

Приборы и оборудование

УДК 502.5:661.21

Троценко Л.Н., канд. техн. наук
Институт газа НАН Украины, Киев
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: t-ln@ukr.net

Особенности конструкции и тепловой работы вращающихся печей и перспективные направления их усовершенствования (Обзор)

Представлен обзор современного состояния вращающихся печей для термической обработки зернистых и кусковых материалов. Приведены основные направления и достижения в области энергосбережения и улучшения качества конечного продукта при работе таких печей. Показаны резервы улучшения работы вращающихся печей отечественной промышленности, в том числе за счет снижения потерь из рабочего пространства, утилизации теплоты из печи и интенсификации тепло- и массообменных процессов в рабочем объеме. Определены перспективные направления по усовершенствованию конструкции и тепловой работы вращающихся печей на основе анализа накопленного опыта их эксплуатации. *Библ. 32.*

Ключевые слова: вращающаяся печь, сыпучий материал, энергосбережение.

В технологических циклах многих отраслей промышленности применяется большое количество различных видов сыпучих материалов, которые подвергаются термической и термохимической обработке. Наибольший объем сыпучих материалов проходит термообработку во вращающихся печах. Более 30 различных видов материалов обрабатываются во вращающихся печах при максимальной температуре шихты от 500 до 2000 °С. Такие печи успешно применяются при производстве цемента [1], огнеупоров, обжиге известняка [2], прокаливании кокса и антрацита, в цветной металлургии при производстве ферросплавов [3] и алюминия [4], а также в строительной и химической промышленности [5]. Имеется опыт сжигания промышленных от-

ходов в высокотемпературных вращающихся печах и барабанных печах пиролиза [6].

Только в металлургической промышленности Украины, включающей черную, цветную металлургию и производство огнеупоров, эксплуатируются свыше 22 крупных вращающихся печей тепловой мощностью до 35 МВт, более половины из которых используют для отопления природный газ. Можно предположить, что максимальное годовое потребление природного газа на вращающихся печах металлургического комплекса составляет около 350 млн м³.

Несмотря на то, что вращающиеся печи и системы их отопления работают в промышленности еще с конца XIX века и усовершенствовались до последнего времени, в нашей стране

еще есть резерв по их усовершенствованию. Так, по данным [7], удельный расход условного топлива на производство высококачественной извести во вращающихся печах ведущих мировых производителей составляет 170–190 кг у.т./т при суточной производительности 450–550 т. Удельный расход топлива на производство конвертерной извести во вращающихся печах украинских металлургических предприятий достигает 250 кг у.т./т при суточной производительности 330–380 т.

Представленные показатели отражают общее состояние энергопотребления в промышленности Украины. По данным [8], потребляемые энергоресурсы используются в экономике Украины неэффективно вследствие устаревших технологий и физического износа оборудования, а удельные расходы энергии на 1 т готовой продукции превышают аналогичные показатели развитых стран в черной металлургии в 1,5–1,6 раза, в строительной и химической промышленности — в 1,7–2,0 раза.

В работе [9] представлен анализ основных факторов, влияющих на удельное теплотребление в топливных печах, на основании которого предложено классифицировать усилия по энергосбережению по трем направлениям:

- использование тепла уходящих из печи дымовых газов для подогрева реагентов горения, материала, получения горячей воды или пара;
- снижение тепловых потерь из рабочего пространства печи;
- увеличение доли общей тепловой мощности, усваиваемой материалом, то есть повышение КПД печи.

Вращающиеся печи являются сложными агрегатами, представляющими собой одновременно физико-химический реактор и топочную камеру. В печах протекают взаимосвязанные механические, химические, газодинамические, тепловые и другие процессы. Технологический процесс в таких печах складывается из физических процессов испарения влаги, подогрева материала, периода распада первичных продуктов, периода новообразований и периода охлаждения полученного продукта. Наиболее важными конструктивно-технологическими параметрами являются наклон печи, частота вращения, степень заполнения, скорость прохождения материала через вращающуюся печь и ее производительность. Универсальность вращающихся печей заключается в разнообразии технологических процессов в них и возможности работы на различном топливе: твердом, жидком и газообразном — природного и искусственного происхождения.

