

Троценко Л. Н. /к. т. н./, Пикашов В. С. /к. т. н./,
Стративнов Е. В. /к. т. н./, Правило С. В.,
Виноградова Т. В.
Институт газа НАН Украины

Исследование влияния формы и направленности факела на эффективность работы вращающейся печи для обжига каолина на шамот

В Институте газа НАН Украины разработана и внедрена на вращающейся печи для обжига каолина комбината по производству огнеупоров новая система отопления на базе двухпроводной газовой горелки с регулируемой длиной факела мощностью 35 МВт и максимальным расходом природного газа 4000 м³/ч.

После настройки печи на оптимальные режимы работы достигнуты следующие показатели: коэффициент расхода воздуха снизился с 1,1-1,3 до 1,05-1,1; уменьшено разрежение перед дымососом от 1,2-1,5 до 0,8-1,0 кПа, расход природного газа снижен при непрерывной работе печи на 30 %, а среднегодовая экономия топлива составила 15 %. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: вращающаяся печь, система отопления, параметры факела, теплообмен, кладка

In the Gas institute of National Academy of Sciences of Ukraine there developed and implemented the new heating system on the base of double wire gas-burner with regulated flame level with capacity 35 MW and maximum consumption of natural gas 4000 m³/h on the cylinder roaster for kaoline of refractory products plant.

After furnace justification for optimal operation there achieved the following indexes: air flow coefficient a was reduced from 1,1-1,3 to 1,05-1,1; induced-draft fan downstream rarefaction is reduced from 1,2-1,5 to 0,8-1,0 kPa, consumption of natural gas while continuous work is reduced up to 30 % and annual average fuel economy was 15 %.

Keywords: rotary furnace, heating system, flame parameters, heat exchange, laying

Вращающиеся печи благодаря своим преимуществам по сравнению с другими конструкциями печей для термохимической обработки сыпучих материалов широко распространены в различных отраслях промышленности. Это предприятия цветной и черной металлургии, химической промышленности, производства цемента и других строительных материалов и другие. Такие печи работают по принципу противотока. Со стороны загрузки в рабочее пространство подается обжигаемый материал, а со стороны выгрузки непрерывно подаются горячие продукты сгорания топлива, которые движутся навстречу медленно сползающему и пересыпающемуся вниз материалу и нагревают его до заданной температуры, способствуя протеканию термохимических реакций. После тепловой обработки материал поступает на дальнейшую переработку или в холодильник.

В зависимости от требований технологии в процессе обжига или сушки, состава обрабатываемого сырья, производительности печи, скорости вращения печи необходимо обеспечить строго определенное распределение температур по ее длине. Причем, на одном и том же агрегате режимы термической обработки материала могут изменяться в зависимости от со-

става сырья, его влажности, размера фракции и т. п., что требует оперативного регулирования температурного распределения вдоль печи. Часто на практике управление тепловым режимом и определение его оптимального значения осуществляется несколькими способами [1]: изменением тепловой мощности (расхода топлива); регулированием коэффициента расхода воздуха, когда за счет энергии избыточного воздуха перемещают зону высоких температур; изменением положения горелки с наклоном на материал; регулированием разрежения в головке печи и режима работы холодильника. В большинстве случаев это приводит к ощутимому изменению технологических параметров работы печи и неэффективности ее работы в целом.

Проведено большое количество теоретических, экспериментальных и промышленных исследований работы вращающихся печей, обобщенных в работах [1, 2, 3] и других. Основной целью исследований являлось экономное использование энергоресурсов и повышение качества продукта, что связано с поиском оптимальных параметров теплового режима работы печей. В свою очередь одним из важных направлений оптимизации работы печей является интенсификация теплообмена в рабочем

пространстве. В данной статье рассматривается влияние размера и направленности факела в рабочем пространстве на эффективность работы печи в целом.

Принято считать, что нагрев материала на 70-90 % происходит непосредственно излучением от факела и переизлучением от кладки на открытую поверхность материала [1, 3]. В других источниках согласно теоретическим расчетам получено, что тепловой поток от разогретой кладки к материалу за время контакта материала с кладкой может превышать поток теплоты через открытую поверхность материала более, чем в три раза [2]. Эти расчеты подвергаются критике и предполагается, что в реальных условиях часть теплоты, переданной от кладки материалу при их непосредственном контакте, может быть не более 10-30 % от всей теплоты, переданной материалу. При этом многие исследователи считают, что наиболее интенсивный нагрев материала осуществляется при направлении факела и потока продуктов сгорания непосредственно на материал [1, 2]. Это справедливо лишь для некоторых случаев, когда качество обожженного материала не ограничивается максимальной температурой на его поверхности и когда слой материала термически тонкий.

