

54. Kee R.J., Rupley F.M., Miller J.A. The CHEMKIN thermodynamic data base, SANDIA Report SAND87-8215, Sandia National Laboratories, Livermore, CA, 1987.
55. Burcat A. Thermochemical data for combustion, B: Combustion chemistry. Gardiner W.C. (ed). N.Y. : Springer, 1984.
56. Chase M.W., Jr., Curnutt J.L., Downey J.R., Jr., McDonald R.A., Syverud A.N., and Valenzuela E.A. JANAF Thermochemical Tables. Supplement, 1982, 714 p.
57. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. [Thermodynamic modeling in high temperature inorganic systems]. Moscow : Metallurgy, 1994, 353 p. (Rus.)
58. [Rethinking the degree of responsibility before the future: national report on the implementation of the state policy on energy efficiency in 2009]. Kiev : NAER-NAU, 2010, 254 p. (Ukr.)
59. Iakubovich M.N., Struzhko V.L., Strizhak P.E. [The influence of conditions process and catalyst composition on its performance in synthesis Fischer-Tropsch]. Kataliz v promyshlennosti, 2008, (1), pp. 14–19. (Rus.)
60. Arita K., Iizuka S. Plasma-assited conversion of carbon dioxide to methane by low-pressure pulse discharge. Proc. 31th Intern. Conf. on Partially Ionized Gases (Spain, Granada, July 14–19, 2013). — Granada, 2013. — 4 pp.
61. Zhovtyansky V.A., Nevzglyad I.O., Iakymovych M.V. Conversion of carbonaceous renewable raw materials by using plasma technology. Vidnovljuval'na energetyka, 2013, (4), pp. 5–13. (Rus.)
62. Lavrenchenko G.K. Modern technologies of oxygen production from air. Sbornik tezisov dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii «Energojeffektivnost'-2010» (Kiev, 19–21 Okt. 2010). Kiev : Institute Gaza NASU, 2010, pp. 54–55.

Received October 26, 2015

УДК 666.884:621.783:662.951.2

Пилипенко Р.А.¹, канд. техн. наук, **Пилипенко А.В.¹**,
Логвиненко Д.М.², канд. техн. наук

¹ **Институт газа НАН Украины, Киев**

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: zhovt@ukr.net

² **ГП «Укрметртестстандарт», Киев**

ул. Метрологическая, 4, 0311356 Киев, Украина

Опыт применения технологии точного нагрева при обжиге огнеупорных изделий

В процессе обжига огнеупорных и теплоизоляционных изделий в туннельной печи применена технология точного нагрева, основанная на организации интенсивной внутренней рециркуляции газов между пакетами изделий. Движение газов происходит по расчетным геометрическим контурам внутри рабочего пространства за счет кинетической энергии скоростных струй продуктов сгорания. Источником таких струй являются скоростные горелки серии ГНБ. Благодаря интенсификации и равномерности нагрева устранены защитные муфели вокруг пакетов, повышена производительность печи, снижены удельные расходы топлива. *Библ. 6, рис. 4, табл. 1.*

Ключевые слова: огнеупоры, обжиг, равномерность нагрева, скоростные горелки, рециркуляция газов.

При обжиге объемных садок керамических и огнеупорных изделий в газовых туннельных печах наблюдается значительная неравномерность температур по высоте и ширине рабочего канала, что негативно сказывается на качестве обжигаемых изделий, времени обжига и затратах топлива. Одной из основных причин этого является ощутимый (иногда до 20 Па) градиент статических давлений по высоте канала, что требует максимального уплотнения стыков меж-

ду вагонетками и вдоль их состава для исключения подсосов холодного воздуха в рабочий канал. Другой причиной неравномерности нагрева является наличие относительно большой (по отношению к садке в несколько раз) массы футерованных вагонеток. Применение канализированного «теплого» пода, легковесных огнеупоров и теплоизоляции эту разницу в массах сокращает, но не исключает. При низких скоростях движения греющих газов вдоль канала это

приводит к естественному температурному расщеплению потока по высоте. И, наконец, несоответствие габаритов факелов газовых горелок и стесненных зазоров между самими садками и садками и боковыми стенами приводит к прямому попаданию пламени на обжигаемые изделия и их пережогу. Последнее, как правило, встречается там, где при выборе горелочных устройств не учитываются ни особенности агрегата, ни технологии нагрева.