Основным элементом вращающихся печей является стальной барабан с закрепленными на нем бандажами. Он опирается на ролики, расположенные на опорных плитах, которые, в свою очередь, опираются на железобетонные фундаменты. Вращение происходит с помощью шестерни, установленной на корпусе печи.

Для предохранения барабана печи от воздействия высоких температур он футеруется. Футеровка подвергается агрессивным воздействиям: постоянному истиранию нагретым и перемещающимся материалом, а также термическому (при каждом обороте печи) и химическому воздействиям.

У печи есть загрузочный и разгрузочный концы. Загрузочный конец расположен входящим в камеру, которая соединяет печь с загрузочными и пылесадительными устройствами. Разгрузочный конец входит в футерованную топочную головку (стационарную или откатную), на которой размещается горелочный узел. В местах соединений устанавливаются уплотнительные устройства во избежание подсоса наружного воздуха, что необходимо для эффективной работы печи в целом. Топливо подается в печь горелочными устройствами, установленными в торце откатной головки и ориентированными в направлении оси барабана печи под углом к горизонтальной плоскости, чаще всего совпадающим с углом наклона барабана.

Одной из характерных особенностей вращающихся печей является возможность изменения производительности за счет изменения угловой скорости ее вращения и перераспределения сыпучего материала по объему барабана. Для продвижения материала от загрузочного края к месту выгрузки барабан обычно имеет наклон к горизонту и вращается с определенной скоростью.

Современные вращающиеся печи оборудованы запечными теплообменниками, что значительно уменьшает их габариты и обеспечивает разделение стадий процесса. Так, подогрев сырья производится в специальных (часто шахтных) подогревателях, обжиг — во вращающихся барабанах, охлаждение — в холодильниках различных конструкций. Материал после предварительного нагрева в подогревателе через загрузочную головку печи подается в верхнюю часть наклоненного барабана, где происходит его частичная диссоциация, после чего движется по барабану навстречу потоку продуктов сгорания. Продукты сгорания от горелочного устройства поступают в нижнюю часть барабана и, пройдя через него, поступают в загрузочную головку печи, после чего подаются в высокотем-

пературный шахтный подогреватель материала и через систему газоочистки в дымовую трубу.

В тех печах, в которых конечный продукт не поступает непосредственно за печью на дальнейшую переработку, применяется подогрев вторичного воздуха в холодильниках: материал, выходящий из нижнего конца печи, попадает в независимую секцию, где он охлаждается в потоке восходящего ему навстречу воздуха, тем самым нагревая его.

Вращающиеся печи обладают двумя основными преимуществами по сравнению с агрегатами, в которых поток греющих газов проходит над слоем неподвижного материала. Одно из них заключается в том, что футеровка попеременно то нагревается дымовыми газами, то, соприкасаясь с материалом, отдает ему тепло, то есть выполняет функции «регенератора» тепла. Еще более существенно то, что при вращении печи материал непрерывно пересыпается и перерабатывается тепло воспринимается большей поверхностью, чем в случае неподвижного слоя. Таким образом, вращающаяся печь прекрасно приспособлена для качественного нагревания сыпучих материалов.

Вращающаяся печь обладает и недостатком, заключающемся в том, что очень трудно изолировать ее футеровку, так как всякий мягкий или пористый материал, проложенный между твердым огнеупорным кирпичом и наружным металлическим кожухом, легко истирается в порошок во время непрерывного вращения печи, сопровождающегося вибрациями. В практике эксплуатации таких печей сдвиг между огнеупорной футеровкой и корпусом печи при пуске может достигать 350 мм [10], что также препятствует надежному креплению изоляционного слоя. Из-за сложности и ненадежности установки слоя изоляции между огнеупорной кладкой и корпусом печи и вследствие этого повышенных потерь тепла через футеровку величины удельных расходов топлива, достигнутые даже хорошо работающими вращающимися печами, могут несколько превышать аналогичные показатели для шахтных печей. Кроме того, из-за постоянного вращения печи обеспечение непрерывного контроля температуры в рабочем пространстве, необходимое для автоматизации печи, также является затруднительным и требует разработки специальных узлов. Однако перечисленные недостатки компенсируются качеством обжига материала.