В действительности во вращающихся печах обрабатываются сыпучие материалы с различными теплофизическими свойствами. Толщина нагреваемого слоя переменна, т. к. часто пересыпается только часть материала у свободной поверхности, а остальной материал, образуя плотное ядро внутри насыпной массы, скользит по кладке и не имеет поверхности, контактирующей с факелом и продуктами сгорания. Кроме того, установлено [4, 5], что профиль сыпучего материала во вращающемся барабане формируется начиная с разгрузочного конца, и свободная поверхность сыпучего материала выпуклая. В связи с этим представляют интерес практические исследования влияния геометрических характеристик и направленности факела, а также роли кладки в теплообмене вращающихся печей.

Рассматриваемая печь для обжига каолина на шамот с длиной 75 м и диаметром барабана 3,6 м соответственно имела следующую систему отопления. В торцевой стене откатной головки печи на горизонтальной оси барабана были установлены две горелки в виде труб, оканчивающихся соплами, над которыми по вертикальной оси печи была расположена труба для подачи первичного воздуха (рис. 1а). Производительность печи составляла 20-22 т/ч; рабочая температура в зоне обжига печи 1450-1500°C.

Номинальный расход газа на печь составлял 3000-3500 нм³/ч; количество первичного воздуха, подаваемого в воздушную трубу, составляло 25-30 % от всего воздуха, участвующего в горении. Подача вторичного воздуха, проходящего через холодильник и нагревающегося до температуры 500-700 °С, осуществлялась за счет разрежения в печи.

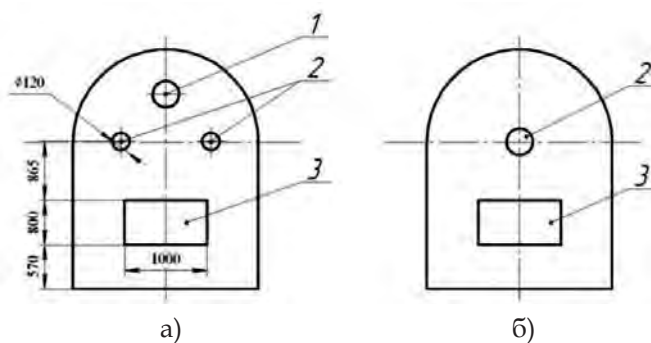


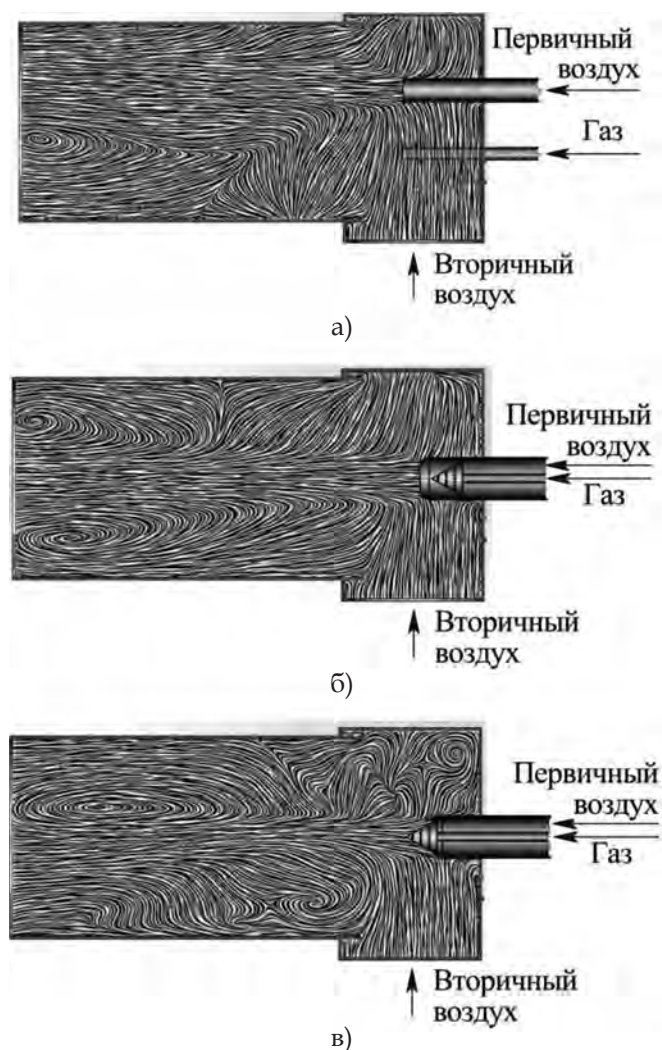
Рис. 1. Схема установки горелок и воздушной трубы на лицевой стороне откатной головки печи до и после реконструкции:

- 1 – место установки воздушной трубы для подачи первичного воздуха;
- 2 – места установки горелок;
- 3 – технологическое окно

Нами были проведены компьютерные исследования (CFD) скоростных и концентрационных характеристик холодных газовых потоков во вращающейся печи. На рис. 2 проиллюстрированы картины течения печных газов для трех вариантов подачи газа и первичного воздуха.

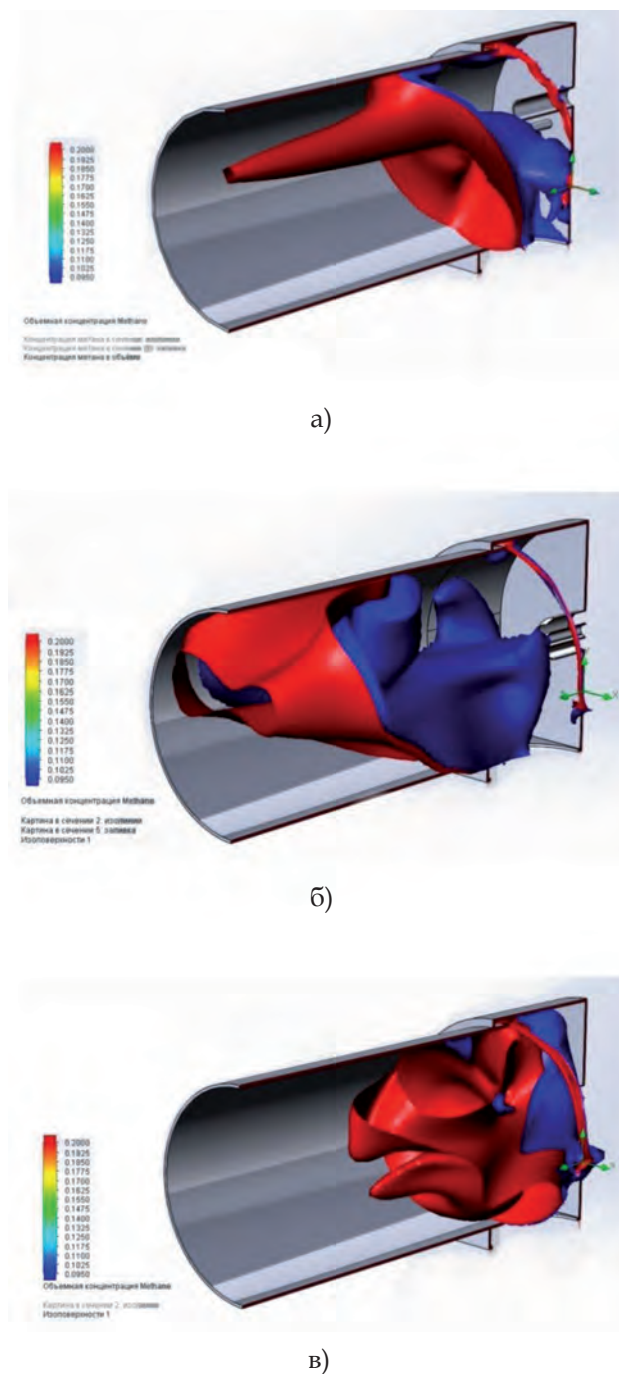
Распределение воздуха для горения на первичный и вторичный во всех вариантах производился в соответствии с характеристиками печи. При этом в вариантах б и в (рис. 2) первичный воздух подавался в горелку, а расход вторичного воздуха на горение сохранялся в том же количестве, что и на существующей печи. При расчетах принимали, что средой является смесь природного газа и воздуха при температуре 20 °С. Вращение печи (1,0-1,5 об/мин) и наклон корпуса печи в расчетах не учитывали ввиду малости компонента окружной скорости (менее 0,2 м/с) и угла наклона (3°) корпуса печи.

