

УДК 658.567.1:662.613.125

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛОК В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ С ЦЕЛЬЮ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Докт. техн. наук, проф. ГУБИНСКИЙ В. И.,
канд. техн. наук ЕРЕМИН А. О.

Национальная металлургическая академия Украины

Топливные печи, традиционно работающие на газообразном топливе, являются одним из крупнейших потребителей естественных энергоресурсов. Высокая теплота сгорания природного газа, его относительно невысокая стоимость не дают предпосылок к тому, чтобы в ближайшее время произошли изменения вида топлива для промышленных печей.

Организация рационального использования топлива в промышленности, в значительной мере определяющая экологическую обстановку, является актуальной проблемой сегодняшнего дня.

Можно выделить три основных направления энергосбережения при эксплуатации промышленных печей, вытекающих из уравнения теплового баланса: увеличение доли общей тепловой мощности, усваиваемой материалом, т. е. повышение коэффициента полезного действия печи; снижение тепловых потерь из рабочего пространства печи; утилизация теплоты уходящих из печи дымовых газов путем подогрева реагентов горения, материалов либо получения горячей воды или пара.

В большинстве случаев повысить долю тепловой мощности, усваиваемой материалом, сверх определенного значения не представляется возможным по технологическим требованиям. Потери теплоты из рабочего пространства печей в окружающую среду составляют относительно небольшую часть в тепловом балансе. В настоящее время разработаны и активно внедряются на строящихся и реконструируемых печах новые теплоизоляционные материалы, имеющие коэффициент теплопроводности на порядок ниже, чем этот же показатель для традиционных кирпичных огнеупоров. Поэтому, с нашей точки зрения, основным резервом экономии топлива и связанной с ней защиты окружающей среды является глубокая утилизация теплоты дымовых газов. Многие нагревательные печи металлургии и машиностроения эксплуатируются с неудовлетворительно работающими теплоутилизирующими устройствами – рекуператорами и регенераторами. Ряд печей работает вообще без утилизации теплоты дымовых газов, что приводит к повышенному расходу топлива и выбросу вредных веществ в атмосферу.

История печной техники знает примеры соперничества рекуперативного и регенеративного способов подогрева воздуха и газообразного топлива. Регенеративный принцип использован в доменных воздухонагревателях, мартеновских печах, регенеративных колодцах и камерных нагревательных и обжиговых печах. Преимуществом регенераторов является более высокая температура подогрева и степень регенерации теплоты уходящих газов, а недостатком – необходимость периодического переключения потоков продуктов горения и нагреваемого газа с одного регенератора на другой, большие габариты насадки. К достоинствам рекуператоров можно отнести отсутствие указанных выше недостатков.

Начиная с 80-х гг., активно разрабатываются горелочные системы, новизна которых состоит в том, что в одном агрегате комбинируются горелочное и теплоутилизирующее устройства. Такие решения реализованы в современном поколении горелок – рекуперативных, регенеративных и рекуперативно-горелочных блоках. С точки зрения утилизации теплоты, наиболее эффективными являются регенеративные горелки [1, 2]. Посредником передачи теплоты в регенеративных горелках является шариковая насадка, расположенная в непосредственной близости от горелочного устройства. Основное достоинство регенеративных горелок состоит в том, что удельная поверхность нагрева насадки шарикового регенератора в 10–15 раз больше, чем этот же показатель в кирпичных регенеративных теплообменниках, благодаря малому диаметру шаров (\varnothing 15–20 мм). В связи с этим шариковые регенераторы компактны, их удается разместить вблизи горелки, иногда в стенах печи.

Разработка регенеративных горелок – большое достижение в области использования теплоты высокотемпературных продуктов горения.

Традиционно регенеративные горелки работают попарно. Каждая из двух горелок герметично соединена с отдельным регенератором и может работать как в режиме собственно горелки, так и в режиме дымоотводящего канала для продуктов сгорания. Подвод воздуха к регенератору и отвод дыма из него производятся с помощью одних и тех же трубопроводов, соединенных клапаном-переключателем (или системой согласованно работающих клапанов) с дымовым трактом либо с воздушным трубопроводом в зависимости от того, в каком режиме функционирует соответствующая горелка.