Интенсивность и эффективность проводимых во вращающихся печах технологических операций, как и тепловой работы печей в целом, определяются характером движения мате-

риала и его характеристиками. Производительность, распределение сыпучего материала в рабочем объеме, время пребывания его в печи, тепловой режим определяют процессы, реализуемые в печи.

Предпринятые попытки посредством изменения угла наклона барабана от 2 до 6° улучшить технико-экономические показатели работы вращающихся печей [11] положительных результатов не принесли. В настоящее время принято считать наиболее оптимальным угол наклона корпуса печи в диапазоне 2–3°. Изменение частоты вращения печи до 2 раз [12] позволяет увеличивать производительность, однако сопутствующее этому уменьшение времени пребывания материала в рабочем объеме печи значительно ухудшает качество его тепловой обработки. Поэтому в большинстве случаев скорость вращения барабана поддерживается на уровне 1–2,5 об./мин, что считается оптимальным.

Имеется опыт установки внутри барабана неподвижной насадки, которая организует и направляет внутренние потоки для создания некоторого множества локальных зон интенсивного перемешивания [13].

Воздух на горение во вращающиеся печи различных конструкций может подаваться тремя способами.

1. Весь воздух, необходимый для сжигания топлива, в холодном состоянии принудительно подается в горелочные устройства. С точки зрения удельных затрат топлива на термическую обработку материала во вращающейся печи такая организация подвода воздуха на горение наименее эффективна, хотя оправдана при необходимости подачи материала с максимальной температурой на дальнейшую обработку. Примером такой организации могут служить ферро-никелевое и ферросплавное производства, в которых материал из вращающихся печей поступает в плавильные печи.

Для повышения энергоэффективности подобных печей осуществляется подогрев воздуха на горение в рекуператорах различных конструкций за счет тепла отходящих газов, а также нагрев воздуха при его циркуляции между корпусом барабана и экранами. В книге [14] описан опыт прокладки на внешней стороне кожуха барабана воздухопроводов в виде петли для нагрева воздуха для горения.

В Одесской государственной академии строительства и архитектуры разработаны технология и конструкция системы «стабилизированного охлаждения» внешней поверхности вращающихся печей, в которой между экраном вокруг печи и ее кожухом принудительно пода-

ется воздух, интенсивно охлаждающий внешние поверхности барабана за счет струйного обдува [15]. Использование нагретого таким образом воздуха для сжигания топлива в этой же печи дает возможность экономить до 8 % топлива, что подтверждено при промышленном внедрении на некоторых заводах строительной отрасли.

Однако во всех перечисленных случаях требуется дополнительная энергия для транспортировки подогретого воздуха часто на значительное расстояние, особенно при установке рекуператоров у загрузочного торца печи, где отработанные газы покидают рабочее пространство.

2. Весь воздух на горение подается в печь за счет тяги дымохода за печью или вентилятора перед охладителем материала. В этом случае тепловая эффективность печи несколько выше, чем в предыдущем. Однако подача воздуха неорганизованным потоком в рабочее пространство печи не создает условий для оптимального его перемешивания с топливом, а, значит, процесс горения затягивается, деление печи на технологические зоны нарушается, что также снижает тепловую эффективность печи.

3. Часть воздуха, называемого первичным, подается холодным непосредственно в горелку для формирования пламени. Остальной, вторичный воздух, нагретый в охладителе материала, подается в рабочее пространство. Температура подогрева воздуха может колебаться от 200 до 700 °С.

Наиболее перспективным и эффективным направлением является разумное сочетание двух тенденций в подаче воздуха на горение во вращающихся печах: его подогрев и организованная подача, обеспечивающие наилучшие условия формирования факела и температурного поля в рабочем пространстве.

Одним из направлений улучшения технико-экономических показателей вращающихся печей и качества готового продукта признано использование запеченных теплообменных устройств. В подогревателях специальной конструкции интенсифицируются процессы сушки и предварительного нагрева материала теплом отходящих газов, что позволяет снизить габариты печи и повысить ее производительность. Нагретый в охладителях воздух подается в рабочую зону или в горелочное устройство, что создает условия для экономии топлива. В таких печах наблюдается также существенное улучшение качества конечного продукта, например, извести (CaO — 94–96 %, остаточный CO_2 — 0,5–2 %, содержание серы — менее 0,025 %) [2].