На рис. 1а видно, что поток первичного холодного воздуха идет параллельно газу. Перемешивание газа и воздуха на начальном участке не происходит, за исключением подсоса печных газов к корню факела. Это приводит к затягиванию горения, охлаждению стенок цилиндрической камеры и перемещению зоны высоких температур к загрузочному краю барабана. Очевидно, что при этом также температура и, следовательно, интенсивность теплообмена в зоне обжига низкая, что приводит к перерасходу топлива и ухудшению качества продукции.



На рис. 1б и 1в представлены крайние случаи подачи топлива и воздуха в горелку: при истечении газа через центральное сопло (рис. 1б) получается самый длинный факел, расположенный в осевой части рабочего пространства; при истечении газа отдельными струями под углом к потоку воздуха (рис. 1в) получается короткий и объемный факел, что обеспечивает равномерное поле температур в поперечном сечении барабана.

Ввиду того, что внутреннее пространство печи не осесимметрично, а также имеет место подсос вторичного воздуха в нижней части печи, представляет определенный интерес 3D изображения нижнего и верхнего предела концентрации метана в объеме печи (рис. 3) для трех вариантов исполнения топливосжига-



ющих устройств. Синим цветом показана нижняя граница концентрации, соответствующая максимальному избытку воздуха (коэффициент расхода воздуха $\alpha = 1,2$), красным цветом – соответственно верхняя. Приведенная на объемных эпюрах информация соответствует начальному (до начала горения) расположению необходимой для поджога горючей смеси. Таким об-

разом, она характеризует длину и форму факела при изменении параметров работы горелки.

Можно предположить, что при изменении положения факела между его крайними положениями на промышленной печи можно добиться не только равномерных тепловых потоков на кладку и свободную поверхность шихты, но и регулировать длину высокотемпературной зоны печи.

Для обеспечения эффективной работы вращающихся печей за счет управления их температурным режимом Институтом газа НАН Украины была разработана горелка с регулируемыми параметрами факела, в основу конструкции которой положены известные принципы регулирования интенсивности смешения газа и воздуха [3, 6]. Горелка относится к типу диффузионных, когда горение газа происходит по мере его перемешивания с воздухом в рабочем пространстве. Отличительной особенностью горелки является наличие стабилизатора горения в виде плохо обтекаемого тела, установленного в воздушном кольцевом зазоре [7]. Установка горелки предполагалась по оси печи (рис. 1б).

На рис. 4 показана установка горелки на печи взамен двух существовавших горелок. Горелка была установлена в торце откатной головки по оси барабана с возможностью перемещения ее внутрь печи и наклона ее относительно оси печи.

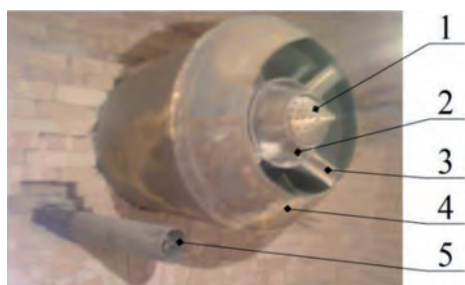


Рис. 4. Установка горелки ПГ-35М в комплекте с ЗЗУ. Вид из рабочего пространства:

1 – конусная часть газораспределительного клапана с отверстиями для истечения газа; 2 – центральное газовое сопло; 3 – стабилизатор; 4 – воздушное сопло; 5 – ЗЗУ

Регулирование длины факела горелки ПГ-35М осуществляется подвижным газораспределительным клапаном, состоящим из цилиндрической полой части и полого конуса со стороны сопловой части горелки. Газораспределительный клапан перемещается в продольном направлении с помощью маховика. Регулируя положение клапана, можно создавать различные условия для истечения газа: сплошной струей через центральное отверстие горелки или отдельными струями через боковые отвер-

стия, направленные под углом к воздушному потоку, тем самым изменяя длину факела между его крайними значениями от 5 до 25 м.

Автоматизация системы отопления печи была выполнена на основе блока управления БАУ-ТП (микропроцессорного контролера с индивидуальным программным обеспечением) и стандартных датчиков. В систему регулирования тепловым режимом печи был включен контроль температуры кладки зоны обжига от трех термодатчиков. Сигналы о температуре внутренних слоев кладки зоны обжига в трех точках по ее длине передавались к пульту управления при помощи радиомодема, работающего на солнечных батареях. Показания этих термодатчиков учитывались операторами печи для регулирования тепловой мощности горелки ПГ-35М и установки оптимальной длины факела.