Система из двух регенеративных горелок работает следующим образом. В одной из них сжигается газ с воздухом, подводимым через разогретую насадку регенератора этой горелки. Продукты сгорания, пройдя через рабочее пространство печи, уходят через вторую неработающую горелку в ее регенератор. Насадка регенератора второй горелки таким образом разогревается уходящими продуктами сгорания. После короткого периода времени (обычно 60–300 с) происходит реверс топлива, воздуха и продуктов горения с помощью клапана-переключателя. Зажигание топлива во вновь включенной горелке осуществляется пилотной горелкой либо электрозапалом. Когда температура кладки печи достигает 800 °С, воспламенение топлива происходит самопроизвольно. Оно к соответствующим горелкам подводится синхронно с переключением воздушно-дымового клапана.

В ходе работы системы регенеративных горелок температура насадки регенератора постоянно изменяется. Для обеспечения оптимально-сба-

лансированной работы продолжительность периода между перекидками клапанов может регулироваться как по фиксированному времени, так и по температурным параметрам насадки и теплоносителя.

Регенеративные горелки способны утилизировать до 90 % теплоты уходящих продуктов сгорания. Благодаря этому их температура за регенератором не превышает 150–250 °С [3, 4].

К преимуществам регенеративных горелок можно отнести простоту очистки насадки регенератора: шарики высыпаются из камеры, очищаются от пыли встряхиванием и промывкой в воде, после этого засыпаются обратно в камеру регенератора.

Следует отметить, что для применения регенеративных горелок на действующих печах требуется изменить систему отопления, т. е. установить более мощные вентиляторы и дымососы для подачи воздуха и удаления дымовых газов через насадку регенераторов, которая имеет повышенное аэродинамическое сопротивление.

Насадка регенераторов выполняется из термостойких материалов, устойчивых к химически активным элементам в уходящих газах. В последние годы для них разработаны керамические материалы, которые могут использоваться при температурах свыше 1000 °С. В различных технологических процессах применяют регенеративные теплообменники с шаровой насадкой из глиноземистых материалов, в частности корунда, обладающих высокой прочностью.

Регенеративная система отопления печей получает все большее развитие. Реконструированы и успешно работают печи: стекольной промышленности, для отжига проволоочной спирали, двухзонные методические для нагрева блюмов, для плавки алюминия, а также доменные воздухонагреватели. Применение системы отопления с шариковыми регенераторами дало возможность снизить расход топлива на реконструированных печах в 1,5–2 раза с одновременным повышением производительности на 20–50 % [1].

В КНР эксплуатируются 12 регенеративных печей с температурой подогрева низкокалорийного газа и воздуха в шариковых регенераторах свыше 1000 °С [4]. Так, в 1994–1995 гг. введены в эксплуатацию шесть регенеративных колодцев емкостью по 200 т, и экономия топлива, по сравнению с аналогичными колодцами, оборудованными традиционными регенераторами, составила 40 % с одновременным увеличением производительности на 30 %. Реконструкция четырех отжигательных печей на Фушуньском металлургическом комбинате в 1993–1995 гг. привела к 70 % экономии топлива с повышением производительности на 30 %. В 1997 г. реконструирована методическая печь Шаошаньского металлургического комбината [5].

На кафедре печей Национальной металлургической академии Украины в 2000 г. построена и испытана опытная регенеративная нагревательная печь камерного типа, оборудованная системой регенеративных горелок с насадкой, состоящей из корундовых окатышей диаметром 20 ± 5 мм [3]. Испытание печи проводили совместно с представителями металлургических заводов и ведущих проектных институтов Украины, которые позитивно оценили эффективность работы регенеративной системы отопления. Опытная камерная печь (рис. 1) отапливается природным газом и имеет рабочее пространство 1 длиной 5900 мм. Печь оборудована двумя регенеративными горелками 2 с шариковыми регенераторами 3, вентилятором

