



*It is shown that the choice of recuperative burners is more reasonable for different types of heating furnaces of machine-building and metallurgical productions of little efficiency.*

С. В. КОРНЕЕВ, БНТУ

УДК 662.951.2:006.354

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВ

Существующая тенденция роста цен на энергоносители приводит к необходимости при выборе или конструировании газопламенных печей детально прорабатывать не только вопросы технологии нагрева, но и учитывать особенности последующей тепловой работы печи, влияющие как на производительность печи, равномерность температурного поля в пределах садки, так и на показатели энергоэффективности (КПД, КИТ и удельный расход топлива). Достижение высоких значений КПД и КИТ и соответственно низкого расхода топлива возможно различными способами. Использование современных огнеупорных и теплоизоляционных волокнистых материалов позволило значительно снизить тепловые потери через ограждающие конструкции и на разогрев печи, поэтому в настоящее время основное внимание при выборе конструкции газопламенной печи следует уделять

способам отопления и утилизации теплоты продуктов сгорания, покидающих печь.

В настоящее время нагревательные печи могут оснащаться либо центральным рекуператором (одним или двумя), подогревающим воздух для всех горелочных устройств печи, либо рекуперативными (или регенеративными) горелками, включающими встроенный теплообменник. Варианты конструкций камерной печи с утилизацией теплоты продуктов сгорания при использовании рекуператора и рекуперативных горелок приведены на рис. 1.

В настоящее время в промышленном производстве функционируют нагревательные печи с использованием схем косвенного нагрева (например, радиационные трубы, плоскопламенные сводовые горелки и др.). Несмотря на это, подавляющее большинство процессов нагрева обеспечива-

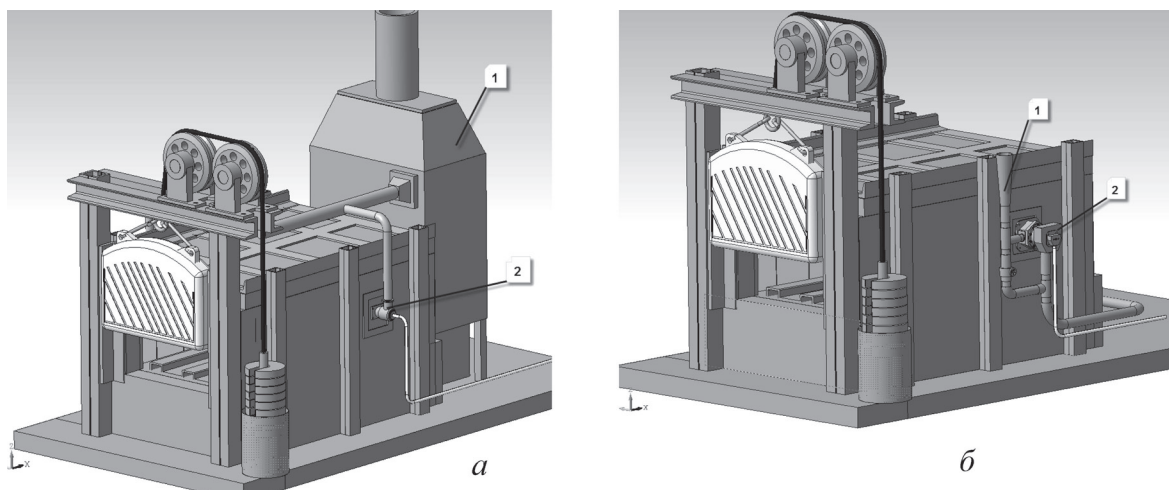


Рис. 1. Варианты утилизации теплоты продуктов сгорания при использовании рекуператора (а): 1 – рекуператор; 2 – двухпроводная горелка и рекуперативных горелок (б): 1 – эдуктор; 2 – рекуперативная горелка

ется при прямом нагреве в окислительной атмосфере продуктов сгорания природного газа.

Как правило, в нагревательных печах на уровне пода поддерживается небольшое положительное давление, поскольку даже небольшое отрицательное давление в рабочем пространстве обуславливает подсос холодного воздуха, который охлаждает садку и увеличивает расход топлива.

Процесс регулирования состава печной среды предусматривает решение двух задач.

1. Поддержание заданного соотношения «топливо – воздух» при любой нагрузке печи.

2. Обеспечение требуемого давления в печи.