Применение технологии точного нагрева крупногабаритных изделий и садов [1, 2] позволяет интенсифицировать процесс нагрева и минимизировать неравномерность нагрева в туннельных и камерных печах. В этом случае в свободном пространстве печи организована интенсивная внутренняя рециркуляция греющих газов вокруг садов и (или) вдоль них. В отличие от внешней рециркуляции при внутренней рециркуляции часть греющих газов не покидает печь для последующего возврата, а циркулирует внутри рабочего пространства по определенным контурам. При этом происходит не только интенсивное перемешивание и усреднение температуры греющей среды, но и возрастает конвективная составляющая в теплопередаче от газов к поверхности нагрева [3], за счет чего интенсифицируется и ускоряется нагрев. Этот способ выравнивания температур в объеме печных газов широко используется в промышленных печах.

Для этой цели наиболее предпочтительным является использование кинетической энергии струй продуктов сгорания [1, 4]. Такие струи обеспечиваются скоростными горелками, в которых скорость истечения струи достигает 100 м/с, а иногда и выше. Интенсивность рециркуляции газов определяется величиной кратности рециркуляции K , которая представляет собой отношение количества рециркулирующих в рабочем пространстве газов $V_{см} = V_1 + V_2$ ко вновь поступающему: $K = V_{см}/V_1$. Очевидно, чем больше количество присоединенных (инжектируемых) газов V_2 , тем больше кратность рециркуляции и выше равномерность нагрева. В связи с этим долгое время стремились к использованию струй со скоростью до 200 м/с и выше, ошибочно считая, что при этом будет достигнута более высокая, свыше 10, кратность рециркуляции и, следовательно, более высокая равномерность нагрева [1]. Однако рост кратности рециркуляции выше 4 практически не влияет на дальнейшее выравнивание температур в объеме греющих газов [3], а повышение скорости струи выше 100 м/с приводит к нерациональным затратам энергии дутьевых ус-

ройств и усложнению конструкций горелок. Согласно разработанной в Институте газа НАН Украины технологии точного нагрева в пламенных печах с внутренней рециркуляцией греющих газов, движение газов осуществляется по рециркуляционным контурам в свободном пространстве печи. Количество контуров, их геометрические и режимные параметры рассчитываются, исходя из тепловой мощности печи, режимных и геометрических параметров скоростной горелки, температуры и геометрии печи, требуемой равномерности нагрева [2, 5].

Для реализации технологии точного нагрева в камерных и туннельных печах в Институте газа НАН Украины разработана серия скоростных горелок ГНБ мощностью от 80 кВт до 1,0 МВт [6].

Горелки серии ГНБ относятся к горелочным устройствам так называемого «кинетиического горения», принцип действия которых основан на предварительной подготовке горючей смеси и обязательной стабилизации корня факела. Эти горелки обеспечивают жесткий малогабаритный факел, полное сгорание смеси в пределах свободного пространства агрегата ($CO \leq 0,0015\%$). Содержание оксидов азота в факеле не превышает 124 мг/м³ (зависит от температуры в рабочем пространстве и избытка воздуха), скорость истечения смеси $W \leq 100$ м/с. Горелки работают на газе низкого и среднего давления устойчиво в широком, не ниже 1 : 5, интервале изменения тепловой нагрузки, а также при резкой смене нагрузки. Они просты в управлении, надежны в работе при ручном и автоматическом регулировании. Для работы в автоматическом режиме горелки комплектуются электродами розжига и контроля наличия пламени. Длина горелок определяется толщиной футеровки. Они устанавливаются в обойме, легко демонтируются. На печах с рабочей температурой выше 1200 °С горелки устанавливаются со специальным защитным огнеупорным стаканом.