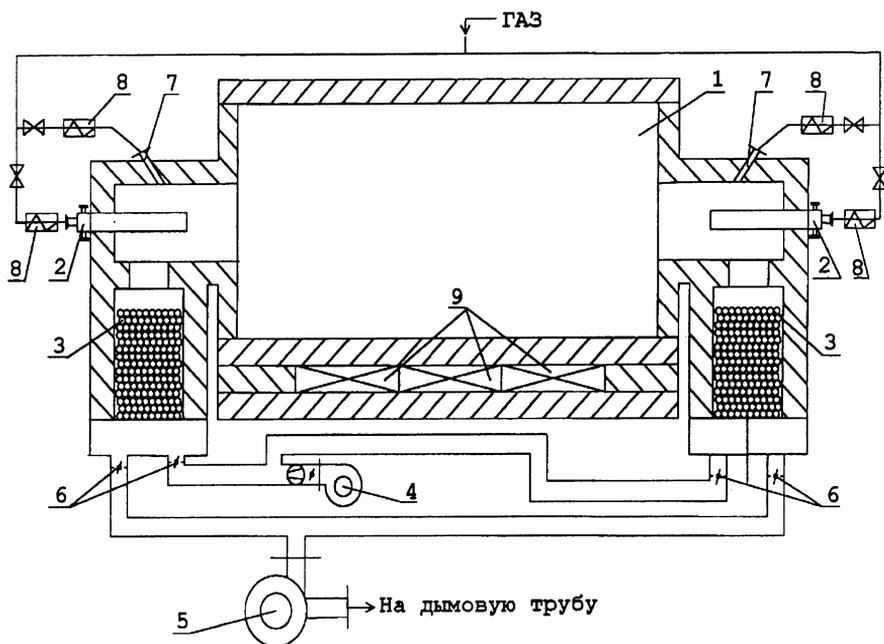


Рис. 1. Опытная регенеративная нагревательная печь

для подачи воздуха на горение 4, дымососом 5 и системой клапанов с автоматическим переключением 6. Переключение клапанов в процессе испытаний происходило через 1 мин. Регенераторы горелок имеют сечение в свету 500×500 мм. Высота слоя насадки 500 мм. Для розжига основных водоохлаждаемых горелок производительностью $40 \text{ м}^3/\text{ч}$ по газу предусмотрены запальные горелки 7 с жестким коротким факелом.

Предусмотрена система автоматического контроля пламени, осуществляющая отсечку газа на основные горелки в случае срыва пламени с запальных горелок потоком дымовых газов. Для отсечки газа перед горелками установлены электромагнитные отсечные клапаны 8. Они также осуществляют перекрытие газа в случае падения давления в общем подводящем газопроводе.

Для обеспечения теплопоглощения в рабочем пространстве печи на подине установлены три водоохлаждаемых калориметра 9, футерованные сверху одним слоем шамотного кирпича толщиной 65 мм. Калориметры и газовые трубы горелок охлаждаются водой.

В процессе испытаний печь работала с расходом природного газа $33,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. После ее разогрева до стационарного состояния (о его наступлении судили по неизменности температур кладки и воды от калориметров) фиксировали значения температур внутренней поверхности кладки, насадки шариковых регенераторов на высоте 25, 250 и 475 мм, дымовых газов перед дымососом; давление и разрежение в насадке регенератора (для периодов охлаждения и нагрева насадки соответственно) на высоте 25, 250 и 475 мм; разрежение перед дымососом; расход природного газа и воздуха; расход и температуру воды, идущей на охлаждение горелок и калориметров.

Результаты измерений представлены в табл. 1.

Результаты измерений

| Среда | | Температура насадки, °С | | | | Давление насадки, Па | |
|--------|-----|-------------------------|-------------|--------------|-------------|----------------------|------|
| | | Низ | | Верх | | Низ | Верх |
| | | Начало цикла | Конец цикла | Начало цикла | Конец цикла | | |
| Газ | 20 | | | | - | | |
| Воздух | 20 | 20 | 915 | 865 | 200 | 50 | |
| Дым | 110 | 135 | 950 | 950 | -150 | -50 | |

| Вода | Калориметры | № | Расход, м ³ /ч | Температура, °С | |
|------|-------------|----|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | | | На входе в калориметр | На выходе из калориметра |
| | | | | 1 | 0,483 |
| 2 | 0,189 | 36 | | | |
| 3 | 0,18 | 43 | | | |

| Горелки | № | Расход | На входе в горелку | На выходе из горелки | |
|---------|---|--------|--------------------|----------------------|----|
| | | | 1 | 0,291 | 40 |
| | | | 2 | 0,327 | 41 |