Вторая задача невыполнима при отсутствии обратной связи о количестве поданного топлива и воздуха, поэтому эти две задачи для полноценного регулирования должны быть согласованы. Характеристики некоторых схем отопления для небольших печей с принудительной подачей воздуха приведены в табл. 1.

Можно отметить, что недостатком использования системы отопления с рекуперативными горелками является то, что после охлаждения в рекуперативных горелках и дополнительного разбавления воздухом в количестве, превышающем объем воздуха горения, дымовые газы имеют низкую температуру (менее 300 °С) и поэтому невозможно использование полных схем утилизации теплоты уходящих газов (например, котлов-утилизаторов).

Снижение стоимости рекуперативных горелочных устройств с системой управления, а также накопление опыта их применения и особенностей эксплуатации в действующем производстве должны способствовать более широкому их использованию при строительстве новых печей и реконструкции действующих.

В настоящее время на предприятиях республики функционирует значительное количество нагревательных печей, отапливаемых природным газом. Например, РУП «МАЗ» имеет около 50 печей, парк печей РУП «МТЗ» составляет более 200 шт. Кроме того, около 20 печей функционирует на Минском рессорном заводе и Кузнечном заводе тяжелых штамповок, входящих в ПО «МАЗ».

Печи отжига (в ЛЦ СЧ, СЛЦ-1, СЛЦ-2) с температурами в рабочей зоне до 1000 °С оснащены горелками ГИП, нагревательные, закалочные и отпусковые печи кузнечного цеха – горелками КГМГ, печи КЗЦ и КТЦ – горелками ВП, ГНТ, ГТСМ, печи МРЗ – горелками ВП, а печи КЗТШ – горелками ГНП. Вместе с тем, на РУП «МАЗ» в кузнечном цехе установлены две линии термообработки (АРО-1500G и АРН-1800G), имеющие в своем составе термические печи с рекуперативными горелками.

Анализ тепловой работы термических печей агрегата закалки и агрегата нормализации с рекуперативными горелками, установленных на РУП

Т а б л и ц а 1. Схемы отопления нагревательных печей

Схема	Достоинства	Недостатки
Отопление осуществляется при помощи дутьевых горелок, удаление дыма – через дымоотводящий тракт с естественной тягой	Отсутствуют затраты на дымосос и потребляемую им электрическую энергию	При большой тепловой нагрузке возможно выбивание дыма через отверстия печи; температура подогрева воздуха ограничивается гидравлическим сопротивлением рекуператора
Отопление осуществляется при помощи дутьевых горелок, удаление дыма – через дымоотводящий тракт с принудительной тягой (дымососом) без регулирования	Простота и дешевизна схемы	При уменьшении тепловой нагрузки печи, а, следовательно, расхода топлива (дымовых газов) в печи существенно падает давление, что приводит к значительным подсосам в рабочее пространство воздуха
Отопление осуществляется при помощи дутьевых горелок, удаление дыма – через дымоотводящий тракт с принудительной тягой (дымососом) с регулированием при помощи шиберов	Возможность обеспечения постоянного нулевого давления в печи	Необходима обратная связь по давлению в печи; более высокое потребление электрической энергии дымососом
Отопление осуществляется при помощи дутьевых горелок, удаление дыма – через дымоотводящий тракт с принудительной тягой (дымососом) с регулированием при помощи изменения частоты вращения двигателя привода дымососа	Возможность плавной регулировки мощности дымососа за счет плавной регулировки частоты вращения двигателя	Необходимость в установке частотного преобразователя
Отопление осуществляется при помощи рекуперативных горелок, удаление дыма – при помощи эдуктора через горелку	Простота регулирования давления в печи и соотношения «газ-воздух». Высокая температура подогрева воздуха	Высокая стоимость рекуперативных горелок

«МАЗ», показывает, что они полностью обеспечивают заявляемые производителем технические характеристики. При этом экономия природного газа при использовании рекуперативных горелок в сравнении с применением центрального рекуператора (температура подогрева 300 °С) и при отсутствии рекуперации теплоты продуктов сгорания составляет 18 и 41,6% соответственно.

Необходимо отметить, что все современные печи с рекуперативными горелками оснащаются системами автоматического розжига, контроля пламени, регулирования соотношения «газ-воздух» и системами безопасности. Это также относится и к современным дутьевым горелкам. Некоторые элементы систем контроля и управления показаны на рис. 2.

