

УДК 620:172.251:621.182.3

Ерёмин А. О.
Гупало Е. В.

СОВРЕМЕННЫЙ СПОСОБ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ВОЗДУХОМ В МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Проходные методические печи непрерывного действия широко используются для нагрева заготовок перед их обработкой давлением. Как правило, методические печи являются противоточными агрегатами: нагреваемый металл движется вдоль печи навстречу продуктом сгорания топлива. Реже встречаются прямоточные и прямопротивоточные методические печи. Методические печи подразделяются на толкательные печи, печи с шагающим подом (ПШП), печи с шагающими балками (ПШБ) и кольцевые (устаревшее – карусельные) печи. Наибольшее распространение для нагрева сляба, квадрата и других некруглых заготовок получили толкательные печи, ПШП и ПШБ.

Наиболее эффективным способом снижения энергопотребления в таких печах является подогрев реагентов горения (в большинстве случаев только воздуха горения) в теплоутилизаторах – рекуператорах и регенераторах. Высокоэффективные современные теплоутилизаторы – малогабаритные регенераторы с насадкой из мелких элементов имеют высокоразвитую поверхность теплообмена. За счёт этого становятся возможными утилизация до 90 % теплоты уходящих из печи дымовых газов, подогрев воздуха горения до 900–1 000 °С и снижение расхода топлива на 20–50 %. Однако, из-за значительной стоимости насадки современных регенераторов (так, цена корундовой шариковой насадки достигает 1 000 \$ и более за 1 тонну), некоторых вопросов, касающихся системы управления сжиганием топлива с высокотемпературным воздухом, равномерности нагрева металла, в Украине печи с минирегенераторами пока не получили широкого распространения. В методических печах, использующих газообразное топливо, самым распространённым остаётся факельный способ сжигания, который отличается простотой регулирования тепловой мощности и тепловыделения в печи.

Факельный способ сжигания топлива имеет ряд недостатков. Вследствие концентрированного подвода теплоты и отвода отработанного дыма при факельном сжигании топлива создаются предпосылки к возникновению неравномерного температурного поля и некачественного нагрева металла. В зонах высоких температур интенсифицируется образование «термических» NO_x . Эти явления усугубляются при наличии высокотемпературного подогрева воздуха горения.

Равномерности нагрева металла в печах добиваются рециркуляцией и реверсом печных газов, импульсным нагревом, отдельной по периодам нагрева подачей топлива, качанием горелки, изменением направления факела, многостадийным сжиганием топлива и другими способами [1–3]. Все они преследуют одну цель – распределение выделения теплоты в возможно большем объёме печи и создание одинаковых условий теплообмена для всего нагреваемого металла. Таким образом, основными методами достижения равномерности нагрева металла в печах является рациональное управление движением газов и сжиганием топлива, обеспечивающее равномерный перенос теплоты к локальным участкам металла и футеровки [1].

Главным фактором, влияющим на скорость образования бензапирена, оксидов азота и серы, других вредных выбросов при сжигании топлива, является температура в очаге горения. Практически все технологические методы снижения вредных выбросов связаны с устранением высокотемпературных зон в факеле или растягиванием факела в рабочем пространстве агрегата. К ним относятся: впрыск пара или воды в очаг горения; увеличение светимости факела и, как следствие, интенсификация теплопередачи; рециркуляция продуктов горения к корню факела (внешняя и внутренняя); ступенчатое сжигание топлива [2].

Из литературы [4] известно, что наиболее эффективным способом снижения угара в рабочем пространстве печи является создание малоокислительной атмосферы за счёт регламентированного перемешивания реагентов горения и растянутого факела в пределах рабочего пространства нагревательной печи.

С нашей точки зрения, одним из перспективных методов достижения высокого (с точки зрения равномерности нагрева) качества нагрева металла в методических печах, снижения выбросов оксидов азота в атмосферу и уменьшения угара металла является объёмный способ сжигания топлива с организованной рециркуляцией печных газов.

Целью работы является разработка технических решений по совершенствованию тепловой работы методической печи с целью повышения качества нагрева металла, снижения расхода топлива, окисления и вредных выбросов в печи.