По данным испытаний составлен тепловой баланс печи. Рассчитывали:

приход теплоты – химическую теплоту топлива $Q_{\text{хим}}$;

теплоту подогрева воздуха $Q_{\text{физ}}$, определяемую по средней за цикл температуре подогрева воздуха;

расход теплоты –

теплоту дымовых газов $Q_{\text{ух}}$ на выходе из регенератора;

теплоту, воспринимаемую калориметрами, $Q_{\text{кал}}$;

теплоту, затраченную на охлаждение двух горелок, $Q_{\text{гор}}$;

теплоту нагрева насадки регенератора при стационарном состоянии печи принимали равной теплоте подогрева воздуха $Q_{\text{рег}} = Q_{\text{физ в}}$.

По разности приходных и расходных статей теплового баланса находили суммарные потери теплоты теплопроводностью через кладку печи и регенератора, а также потери, связанные с выбиванием продуктов сгорания и подсосом холодного воздуха, $Q_{\text{пот}}$. Результаты расчета теплового баланса регенеративной камерной печи приведены в табл. 2.

По данным теплового баланса рассчитали коэффициент использования топлива (КИТ) в печи как отношение доли теплоты, остающейся в рабочем пространстве, к химической теплоте топлива (температуру подогрева воздуха принимали средней за период и равной $\bar{t}_в = \frac{915+865}{2} = 890 \text{ } ^\circ\text{C}$)

**Результаты расчета теплового баланса
регенеративной печи за цикл**

| Приход теплоты | | | Расход теплоты | | |
|----------------|-------|------|----------------|--------|-------|
| Статья | кДж | % | Статья | кДж | % |
| 1. $Q_{хим}$ | 20883 | 73,4 | 1. $Q_{ух}$ | 1121,8 | 3,96 |
| 2. $Q_{физв}$ | 7566 | 26,6 | 2. $Q_{кал}$ | 986,8 | 3,48 |
| | | | 3. $Q_{гор}$ | 1015,4 | 3,58 |
| | | | 4. $Q_{рег}$ | 7566 | 26,61 |
| | | | 5. $Q_{пот}$ | 17709 | 62,37 |
| Всего | 28399 | 100 | Всего | 28399 | 100 |

$$\eta_1 = \frac{Q_H^P - Q_{ух}^{рп} + Q_{фв}}{Q_H^P} \times 100 \% = \frac{Q_H^P - v_d c_d t_d + L_b c_b t_b}{Q_H^P} \times 100 \% =$$

$$= \frac{37300 - 11,89 \cdot 1,577 \cdot 950 + 10,86 \cdot 1,398 \cdot 890}{37300} = 88,5 \%$$

КИТ для данной установки, рассчитанный без учета регенерации теплоты уходящих газов в шариковых регенераторах, составил бы

$$\eta_2 = \frac{Q_H^P - Q_{ух}^{рп}}{Q_H^P} \times 100 \% = \frac{Q_H^P - V_d c_d t_d}{Q_H^P} \times 100 \% =$$

$$= \frac{37300 - 11,89 \cdot 1,577 \cdot 950}{37300} = 52,2 \%$$

Расчеты КИТ производили с учетом данных газового анализа в рабочем пространстве печи. Коэффициент расхода воздуха составил 1,1.

Экономия природного газа от применения регенеративного отопления составляет

$$\Theta = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} \times 100 \% = \frac{88,5 - 52,2}{88,5} \times 100 \% = 41 \%$$

степень регенерации теплоты –

$$r_{\phi} = \frac{c_b t_b}{c_d t_d} = \frac{1,398 \cdot 890}{1,577 \cdot 950} = 0,831$$

Результаты, полученные в ходе эксперимента, подтверждают данные, приведенные в [1, 2, 4], и свидетельствуют о том, что регенеративные го-

релки являются высокоэффективным средством экономии топлива для широкого класса промышленных печей.