Для принятия решения о выборе наиболее целесообразного способа отопления печи необходимо проанализировать не только экономию топлива (в денежном выражении) и капиталовложения в оборудование, но и эксплуатационные затраты.

Анализ работы печей, на которых был установлен рекуператор с заменой инжекционных горелок на дутьевые, показывает, что в ряде случаев суммарное потребление электрической энергии на привод вентилятора и дымососа при пересчете на первичное топливо (при КПД получения электрической энергии 37 %) может превышать экономию от подогрева воздуха. Это означает, что для таких случаев установка рекуператора для утилизации теплоты продуктов сгорания при выбранных температурах подогрева воздуха, конструкции рекуператора и выбранном оборудовании оказывается неэффективной.

В связи с этим приведем последовательность определения способа отопления и типа горелочных устройств, учитывая особенности, присущие каждому из способов:

1) выбрать способ отопления, учитывая, что основным видом топлива для нагревательных и термических печей является природный газ, в качестве резервного топлива может использоваться мазут;

2) определить схему отопления (либо несколько схем для последующего анализа) исходя из производительности печи, типа садки, требований к атмосфере печи, рабочему диапазону регулирования;

3) поскольку для газопламенных печей характерны значительные потери теплоты с уходящими продуктами сгорания, необходимо выбрать температуру подогрева воздуха, обеспечивающую наиболее эффективную утилизацию теплоты продуктов сгорания, определить экономию топлива, достигаемую при различных температурах подогрева, и подобрать схемы утилизации теплоты для каждого варианта;

4) определить концентрации оксидов азота в продуктах сгорания для выбранных температур подогрева воздуха и типов горелочных устройств;

5) произвести расчеты рекуператора для выбранных температур подогрева воздуха;

6) выполнить расчеты стоимости рекуперативной установки;

7) подобрать вентилятор для подачи воздуха исходя из необходимых давлений воздуха перед горелочными устройствами, а также расчетных потерь давления в рекуператоре и воздушном тракте;

8) выбрать дымосос с учетом расчетных потерь давления в дымовом тракте и рекуператоре при обеспечении минимального разрежения в печи;

9) рассчитать затраты на установленную мощность и потребляемую электроэнергию для выбранного оборудования (дутьевого вентилятора и дымососа);

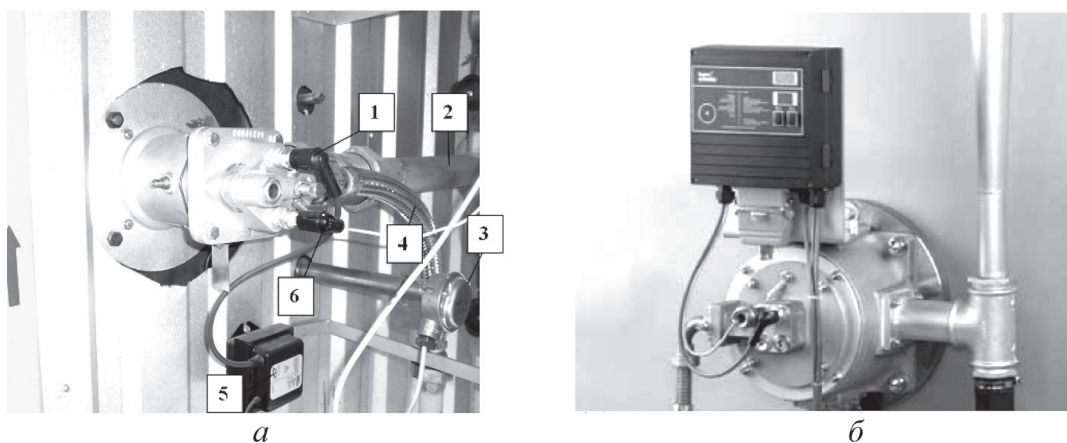


Рис. 2. Короткофакельная горелка VIC (а) и рекуперативная горелка ECOMAX с блоком управления (б): 1 – свеча электрода розжига; 2 – подвод воздуха; 3 – контрольная термопара; 4 – подвод газа; 5 – трансформатор розжига горелки; 6 – контроль пламени

10) сравнить суммарные затраты для всех вариантов с учетом стоимости оборудования системы отопления печи и выбрать наиболее рациональный.