В зависимости от геометрии печи и садки скоростные горелки устанавливаются либо в один ряд на уровне пода в шахматном порядке, либо в два уровня также в шахматном порядке, при этом горелки нижнего и верхнего рядов устанавливаются оппозитно по отношению друг к другу.

Ниже на примере реконструкции печи для обжига огнеупоров показана эффективность применения этой технологии при высокотемпературном обжиге с использованием скоростных горелок ГНБ.

Туннельная печь ЗАО «Теплохимонтаж» (г. Старый Оскол, РФ) была введена в эксплуатацию в 2002 г. и предназначена для обжига легковесных теплоизоляционных огнеупорных и

высокоогнеупорных изделий общего назначения с кажущейся плотностью 0,5–1,3 г/см³ и сложнорасонных огнеупорных изделий для различных тепловых агрегатов с кажущейся плотностью 2,0–2,5 г/см³.

Длина рабочего пространства печи — 24,2 м, ширина — 928 мм, высота от канализированной подины до замка арочного свода — 928 мм. Пакет изделий (садка) размещается на вагонетках длиной 1100 мм, шириной 850 мм. Печь отопляется природным газом. Температурный режим работы печи зависит от типа обжигаемой партии продукции.

До реконструкции в боковых стенах зоны обжига были установлены двухпроводные горелки 1ГТП-25-15-0,5 в количестве 20 шт., по 10 шт. с каждой стороны печи, с шагом 550 мм. В конструкции этой горелки предусмотрено регулирование положения газового сопла вдоль оси горелки, что предполагает регулирование длины и диаметра факела. При выдвинутом из горелки газовом сопле смесь газа и воздуха выходит через центральное отверстие наконечника и образуется длинный факел, а при вдвинутом сопле — короткий. Укорочение факела происходит за счет завихрения смеси в наконечнике и ее раздачи перпендикулярно оси горелки, но при этом факел увеличивается в диаметре, а скорость его течения падает. Регулирование положения сопла ручное. В условиях стесненного свободного пространства между садкой и боковыми стенами и в разрывах между пакетами избежать прямого попадания такого пламени на поверхность изделий не представлялось возможным. Поэтому для защиты изделий от прямого контакта с факелом по периметру садки устанавливался муфель, толщина стенки которого составляла 200 мм (рис.1).

Однако даже при наличии муфеля организовать равномерный нагрев не удалось: раз-



Рис.1. Вариант садки огнеупорных изделий с муфелем: 1 — муфель; 2 — пакет изделий.



Рис.2. Скоростная горелка ГНБ-80 в установочной обойме.

ность температур по боковым сторонам садки составляла 5–20 °С, нижние ряды садки не обжигались. Кроме того, температура изделий на выходе из печи достигала 80–100 °С, что приводило к нерациональным потерям тепла и сказывалось на безопасности работы при разгрузке изделий.

В связи с необходимостью повышения производительности печи было решено устранить муфель, за счет чего увеличить емкость вагонетки, и заменить морально устаревшее газовое оборудование печи с тем, чтобы обеспечить равномерный интенсивный нагрев садки и снизить удельный расход топлива.

Для достижения высокой $\pm (5-10)$ °С равномерности нагрева поверхности садки, интенсификации нагрева и сокращения расхода газа было решено применить технологию точного нагрева. Для ее реализации была выбрана скоростная горелка ГНБ-80 (рис.2).

Основными критериями при выборе типа скоростной горелки были качество сжигания и габариты факела (диаметр, длина), скорость истечения смеси и устойчивость горения при смене нагрузки, надежность конструкции и простота управления, стоимость. Кроме того, учитывалась простота перевода горелки на автоматическое регулирование. Горелки серии ГНБ полностью соответствуют указанным требованиям.