Нами были разработаны математические модели шарикового регенератора и регенеративной реверсивной печи [5], основанные на применении одномерной слоевой модели теплообмена с использованием численно-аналитического метода (ЧАМ) [6]. Произведен расчет параметров регенератора применительно к условиям проведенного эксперимента.

Экспериментальные и расчетные значения перепада давлений Δp и распределения температур по высоте насадки соответствуют друг другу с достаточной для практики точностью, что свидетельствует о возможности применения математической модели регенератора к проектированию шариковых регенераторов.

При проектировании печей, оборудованных регенеративными горелками, предъявляются жесткие требования к выбору условий сжигания топлива в рабочем пространстве. Высокотемпературный подогрев воздуха в регенеративных горелках повышает вероятность локального перегрева поверхности нагреваемых изделий, расположенных в непосредственной близости от устья горелки.

Из уравнения мгновенного теплового баланса газового потока в рабочем пространстве печи с учетом условий выгорания топлива в факеле выделены три параметра, влияющие на процессы распределения теплоты по длине рабочего пространства:

1) $K_{гор}$ – доля топлива, сжигаемого в зоне теплообмена в факеле вне горелки;

2) $F_{гор}/F_{общ}$ – отношение площади поверхности слитков, расположенных непосредственно под факелом горелки, к суммарной площади поверхности садки (отношение $F_{гор}/F_{общ}$ можно назвать безразмерной длиной факела);

3) $\tau_{рев}$ – время реверса печных газов (время между перекидкой клапанов).

В соответствии с математической моделью камерной печи с учетом условий горения топлива в факеле и реверса печных газов было проведено расчетное исследование влияния указанных параметров на равномерность нагрева садки по длине печи с целью определения их регламентированного значения [7].

Рассчитывали нагрев холодной садки спокойной стали из 10 слитков радиусом 0,45 м, эквивалентных трапецеидальным слиткам сечением 847×847 мм, массой 11,9 т, установленных в два ряда (рис. 2). Долю топлива (природного газа), сжигаемого в зоне теплообмена, $K_{гор}$ изменяли в интервале от 0,7 до 1. Отношение $F_{гор}/F_{общ}$ варьировали в пределах от 0,5 до 1. Моделировали двухстадийный режим нагрева: первый период – подъем температуры при максимальной тепловой мощности (6 МВт) до контрольной температуры печи, рассчитанной по требуемым конечным температурным параметрам нагрева слитков, и второй период – выдержка при этой контрольной температуре. Нагрев заканчивался при достижении на поверхности металла заданной температуры (1200 °С) и заданного перепада температур между поверхностью и центром слитка (50 °С) в наиболее горячей зоне.

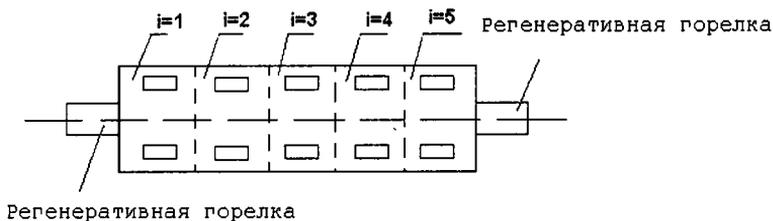


Рис. 2. Расположение слитков в печи

Моделирование показало, что при сжигании даже 10 % топлива до попадания в рабочую камеру печи (в горелочном устройстве), т. е. при $K_{гор} = 0,9$, проявляется неравномерность нагрева садки по длине печи, причем наиболее нагретыми являются крайние слитки. При сжигании всего топлива вне горелки ($K_{гор} = 1$) перепад температур по поверхности слитков составил $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приемлемо для такого класса печей.

Результаты моделирования нагрева аналогичной садки горячего посада качественно совпали с выводами, сделанными для садки холодного посада. Наибольший перепад температур по поверхности слитков составил $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $K_{гор} = 1$.