Для крупных металлургических печей и печей малоокислительного нагрева анализ вариантов несколько сложнее и поэтому в данной работе не рассматривается.

Рассмотрим последовательность выбора горелочных устройств для нагревательной печи конвейерного типа на примере закалочного агрегата ЗОА № 5 ОАО «БЕЛКАРД».

**Особенности расчета технико-экономических показателей использования различных схем отопления.** Исходные данные для расчета: производительность нагревательной печи – 1200 кг/ч; нагреваемый металл – заготовки из сталей 35, 40, 45 Ø54×38 и 200×370 мм; расположение на конвейерной ленте – в один или несколько слоев в зависимости от размера деталей; конечная температура металла – 820–860 °С; топливо – природный газ с теплотой сгорания 35 МДж/м<sup>3</sup>.

Печь разделена на три зоны с температурами от 820 до 1000 °С (температуры в каждой из зон, как правило, равны друг другу).

*Расчет расхода топлива для различных вариантов схем отопления.* Расход топлива определяется на основе расчета теплового баланса печи для заданных исходных данных, результаты которого приведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что при подогреве воздуха в рекуператоре экономия природного газа по сравнению с работой печи без подогрева воздуха составит:

для  $t_b = 250\text{ °C}$

$$\Theta = (57,4 - 49,2) = 8,2\text{ м}^3/\text{ч}; \Theta_1 = 8,2/57,4 \cdot 100 = 14,3\%.$$

При подогреве воздуха в рекуперативных горелках:

для  $t_b = 400\text{ °C}$

$$\Theta = (57,4 - 44,7) = 12,7\text{ м}^3/\text{ч}; \Theta_1 = 12,7/57,4 \cdot 100 = 22,1\%;$$

для  $t_b = 500\text{ °C}$

$$\Theta = (57,4 - 41,7) = 15,7\text{ м}^3/\text{ч}; \Theta_1 = 15,7/57,4 \cdot 100 = 27,3\%.$$

На нереконструированном агрегате (с традиционной футеровкой), расположенном на этом же предприятии, установлено шесть горелок ВП 56/3,2 и восемь горелок ВП 32/2,0. С целью адекватного сравнения вариантов необходимо рассматривать установку горелок на реконструированном агрегате (волоконистая футеровка) с расходом топлива в соответствии с табл. 2.

*Расчет концентрации оксидов азота в продуктах сгорания.* Температура подогрева воздуха является одним из наиболее существенных факторов, влияющих на образование оксидов азота при сжигании газов в газопламенных печах. В области температур подогрева воздуха до 250–300 °С увеличение концентрации оксидов азота в дымовых газах имеет плавный, предсказуемый характер, при более высоких температурах воздуха горения различие в концентрациях NO<sub>x</sub> в дымовых газах для разных тепловых агрегатов может быть достаточно большим и определяется условиями организации процессов горения топлива и теплообмена в печи.

Согласно ГОСТ Р 50591–93, предельные нормы концентрации NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания для тепловых агрегатов на природном газе при подогреве воздуха до 300 °С в случае применения дутьевых горелок составляют 530 мг/м<sup>3</sup> для эксплуатируемых и ориентировочно 260 мг/м<sup>3</sup> для вновь разработанных. При использовании инжекционных горелок без подогрева воздуха это значение будет соответственно равно 280 и 120 мг/м<sup>3</sup>.

В первом приближении зависимость концентрации NO<sub>x</sub> от температуры подогрева воздуха горения для дутьевых горелок в диапазоне температур 0–450 °С можно записать в виде уравнения [1]:

$$\text{NO}_x = 2 \cdot 10^2 \exp(0,00328t_b), \text{ мг/м}^3,$$

где NO<sub>x</sub> – концентрация оксидов азота в сухих продуктах сгорания, приведенная к α = 1, мг/м<sup>3</sup>; t<sub>b</sub> – температура воздуха горения, °С.

Тогда концентрация NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания при использовании дутьевых горелок с температурой подогрева воздуха 250 °С составит:

$$\text{NO}_x = 2 \cdot 10^2 \exp(0,00328 \cdot 250) = 164 \text{ мг/м}^3.$$

Очевидно, что полученное значение меньше предельного (260 мг/м<sup>3</sup>).