Технические характеристики скоростной горелки ГНБ-80 приведены ниже:

Номинальная тепловая мощность, кВт	— 80
Номинальный расход газа, м ³ /ч	— 8,1
Давление газа, кПа	— 22,5
Давление воздуха, кПа	— 4,0
Пределы регулирования	— 1 : 5
Уровень шума, дБа	— 80
Содержание вредных веществ в сухих продуктах сгорания при $\alpha = 1,0$:	
CO, %	— 0,0015
NO _x , не более, мг/м ³	— 124
Число Воббе, кДж/м ³	— 44154
Объемная теплота сгорания (низшая), кДж/м ³	— 34587
Плотность газа, кг/м ³	— 0,739

Для ЗАО «Теплохиммонтаж» горелки ГНБ-80 были изготовлены опытным производ-

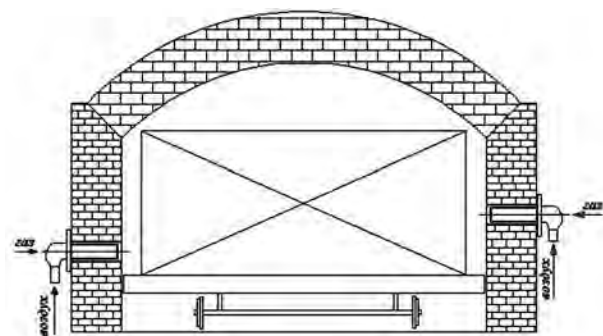


Рис.3. Схема расположения горелок в стенах печи.



Рис.4. Расположение горелок ГНБ-80 и блоков управления ТК1301.03 на боковой стене печи.

ством Института газа НАН Украины. Огнеупорные защитные стаканы (туннели) ЗАО «Теплохиммонтаж» изготовил самостоятельно из муллито-кремнеземистых огнеупорных материалов по чертежам, разработанным авторами. Основное назначение туннеля состоит в защите металлического носика горелки от облучения из рабочего пространства печи без изменения геометрических и аэродинамических характеристик факела.

Горелки на печи установлены по двухуровневой оппозитной схеме в разрыве между пакетами садки соседних вагонеток (рис.3). Ширина разрыва между пакетами 300 мм. Шаг между парами горелок составляет 1100 мм вместо прежнего шага 550 мм. Шаг между осями верхних и нижних горелок — 390 мм. Всего на печи установлено 10 шт. горелок: 5 пар на 5-ти позициях зоны обжига, в разрывах между пакетами садок.

Часть горелок укомплектована электродами розжига и контроля пламени «два в одном» (немецкой фирмы Kremshroder) и блоком управления ТК1301.03 — контроллером автоматического розжига и контроля пламени горелок ГНБ-80 (фирма «ТАСК», Украина). Контроллеры обеспечивают надежное переключение электрода из состояния «розжиг» в состояние

«контроль пламени». Компоновка горелок и контроллеров на печи показана на рис.4.

Задача горелок с автоматическим розжигом и контролем наличия пламени в данном случае состоит в обеспечении безопасной работы печи при выводе ее на температуру не менее 800 °С при каждом новом пуске. Контроллер работает и при ручном управлении печью, и в системе АСУ. Программа его работы отображена в циклограмме.

Период задержки подачи газа после включения кнопки «пуск» на блоке управления составляет 15 с, время ожидания сигнала о наличии пламени — 3 с.

С помощью контроллеров АСУ может обеспечивать регулирование текущих температур нагрева по позициям печи с точностью до ± 3 °С.

Все горелки установлены с защитными огнеупорными стаканами, предохраняющими их металлические носики от обгорания при облучении из печи.

В таблице приведены сравнительные показатели работы печи до и после реконструкции, предоставленные ЗАО «Теплохиммонтаж» по результатам годичной эксплуатации.