Применение объёмного сжигания топлива приводит к изменению условий локальной теплопередачи к металлу и футеровке в печи. Отсутствие концентрированных источников теплоты приводит к тому, что вся поверхность металла находится в равнозначных условиях нагревания. В печи нет застойных зон или металла, находящегося в таких зонах. Организовать объёмное сжигание топлива можно с помощью интенсивной рециркуляции печных газов [5], сжигания топлива при регулируемом его перемешивании с воздухом [6] и регламентированного перемешивания реагентов горения с последующим распределённым сжиганием топлива в печи [7–9].

Последний способ представляется наиболее перспективным при сжигании топлива с воздухом, подогретым до высоких температур. Наличие в объёмной зоне горения топливно-воздушной смеси с температурой, превышающей температуру воспламенения топлива за счёт высокотемпературного подогрева воздуха в современных регенераторах, делает возможным зажигание топлива и его горение при любом количестве окислителя – кислорода воздуха.

Организация распределённого объёмного сжигания топлива в нагревательных печах, оборудованных высокоэффективными регенераторами (или, иначе, объёмно-регенеративного способа сжигания топлива), обеспечивается за счёт разделения потоков топлива и воздуха в горелочном устройстве и обеспечения динамических характеристик газоздушных струй, при которых гарантируется заданное качество перемешивания реагентов горения [7, 9]. Принцип объёмно-регенеративного сжигания топлива в печах подробно изложен в патенте [8].

Объёмно-регенеративный способ сжигания топлива в методических печах реализуется путём организации регламентированного перемешивания топлива с воздухом в каждой из зон нагрева металла. Необходимость реконструкции методических печей, которые отапливаются природным газом, связана, прежде всего, с высокой стоимостью топлива и неудовлетворительной работой системы утилизации теплоты дымовых газов. Температура подогрева воздуха в существующих рекуператорах толкательных методических печей редко превышает 300 °С. Основной расходной статьёй теплового баланса печи, приводящей высокому расходу топлива, являются потери теплоты с уходящими газами, которые достигают 45–50 %. Также имеется неравномерность нагрева металла по длине заготовок в методических печах, имеющих рабочее пространство шириной от 6 до 12 и более метров.

В качестве объекта реконструкции выбрана типовая толкательная трехзонная нагревательная методическая печь проекта Укргипромеза с наклонным подом для нагрева заготовок перед прокаткой. Печь отапливается природным газом. Нагреваемый металл – углеродистые и легированные конструкционные стали. Температура нагреваемого металла – 1 100–1 150 °С. Размеры пода печи: ширина – 12,64 м; длина – 15,2 м; площадь активного пода – 183 м². Температуры: в сварочной и томильной зонах – до 1 250 °С; у окна посадка – 900–1 000 °С. Максимальная тепловая мощность печи 76,8 МВт. Температура подогрева воздуха в рекуператоре (по проекту) составляет 400 °С.

Расчёт существующих показателей работы печи показал, что коэффициент использования топлива (КИТ) существующей печи (с рекуператором) составил 0,522, удельный расход условного топлива – 59,33 кг у.т./т, максимальный часовой расход топлива в суще-

ствующей печи – 6 000 м³/час. Высокие показатели топливопотребления связаны с рядом недостатков работы, выявленных при исследовании методической печи одного из металлургических комбинатов Украины. Так, вследствие низкой газоплотности дымоотводящих боровов и подсосов воздуха в печь, температура дыма перед рекуператором не превышает 620–670°C, а подогрев воздуха для горения составляет 220–260°C. Температура наружного ограждения печи достигает 200–250°C (а в некоторых точках – 400°C), что указывает на критический износ футеровки. Потери теплоты с дымом (по тепловому балансу) превышают 45 %.

На основании теплотехнических исследований печи были разработаны рекомендации по совершенствованию её конструкции и тепловой работы. Одной из основных рекомендаций стала установка малогабаритных регенераторов с шариковой насадкой или индивидуального воздухоподогревателя для подогрева воздуха, идущего на горение. Для устранения негативных последствий высокотемпературного подогрева воздуха (повышение концентрации вредных выбросов, неравномерность температурного поля в печи, рост угара металла) горелки должны обеспечивать регламентированное перемешивание топлива с воздухом и объёмное сжигание.