Таблица 2. Сравнительные данные нагревательной печи ЗОА № 5 при различной температуре подогрева воздуха для производительности P = 1200 кг/ч

Параметр	Значение			
	t <sub>b</sub> = 20 °C (без подогрева)	t <sub>b</sub> = 250 °C	t <sub>b</sub> = 400 °C	t <sub>b</sub> = 500 °C
Расход топлива, м <sup>3</sup> /ч (м <sup>3</sup> /т)	57,4(47,8)	49,2(40,96)	44,7(37,27)	41,7(34,77)
Расход тепловой энергии, кВт	567,12	532,9	514,43	501,92
КПД печи, %	33,9	36	37,3	38,3

Концентрация  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания при использовании дутьевых горелок с температурой подогрева воздуха  $400^\circ\text{C}$  составит:

$$\text{NO}_x = 2 \cdot 10^2 \exp(0,00328 \cdot 400) = 743 \text{ мг/м}^3.$$

Полученное значение меньше предельного ( $1060 \text{ мг/м}^3$ ) для эксплуатируемых горелок в интервале подогрева воздуха более  $340 - 365^\circ\text{C}$ , что позволяет использовать подогрев воздуха до выбранной температуры.

В рекуперативных горелках, работающих при высоких температурах воздуха, подаваемого на горение, как правило, предусмотрены дополнительные мероприятия по уменьшению выбросов оксидов азота (например, ступенчатая подача воздуха). Согласно информации производителей, при температуре подогрева воздуха  $500^\circ\text{C}$  выбросы  $\text{NO}_x$  составляют  $270-415 \text{ мг/м}^3$  в обычном режиме и  $150-250 \text{ мг/м}^3$  в режиме Flox.

*Расчет рекуператора при температуре подогрева воздуха  $250^\circ\text{C}$ .* Расчет предусматривает компоновку и определение массы рекуператора исходя из требуемых значений температуры подогрева воздуха ( $t_b = 250^\circ\text{C}$ ) и расхода природного газа ( $49,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ , см. табл. 2).

Рассмотрим два варианта установки рекуператора:

1) по существующей на ЗОА № 5 схеме с дымоотбором из первой зоны через нижнюю камеру печи;

2) при отборе продуктов сгорания через свод.

При существующей схеме температура продуктов сгорания ниже температуры печи ( $t_z = 860-1000^\circ\text{C}$ ) и составляет около  $450-600^\circ\text{C}$  (в нижней камере печи под конвейерной лентой происходит их охлаждение и разбавление подсасываемым воздухом). При отборе продуктов сгорания через свод температура дыма, как правило, приблизительно равна температуре печи в зоне, из которой удаляются продукты сгорания.

Исходными данными для расчета являются: тип рекуператора – игольчатый, трубы типа 17,5 длиной 1135 мм из хромистого чугуна; количество нагреваемого воздуха (на входе в рекуператор) –  $492 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; количество дымовых газов (на входе в рекуператор) –  $541,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; начальная температура воздуха –  $20^\circ\text{C}$ . Отбор продуктов сгорания осуществляется через свод; температура дымовых газов, покидающих печь, –  $950^\circ\text{C}$ .

Конструкцию и потери давления на воздушном и дымовом пути рассчитываем по методике, приведенной в работе [2].

Окончательно принимаем конструкцию одноходового рекуператора из четырех труб (масса

каждой трубы 55 кг), расположенных в два ряда. При этом действительная температура подогрева воздуха составит около  $260^\circ\text{C}$ .

*Расчет рекуператора при температуре подогрева воздуха  $400^\circ\text{C}$ .* Исходными данными для расчета принимаем аналогичные трубы типа 17,5 длиной 1135 мм из хромистого чугуна; температура дымовых газов, покидающих печь, –  $950^\circ\text{C}$ . По результатам расчета принята конструкция одноходового рекуператора, состоящая из восьми труб, расположенных в четыре ряда. Таким образом, для данных условий металлоемкость рекуператоров для двух случаев различается в 2 раза.

*Расчет стоимости рекуперативной установки.* В качестве материала для рекуператоров принят хромистый чугун. Стоимость литых игольчатых труб составляет  $11,1-12,2 \text{ млн. руб./т}$ , крепежных и промежуточных реек (массой  $1,8-11,4 \text{ кг}$ ) –  $14,2-17,3$ , металлоконструкций рекуператора –  $14 \text{ млн. руб./т}$ .