При исследовании влияния длины факела регенеративной горелки на равномерность нагрева садки установлено, что с увеличением длины факела повышается степень выравнивания температур. Уже при $F_{гор}/F_{общ} = 0,9$ достигается приемлемая равномерность нагрева слитков по длине печи, при этом достигается заданный перепад температур внутри слитка ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Выводы по результатам моделирования нагрева слитков горячего посада соответствуют выводам, сделанным по анализу нагрева слитков холодного посада.

Время реверса на равномерность нагрева садки в пределах, характерных для работы регенеративных горелок ($60\text{--}300\text{ с}$), практически не влияет. При этом длительность нагрева и удельный расход условного топлива оставались постоянными.

По результатам моделирования режимы при $F_{гор}/F_{общ} = 0,9\text{--}1,0$ и $K_{гор} = 1$ можно считать удовлетворительными по качеству нагрева слитков холодного и горячего посада в регенеративных камерных печах.

ВЫВОДЫ

1. Применение регенеративных горелок с шариковой насадкой, обладающей высокоразвитой поверхностью, является перспективным методом экономии топлива в промышленных печах металлургии и машиностроения.

2. Испытание первой в Украине нагревательной печи с регенеративными горелками подтвердило работоспособность реверсивной системы отопления с переключением клапанов через 1 минуту и возможность уменьшения расхода природного газа в $1,5\text{--}2,0$ раза.

3. На основании математического моделирования работы нагревательной камерной печи с регенеративными горелками сделан вывод о том, что удовлетворительная равномерность нагрева крупнотоннажной садки по длине печи достигается при сжигании всего топлива в факеле вне горелки

и при длине факела, равной длине печи. Время реверса в пределах, характерных для работы регенеративных горелок, на равномерность нагрева садки по длине печи практически не влияет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сезоненко Б. Д., Орлик В. Н., Алексеенко В. В. Повышение эффективности использования природного газа при отоплении промышленных печей регенеративными горелками // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1996. – № 1. – С. 14–18.
2. Губинский В. И. Metallургическая теплотехника на пороге столетий. Современные проблемы металлургии: Сб. науч. тр. – Днепропетровск, 1999. – Вып. 1. – С. 197–207.
3. Затопляев Г. М., Еремин А. О. Теплотехническое испытание нагревательной печи с регенеративными горелками // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 3. – С. 85–87.
4. Хоучен Лян. Современное состояние и перспективы развития высокопроизводительных регенеративных печей (ВРП) в КНР: Сб. науч. тр. ГМетАУ (Энергетика. Metallургия): В 2-х т. – Т. 1. – Днепропетровск: ГМетАУ, 1999. – С. 195–199.
5. Еремин А. О. Математическая модель регенеративной камерной печи с учетом условий выгорания топлива и реверса печных газов: Сб. науч. тр. НМетАУ. – Днепропетровск: НМетАУ, 2000. – С. 40–43.
6. Губинский В. И., Лу-Чжун-У. Теория пламенных печей. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
7. Еремин А. О., Губинский В. И. Влияние условий сжигания топлива на равномерность нагрева садки в камерных печах с регенеративными горелками // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 2. – С. 97–99.

Представлена кафедрой теплофизики
и экологии металлургических печей

Поступила 4.09.2001

УДК 621.316

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ТИПА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ПГУ УТИЛИЗАЦИОННОГО ТИПА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Канд. техн. наук, доц. ЯКОВЛЕВ Б. В.,
инженеры ЛЕВШИН Н. В., ЧАПАЙКИНА Н. Г.

РУП «БелНИПИэнергопром»

Канд. техн. наук КАЧАН С. А.

Белорусская государственная политехническая академия

Теплофикационные ПГУ средней мощности могут найти широкое применение для энергоснабжения небольших городов и промышленных комплексов. В составе таких ПГУ используются ГТУ мощностью 20—50 МВт.

Котлы-утилизаторы (КУ) теплофикационных ПГУ средней мощности, как правило, выполняются одноконтурными и имеют на выходе поверхность сетевого подогревателя (СП). Учитывая небольшую мощность паро-