Показатели работы печи до (1) и после (2) реконструкции

Параметр	1	2
Длина печи, м	24,2	24,2
Длина зоны обжига, м	4,95	4,4
Емкость вагонетки (вариант: кирпич 230 × 114 × 65 мм), шт./ваг.	120	150
Производительность печи, шт./сут:		
8 вагонеток в сутки	960	1200
12 вагонеток в сутки	—	1800
Количество горелок, шт.	20	10
Тип горелки	1ГП-25-15-0,5	ГНБ-80
Мощность горелки, кВт	60	80
Давление газа (номинальное), кПа	12,0	22,5
Давление воздуха, кПа	6,0	4,0
Коэффициент рабочего регулирования	4	4,5
Температура обжига (макс.), °С	1550	1550
Неравномерность нагрева по боковым поверхностям садки, °С	5–20	—
Количество необожженных изделий по низу пакета садки, %	до 10	0
Температура изделий на выходе из печи, °С	70–100	50–60

Выводы

Проверка изделий на качество после реконструкции печи показала, что низ садки обожжен полностью, а верх и низ садки по усадке не отличаются, показатели температуры по бо-

ковим сторонам печи одинаковы. Все это подтверждает высокую равномерность нагрева.

Положительное влияние на качество изделий оказывает удлинение зоны охлаждения и, следовательно, увеличение продолжительности охлаждения, что приводит к снижению температуры изделий на выходе из печи.

За счет удаления муфеля емкость садки в пересчете на стандартный кирпич (230 × 114 × 65 мм) увеличилась на 25 %, что при сохраненном графике обжига свидетельствует о повышении производительности печи не менее чем на 25 %.

Возможность организации ускоренного режима обжига (сокращение интервала проталкивания с 3 до 2 ч) при увеличенной емкости садки свидетельствует об интенсификации нагрева. При наличии муфеля теплота к боковым поверхностям пакета передается от муфеля за счет теплопроводности, после его удаления боковые поверхности пакета напрямую облучаются из рабочего пространства и контактируют с греющими газами. Интенсивное перемешивание греющих газов в зазоре между пакетами садок и выравнивание температуры между верхом и низом потока греющих газов приводят к интенсивному нагреву торцевых поверхностей пакета садки.

Длина зоны обжига «под огнем» сократилась на 10 %, полезная емкость вагонеток увеличилась на 25 %.

Применение технологии точного нагрева при обжиге огнеупорных изделий в туннельной печи позволило полностью решить поставленные задачи. Производительность печи увеличена на 25–67 %. Интенсифицирован процесс на-

грева, что позволило при необходимости на 30 % сократить интервал проталкивания вагонеток и сократить продолжительность обжига. Расход природного газа на цикл обжига партии огнеупоров сократился на 25–30 %, что при повышенной производительности печи привело к снижению удельных затрат газа на 15–25 %.

Список литературы

1. Пуговкин А.У. Рециркуляционные пламенные печи. — Л. : Машиностроение, 1975. — 199 с.
2. Пилипенко Р.А., Пилипенко А.В., Логвиненко Д.М. Основные положения технологии точного нагрева в пламенных печах садочного типа // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2013. — № 5. — С. 56–62.
3. Пилипенко Р.А. Камерные термические печи прецизионного нагрева металла // Сб. докл. II Междунар. симпозиума «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении», Харьков, 2001. — Харьков : Харьк. физ.-техн. ин-т, 2001. — С. 20–24.
4. Еринов А.Е., Пилипенко Р.А. Расчет параметров нагревательного устройства с рециркуляцией продуктов горения // Сб. материалов науч.-техн. конф. «Использование природного газа в промышленности». — Киев : Наук. думка, 1969. — С. 47–53.
5. Пилипенко Р.А., Еринов А.Е. Разработка, исследование и применение скоростных горелок типа ГН // Теория и практика сжигания газа. — 1981. — Вып. 7. — С. 226–231.
6. Пат. 22209А Укр., МКИ⁶ F 23 D 14/12, F 23 D 14/26. Газовый палец / Р.А.Пилипенко, А.Е.Еринов, В.О.Сорока, Б.Д.Сезоненко, С.О.Петишкин. — Оpubл. 30.06.98, Бюл. № 3.