Стоимость рекуперативной установки (без учета стоимости дымососа) определяли по формуле:

$$C = C_m, \text{ млн. руб.},$$

где  $C$  – стоимость 1 т металлоконструкции рекуператора, млн. руб.;  $m$  – масса металлоконструкций рекуператора, т.

Стоимость монтажа рекуперативной установки составляет около 20% от стоимости металлоконструкций.

*Выбор горелочных устройств.* Подбор горелок осуществляется исходя из расходов природного газа и воздуха.

Для сравнения принимаем тип инжекционных горелок ВП (в соответствии с типом горелок на нереконструированном агрегате), в качестве зарубежного варианта инжекционной горелки – горелку AIG. В качестве дутьевой принимаем горелку малой тепловой производительности ДВМ, для второго варианта – дутьевую горелку ВИС. В качестве рекуперативной горелки выбираем горелку Reku-mat (температура подогрева воздуха для условий рассматриваемой печи равна  $530^\circ\text{C}$  для горелок с керамическим и  $600^\circ\text{C}$  с металлическим рекуператором). Внешний вид горелок показан на рис. 3, а. Для второго варианта рекуперативной горелки (более дешевого, но с меньшей температурой подогрева воздуха  $340-400^\circ\text{C}$ ) рассмотрим горелку ВИСР.

Стоимость горелочных устройств определяется в соответствии с предложениями изготовителей. Стоимость рекуперативных горелок с системой управления принята как средняя по нескольким коммерческим предложениям на реконструкцию нагревательных печей. Следует признать, что

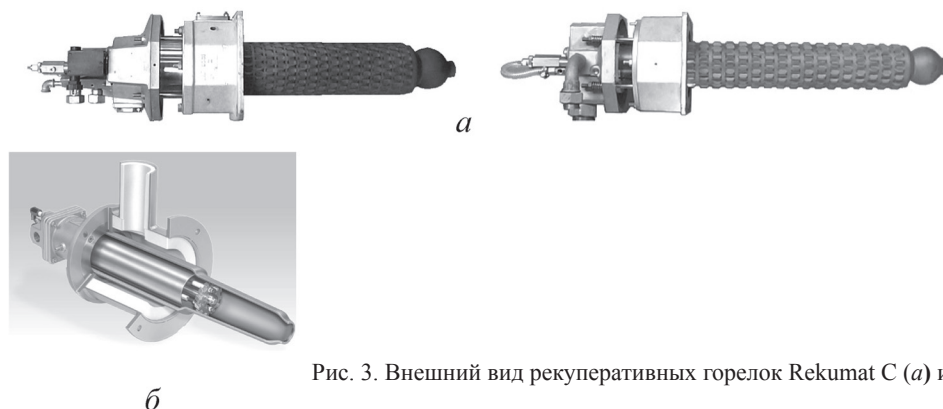


Рис. 3. Внешний вид рекуперативных горелок Rekumat C (а) и BICR (б)

основным недостатком рекуперативных горелок является их высокая стоимость. Для рассматриваемого случая стоимость одной горелки с системой управления составляет около 25 млн. руб., а требуемое их количество составляет 8 шт.

*Выбор вентиляторов для подачи воздуха.* Суммарное сопротивление воздушного тракта печи определяется сопротивлением рекуперативного устройства и сопротивлением воздухопроводов. Сопротивление рекуперативных горелок достаточно большое (75 мбар), так как подогрев воздуха, как правило, осуществляется до более высоких температур, чем в рекуператорах. Кроме того, при использовании рекуперативных горелок около 50% подаваемого воздуха расходуется на создание эжекции и уходит в дымовой тракт.

*Выбор дымососа.* При использовании инжекционных горелок дымосос может устанавливаться либо отсутствовать (в случае дымоотбора через загрузочное и разгрузочное окна при наличии достаточной тяги дымовых труб). В случае применения дутьевых горелок и рекуператора дымосос устанавливается, при использовании рекуперативных горелок – не устанавливается.

*Расчет затрат за установленную мощность и потребляемую электроэнергию.* Данные затраты ( $C_{ЭМ}$ ) определяются с учетом стоимости 1 кВт установленной мощности электрооборудования и коэффициентов загрузки оборудования по мощности ( $K_1 = 0,9$ ) и потерь энергии в сети ( $K_2 = 1,04$ ).