Для разработки технических решений была построена и реализована в виде комплекса программ на ЭВМ математическая модель тепломассообменных процессов. Модель позволяет рассчитать концентрации компонентов горения в различных сечениях печи, поля скоростей движения продуктов сгорания в печи от горелочных устройств к дымовым окнам, значения максимальных, минимальных и средних тепловых потоков на поверхностях теплообмена и температурные поля в различных сечениях печи и нагреваемого металла.

Математическая модель состоит из следующих компонентов: модель движения газа; двухпараметрическая к-ε модель турбулентности; уравнение энергии; уравнение радиационного переноса в газе; модель химических реакций окисления топлива.

Целью моделирования тепловой работы методической печи является:

- проверка правильности принятых решений, в том числе размеров и расположения горелочных узлов на стенах печи;
- определение возможности нагрева металла до заданного теплового состояния при максимальной производительности;
- расчёт температурных и тепловых полей, полей скоростей теплоносителей, концентрация компонентов горения и распределение давления в рабочем пространстве печи при предлагаемой системе отопления;
- проверка полноты сгорания при объёмно-регенеративном отоплении печи.

На основании моделирования разработана конструкция горелочных устройств, проработана их установка, обеспечивающая необходимую тепловую мощность по зонам печи и объёмное сжигание топлива. Размещение горелок и регенераторов приведены на рис. 1.

Расчитанные расходы теплоносителей через предложенную систему отопления по отдельным горелкам представлены в таблице 1. Горелка № 1 в томильной зоне – резервная и предназначена для нагрева металла с прогреваемой толщиной более 150 мм.

Таблица 1

Расходы теплоносителей (при н. у.) через горелочные устройства методической печи

№ горелки	Зона	№ горелочного блока	Расход топлива, м ³ /ч	Расход воздуха, м ³ /ч	Выход дыма, м ³ /ч
1	Томильная	I (Резерв)	300	3 060	3 672
2	Томильная	I	300	3 060	3 672
3–5	Сварочная	II	1 300	13 250	15 900
6–9	Сварочная	III	2 900	29 580	35 500

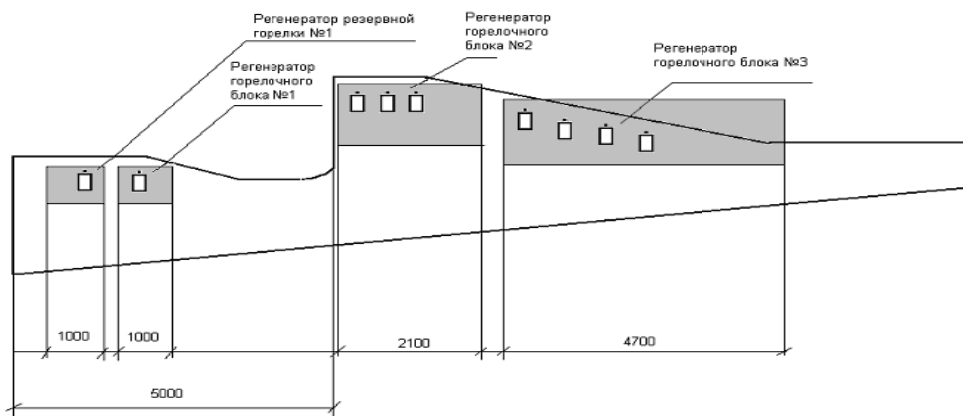


Рис. 1. Расположение горелочных блоков и регенераторов на печи

На рис. 2 показаны абсолютные значения результирующих тепловых потоков на металл (кВт) по зонам печи, полученные в результате моделирования теплообмена, а на рис. 3 и 4 – распределение температуры в выбранных сечениях печи.