Поступила в редакцию 01.07.15

**Пилипенко Р.А.¹, канд. техн. наук, Пилипенко О.В.¹,
Логвиненко Д.М.², канд. техн. наук**

¹ Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, e-mail: ig.hil-ko@ukr.net

² ДП «Укрметртестстандарт», Київ

вул. Метрологічна, 4, 03113 Київ, Україна

Досвід застосування технології точного нагрівання при випалі вогнетривких виробів

У процесі випалу вогнетривких та теплоізоляційних виробів у тунельній печі застосовано технологію точного нагрівання, яка базується на організації інтенсивної внутрішньої рециркуляції газів між пакетами виробів. Рух газів відбувається вздовж розрахованих геометричних контурів у робочому просторі за рахунок кінетичної енергії швидкісних струменів продуктів згоряння. Джерелом таких струменів є швидкісні пальники серії ГНБ. Завдяки інтенсифікації та рівномірності нагрівання усунуто захисні муфелі навколо пакетів, підвищено продуктивність печі, зменшено питомі витрати палива. *Бібл. 6, рис. 4, табл. 1.*

Ключові слова: вогнетриви, випал, рівномірність нагрівання, швидкісні пальники, рециркуляція газів.

**Pylypenko R.A.¹, Candidate of Technical Sciences, Pylypenko A.V.¹,
Logvynenko D.M.², Candidate of Technical Sciences**

¹ The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: ig.hil-ko@ukr.net

² State Enterprise «Ukrmetteststandart», Kiev
4, Metrologicheskaya Str., 03113 Kiev, Ukraine

Experience in the Use of Technology Precise Heating During Firing of Refractory Products

In a tunnel kiln for refractory and insulation products internal recirculation of gases between the packages of products is organized. Movement of gas occurs due to the kinetic energy of high speed jet combustion. The source of these jets are speed burners GNB 80, which were designed at the Institute of Gas of the National Academy of Sciences of Ukraine. Due to the intensification and uniformity of heat protective muffles around packages are removed, furnace productivity has increased, specific fuel consumption is reduced. *Bibl. 6, Fig. 4, Table 1.*

Key words: refractory, roasting, heating uniformity, high-speed burners, gas recirculation.

References

1. Pugovkin A.U. Recirculation fiery furnaces, Saint Petersburg : Mashinostroyenie, 1975, 199 p. (Rus.)
2. Pylypenko R.A., Pylypenko A.V., Logvynenko D.M. [Main Points of Technology of Precise Heating of Large-Sized Products of the Fiery Furnaces]. *Energotehnologii i Resursoberezhnie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2013, (5), pp. 56–63. (Rus.)
3. Pylypenko R.A. [Chamber heat thermal furnaces for precision metal heating]. [*The Second International Symposium «Equipment and technology for thermal processing of metals and alloys in machine building»*], Kharkov : Kharkov Institute of Physics and Technology, 2001, pp. 20–24. (Rus.)
4. Yerinov A.E., Pylypenko R.A. [Calculation of the specifications of heating device with recirculation of combustion products]. [*Proceedings of the Scientific and Technical Conference «The use of natural gas in the industry»*], Kiev : Naukova Dumka, 1969, pp. 47–53. (Rus.)
5. Pylypenko R.A., Yerinov A.E. Development, research and application of high-speed burners of GN type. In the book: *The theory and practice of gas flaring*, Saint Petersburg : Nedra, 1981, iss. 7, pp. 226–231. (Rus.)
6. Pat. 22209A UA, MKI⁶ F 23 D 14/12, F 23 D 14/26. Gas burner. R.A.Pylypenko, A.E.Yerinov, V.O.Soroka, B.D.Sezonenko, S.O.Pyetyshkin. Publ. 30.06.98, Bul. № 3. (Ukr.)

Received July 1, 2015