Плата за потребляемую энергию  $C_{ЭН}$  рассчитывается по формуле:

$$C_{ЭН} = Ц_{Э} W_{П} F_{Д} \frac{K_{ВР} K_{N} K_{W}}{\eta}, \text{ млн. руб.},$$

где  $Ц_{Э}$  – стоимость 1 кВт · ч электроэнергии (0,000380), млн. руб./(кВт·ч);  $W_{П}$  – суммарная потребляемая мощность вентилятора и дымососа, кВт;  $F_{Д}$  – действительный фонд времени работы оборудования, ч;  $\eta$  – коэффициент полезного действия электродвигателей (0,7–0,85).

Применение двухпроводных горелок приводит к дополнительным затратам электроэнергии на привод вентилятора. Несколько меньшие, но также высокие затраты на электроэнергию у инжекционных горелок (при использовании дымососа). Инжекционные горелки, работающие на высококалорийном топливе (на природном газе), практически исключают подогрев воздуха, идущего на горение. В результате покидающие печь газы имеют высокую температуру, что требует их двукратного разбавления и приводит к дополнительным затратам электроэнергии.

Рекуперативная горелка BICR имеет гладкий рекуператор, поэтому в отличие от горелки Rekumat, у которой рекуператор ребристый, потери давления у нее меньше. Следовательно, и затраты на электроэнергию у Rekumat выше, чем у BICR.

*Расчет суммарных затрат.* Расчеты предусматривают прежде всего определение срока окупаемости дополнительных затрат на использование утилизации теплоты продуктов сгорания в сравнении с использованием инжекционных горелок без подогрева воздуха для всех выбранных вариантов.

Расчеты, проведенные для рассмотренной выше термической печи конвейерного типа и некоторых других типов печей (камерных) при использовании горелок ВП (AIG), ДВМ (BIC), BICR и Rekumat, показали, что после 4–6 лет эксплуатации горелок BICR экономический эффект выше, чем при использовании дутьевых с подогревом воздуха в центральном рекуператоре. Таким образом, при сроках эксплуатации более 4–6 лет (зависит от типа печи, максимальной температуры в рабочем пространстве, температуры подогрева воздуха) экономически целесообразно использовать рекуперативные горелки типа BICR. Для горелок Rekumat (в сравнении с дутьевыми горелками и рекуператором из игольчатых труб) данный срок составляет 7–10 лет. Однако необходимо учитывать, что выбор конкретного типа рекуперативных горелок ограничивается максимальными темпера-

турами в рабочем пространстве печи, так как в этом случае разбавление продуктов сгорания холодным воздухом практически невозможно (в отличие от схем с центральным рекуператором).

Вместе с тем, оценочные расчеты показывают, что для отдельных типов печей, например методических (с неотопляемой методической зоной), имеющих большую тепловую мощность и оснащенную рекуператором с температурой подогрева воздуха около 400 °С, замена дутьевых горелок на рекуперативные при реконструкции оказывается нецелесообразной.

#### **Выводы**

Производимые в настоящее время инжекционные горелки комплектуются современной системой управления, что позволяет использовать их при реконструкции нагревательных печей, оснащенных инжекционными горелками и с большим физическим износом при отсутствии значитель-

ных средств на полную реконструкцию. При строительстве новых печей необходимо предусматривать рекуперативное использование теплоты продуктов сгорания, поэтому следует рассматривать варианты применения двухпроводных горелок с центральным рекуператором и рекуперативных горелок.

Результаты расчетов, выполненных для различных видов нагревательных печей машиностроительного и металлургического производств (камерного и проходного типа с рабочими температурами до 1200 °С), свидетельствуют о том, что при сроках эксплуатации печей более 6–7 лет (при условии сохранения текущего соотношения цен на электрическую энергию и природный газ, а также на горелочные устройства) для большинства нагревательных печей небольшой производительности наиболее целесообразным является выбор рекуперативных горелок.

#### **Литература**

1. А ш и х м и н А. А., Д р у ж и н и н Г. М., К а р а т а е в В. Л. Оценка влияния температуры подогрева воздуха на эмиссию  $NO_x$  // Сталь. 2000. № 7. С. 78–79
2. Т е б е н ь к о в Б. П. Рекуператоры для промышленных печей. М., 1975.