в год	5000 часов
Экономия в год на кВт мощности	45,- DM

В данном примере видно, что дополнительные расходы на рекуператор амортизируются, в зависимости от размера горелки, 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.

Для сравнения с электронагревом в таблице 2 приведено сравнение нагрева печей с различным оснащением. Сегодня, как правило, с целью облегчения технического обслуживания используют элементы горелок, которые можно заменить снаружи. 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 электронагрева. Для газового нагрева необходимо учитывать теплотехнический КПД (КИТ). Сравнение показывает преимущества газового нагрева, так как удельные затраты на электрический ток в Федеративной Республике Германии почти втрое выше, чем для газа. Улучшение качества нагрева благодаря рециркуляции при прямом газовом нагреве при этом в расчет не принимается.

Заключение

Высокоскоростные рекуперативные горелки предлагают значительные преимущества по сравнению с традиционными горелочными системами для промышленных печей в температурном диапазоне от 500 до 1300°C. 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 ϵ находится в диапазоне от 0,5 до 0,8, что выше, чем у системы с центральным рекуператором (<0,5). При использовании ступенчатого горения эмиссия NO₂ может быть значительно снижена. Для стандартного процесса с температурой 1000°C можно достичь с помощью современных рекуперативных горелок следующих важных показателей:

- предварительный нагрев воздуха 700°C;
- теплотехнический КПД (КИТ) 0,8;
- NO₂ в сухом отходящем газе 200 ppm.

Путем комбинации предварительного нагрева воздуха и продукции в потоке отходящего газа возможен КПД даже 90%.

Литература:

1. Wüning, J. Новые рекуперативные горелки с низким выбросом NO₂. «Gaswärmeinternational», № 34(1985), с. 98-101
2. Scholz R., Maaß R., Alt R. Принцип рекуперативных горелок и основы для расчета. «Industriefeuerung», № 35, с.12-20
3. Britz H, Kneip M., Poppenhager J. «Новая концепция автоматизации для нагревательных печей, работающих на газе», «Stahl und Eisen», № 108 (1988), с. 655-664
4. Beckervordersanforth C.P., Kremer H., Flamme M.: «Уровень эмиссии NO₂ и мероприятия по его снижению в промышленных печах для предприятий по выпуску металла и керамики. «Gaswärmeinternational», № 34 (1985), с. 196-207
5. Kuhn P, Sucker D. «Исследования атмосферы горячих газов в промышленных печах и топливных установках», «Stahl und Eisen», № 108 (1988), с.197-202

* «Gaswärme International», том 37 (1988), выпуск 10, страницы 515-519, Издательство «VULKAN» - 45127 ESSEN- HAUS DER TECHNIK