Проведен комплекс исследований с целью выбора оптимального режима работы печи при различных геометрических и режимных параметрах настройки горелки ПГ-35М. Изменялись углы наклона оси горелки по отношению к оси печи в пределах 5° в различные стороны при перемещении газового клапана в промежуточные положения. Все опыты проводились при постоянной максимальной производительности печи и переменной тепловой мощности. Параллельно проводили анализ дымовых газов, определение качества продукции и других показателей (таблица).

Результаты исследований показали, что оптимум по удельным расходам топлива на единицу продукции и максимальному качеству шмота были получены при наклоне горелки относительно оси печи на 5° в сторону футеровки, противоположную поверхности насыпного материала и при расположении среза сопла горелки вблизи торцевой стенки откатной головки. При этом газовый клапан находился в среднем положении.

Новая система отопления позволила упростить управление тепловым режимом печи и улучшить основные показатели тепловой работы. За счет улучшения условий смешения газа и воздуха в горелке удалось снизить количество первичного воздуха. В результате коэффициент расхода воздуха а снизился с 1,1-1,3 до 1,05-1,1; догорание топлива за пределами рабочего пространства практически отсутствовало, что является свидетельством снижения химического недожога газа и создания нормальных условий для работы вспомогательного оборудования. Температура газов на выходе из печи уменьшилась на $100-200^\circ\text{C}$ вследствие интенсификации теплообмена в рабочем пространстве и уменьшении потерь теплоты с продуктами сгорания. Сниже-

Результаты промышленных испытаний работы вращающейся печи до и после установки новых горелок

Параметры	Размерность	До реконструкции	После реконструкции
Производительность печи	т/ч	19-23	18-23
Давление природного газа перед горелкой	кПа	80	80
Расход природного газа	м ³ /ч	3100	2200
Расход первичного воздуха	м ³ /ч	9000-11000	6000-8000
Температура в горячей головке печи	°С	660-750	760-860
Температура в пылевой камере	°С	420-550	330-360
Температура перед дымососом	°С	100-150	80-90
Разрежение перед дымососом	кПа	1,20-1,50	0,8-1,0

ние температуры и количества отходящих газов перед электрофильтрами и дымососом также положительно сказалось на условия их работы.

Благодаря уменьшению разрежения перед дымососом от 1,2-1,5 до 0,8-1,0 кПа в печи с новой системой отопления значительно снизился пылеунос, а так же выбросы NO_x и CO.

Выводы

На основе анализа тепловой работы высокотемпературной вращающейся печи для обжига каолина предложена конструкция системы отопления печи на основе горелки с регулируемой длиной факела. Математическое моделирование и промышленные испытания позволили разработать новую конструкцию горелки ПГ-35М, обеспечивающую изменение длины факела от 5 до 25 м, а также угол наклона горелки относительно оси печи до 5°.

Испытания новой системы отопления позволили определить оптимальный режим работы печи, что обеспечило сокращение удельных затрат топлива на обжиг каолина без ухудшения качества шамота. Экономия топлива в рабочем режиме (без простоев) достигала 30 %, а среднегодовая экономия природного газа составила 15-20 %.

Библиографический список

1. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгин М. Г. Вращающиеся печи: теплотехника,

управление и экология / Справочное издание. Книга 2. – Москва: Теплотехник, 2004. – 588 с.

2. Детков С. П., Еринов А. Е. Тепловые процессы в печных агрегатах алюминиевой промышленности. – Киев: Наукова думка, 1987. – 270 с.

3. Монастырев А. В., Александров А. В. Печи для производства извести. Справочник. – Москва: Металлургия, 1979. – 232 с.

4. Першин В. Ф., Однолько В. Г., Першина С. В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. – Москва: Машиностроение, 2009. – 142 с.

5. Коротич В. И. Анализ движения сыпучего материала во вращающемся цилиндрическом барабане / В. И. Коротич // Горный журн. – 1964. – № 12. – С. 134-141.

6. Стаскевич Н. Л., Северинец Г. Н., Вигдорчик Д. Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. – Ленинград: Недра Ленинградское отделение, 1990. – 762 с.

7. Пат. 47912 Укр., МПК⁶ F23 D 14/00. Пальник для спалювання газу / В. С. Пікашов, Л. М. Троценко, С. В. Цветков, О. А. Пруський, В. О. Великодний. – Опубл. 25.02.10, Бюл. № 4.

Поступила 05.08.2015

**Metallurgical and Mining
Industry**

www.metaljournal.com.ua