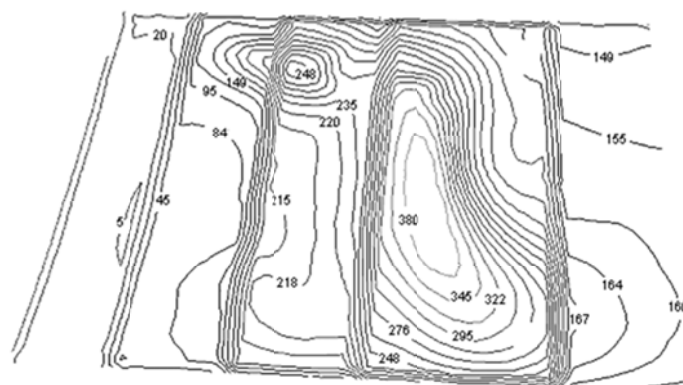


Рис. 2. Результирующие тепловые потоки на поверхности металла

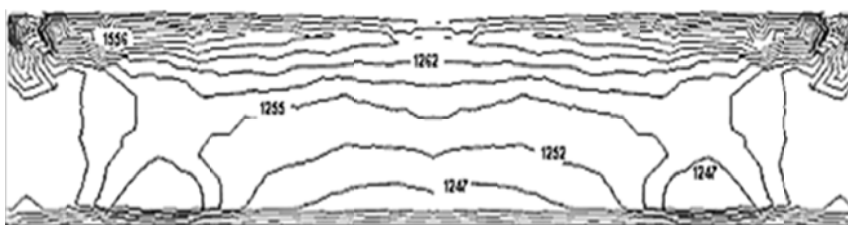


Рис. 3. Температурное поле в сечении 3 горелки

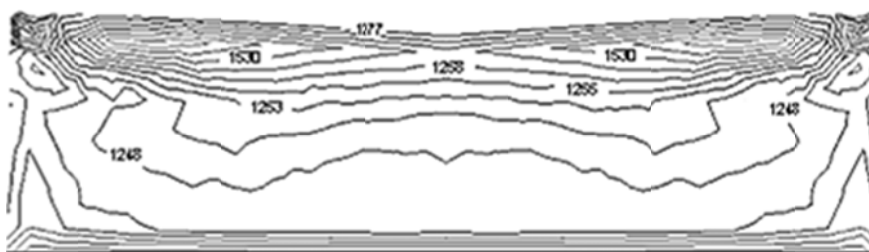


Рис. 4. Температурное поле в сечении 5 горелки

Результаты расчетов показали, что КИТ при отоплении печи с объёмно-регенеративным отоплением равен 0,9. Удельный расход условного топлива снизился до 34,37 кг у.т./т или на 42 %. Максимальный расход природного газа в предложенной системе отопления уменьшился до 4 500 м³/час. Срок окупаемости реконструкции – не более 6 месяцев при работе печи на максимальной производительности.

ВЫВОДЫ

Организация распределённого объёмного сжигания топлива в методической печи с высокотемпературным подогревом воздуха в шариковых регенераторах позволяет улучшить показатели тепловой работы, получить равномерное температурное поле в печи и качественный нагрев заготовок. Снижение количества вредных выбросов и создание малоокислительной атмосферы в рабочей камере печи осуществляется за счёт организации процесса сжигания и распределения горения вдоль траектории движения печных газов. Существенная экономия топлива связана с повышением температуры подогрева воздуха в современных регенераторах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губинский В. И. *Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей* / В. И. Губинский // *Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов НМетАУ. В двух книгах. – Книга первая. – Днепропетровск : Пороги, 2005. – С. 149–156.*
2. Шульц Л. А. *Элементы безотходной технологии в металлургии* / Л. А. Шульц. – М. : Металлургия, 1991. – 174 с.
3. Губинский В. И. *Теория пламенных печей* / В. И. Губинский, Лу Чжун-У. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с.
4. Губинский В. И. *Окисление стали в нагревательных печах и способы его уменьшения : учебное пособие* / В. И. Губинский. – К. : УМК ВО, 1992. – 44 с.
5. Пилипенко Р. А. *Камерные термические печи прецизионного нагрева металла* / Р. А. Пилипенко // *Межд. симпоз. «ОТТОМ-2» : сб. докл. – Харьков : ННЦХФТИ, 2001. – С. 20–25.*
6. Шульц Л. А. *По следам разработки и внедрения печей со стадийным сжиганием топлива и перспективы их развития в металлургии* / Л. А. Шульц // *Изв. Вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 10. – С. 62–69.*
7. Ерёмин А. О. *Влияние динамических характеристик струй топлива и воздуха на циркуляцию и температурное поле газов в камерной печи с одной горелкой* / А. О. Ерёмин, В. И. Губинский // *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія. – 2011. – Вип. 3. – С. 102–116.*
8. Пат. 26272 Україна, МПК F23N 5/26. *Об'ємно-регенеративний спосіб спалювання палива при нагріванні металу* / Єр'омін О. О., Губинський В. Й., Сибір А. В. (Україна) ; заявник та патентовласник Національна металургійна академія України. – № u200705240 ; заявл. 14.05.2007 ; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 14. – 2 с.
9. Ерёмин А. О. *Динамические характеристики топлива и воздуха в горелочных устройствах при объёмно-регенеративном способе сжигания топлива в промышленных печах* / А. О. Ерёмин // *Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов НМетАУ. – Днепропетровск : Новая идеология. – 2009. – Вып. 1(16). – С. 102–109.*

REFERENCES

1. Gubinskij V. I. *Aktual'nye zadachi rekonstrukcii nagrevatel'nyh pechej* / V. I. Gubinskij // *Metallurgicheskaja teplotehnika : sbornik nauchnyh trudov NMetAU. V dnuh knigah. – Kniga pervaja. – Dnepro-petrovsk : Porogi, 2005. – S. 149–156.*
2. Shul'c L. A. *Jelementy bezotходnoj tehnologii v metallurgii* / L. A. Shul'c. – M. : Metallurgija, 1991. – 174 s.
3. Gubinskij V. I. *Teorija plamennyh pechej* / V. I. Gubinskij, Lu Chzhun-U. – M. : Mashinostroenie, 1995. – 256 s.
4. Gubinskij V. I. *Okislenie stali v nagrevatel'nyh pechah i sposoby ego umen'shenija : uchebnoe posobie* / V. I. Gubinskij. – K. : UMK VO, 1992. – 44 s.
5. Pilipenko R. A. *Kamernye termicheskie pechi precizionnogo nagreva metalla* / R. A. Pilipenko // *Mezhd. simpoz. «ОТТОМ-2» : sb. dokl. – Har'kov : NNCHFTI, 2001. – S. 20–25.*
6. Shul'c L. A. *Po sledam razrabotki i vnedrenija pechej so stadijnym szhiganiem topliva i perspektivy ih razvitija v metallurgii* / L. A. Shul'c // *Izv. Vuzov. Chernaja metallurgija. – 2005. – № 10. – S. 62–69.*
7. Erjomin A. O. *Vlijanie dinamicheskikh harakteristik struj topliva i vozduha na cirkuljaciju i temperaturnoe pole gazov v kamernoj pechi s odnoj gorelkoj* / A. O. Erjomin, V. I. Gubinskij // *Tehnichna teplofizika ta promislova teploenergetika : zb. nauk. pr. – Dnipropetrovsk : Nova ideologija. – 2011. – Vip. 3. – S. 102–116.*
8. Pat. 26272 Ukraїna, MPK F23N 5/26. *Ob'emno-regenerativnij sposib spaljuvannja paliva pri nagrivanii metalu* / Er'omin O. O., Gubins'kij V. J., Sibir A. V. (Ukraїna) ; zajavnik ta patentovlasnik Nacional'na metalurgijna akademija Ukraїni. – № u200705240 ; zajavl. 14.05.2007 ; opubl. 10.09.2007, Bjul. № 14. – 2 s.
9. Erjomin A. O. *Dinamicheskie harakteristiki topliva i vozduha v gorelochnyh ustrojstvah pri ob'jomno-regenerativnom sposobe szhiganija topliva v promyslennyh pechah* / A. O. Erjomin // *Metallurgicheskaja teplotehnika : sbornik nauchnyh trudov NMetAU. – Dnepropetrovsk : Novaja ideologija. – 2009. – Vyp. 1(16). – S. 102–109.*

Ерёмин А. О. – д-р техн. наук, доц. НМетАУ

Гупало Е. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: aoceremin@gmail.com; gupalo@ua.fm