Исследования, результаты которых представлены в работе [16], показали, что предварительная сушка и подогрев сырья перед прокаливанием позволяют повысить эффективность работы вращающейся печи, а именно: увеличить производительность, снизить максимальную температуру в рабочем пространстве, дать существенную экономию дефицитного топлива.

Еще до середины XX века многие вращающиеся печи, в том числе для производства цементного клинкера, отапливались пылеугольным топливом. В книге [14] отмечается: «Этот тип отопления наиболее приемлем по двум причинам. Во-первых, он обеспечивает получение длинного факела (длина печи около 100 м) и, следовательно, наличие большой области равномерно высокой температуры, в которой может иметь место окончательный обжиг. Во-вторых, зола угля смешивается с цементом, качества которого она не ухудшает, так как их химический состав одинаков». В нашей стране до недавнего времени в отечественных печах обжига железных руд для цветной металлургии использовался также мазут. Значительная часть крупных вращающихся печей в свое время была переведена на отопление природным газом, что позволило улучшить условия труда в цехах и экологическую обстановку в регионах.

В настоящее время в условиях дороговизны природного газа, его дефицита и ужесточения конкуренции на внутреннем и внешнем рынках многие промышленные предприятия страны проводят модернизацию вращающихся печей, применяя горелки для пылеугольного топлива и других видов топлива, в том числе отходов различных производств.

По данным автора, на отопление пылеугольным топливом переведены вращающиеся печи Побужского ферроникелевого и Днепродзержинского металлургического комбинатов. Известен опыт установки горелочного устройства серии M.A.S. австрийского производства [17] для сжигания пылеугольного топлива на вращающейся печи одного из цементных заводов Беларуси.

Перспективным направлением экономии природного газа во вращающихся печах является также его частичная замена биотопливом. В работе [18] приводятся следующие данные: при сжигании 2 т гранулированной шелухи подсолнечника выделяется столько же тепла, как при сжигании 1,4 т угля, 3,2 т древесины, 0,95 т дизельного топлива, 960 м³ природного газа и 1 т мазута. При этом общий объем подсолнечниковой шелухи при переработке семечек в Ук-

раине можно оценить в 675 тыс. т/год, что эквивалентно 369 тыс. т у.т./год (0,18 % от использования природных или первичных энерго-ресурсов).

В работе [19] на примере вращающихся печей доломитного комбината ПАО «Ватутинский огнеупорный комбинат» и металлургического комбината ПАО «АрселорМиталл Кривой Рог» показана возможность замены природного газа биотопливом на 50–70 % в первом и на 40–47 % во втором случаях без ухудшения теплотехнических показателей работы печей, а также качества продукта.

Еще в 1990-х гг. сотрудниками Института газа НАН Украины было разработано и осуществлено успешное промышленное испытание технологии сжигания жидких горючих промышленных отходов в газовом факеле цементных печей [20], а именно: отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей инструментальных производств. Такая технология позволяет утилизировать до 3 т/ч отходов без ухудшения качества клинкера и за счет этого экономить в среднем 17 % удельных затрат на 1 т клинкера.

В начале XXI в. на каждой из 4-х печей Побужского ферроникелевого комбината в дополнение к основной горелке были установлены горелочные устройства конструкции Института газа НАН Украины [21] для сжигания рудно-термического газа, выделяющегося в электропечах при плавке руды. Эти горелки предусматривали регулирование соотношения газ : воздух при переменной калорийности газа. Установка таких горелок обеспечивала экономию природного газа до 50 % при его замещении.

Стоимость, потребление энергии, долговременность эксплуатации печи во многом зависят от состояния футеровки печей. Согласно имеющимся литературным данным, потери теплоты через футеровку составляют 14–41 % всех потерь [16, 22]. По другим данным, потери теплоты через корпус в окружающую среду достигают 10–15 % тепловой мощности печи [23, 24]. Следовательно, расход топлива на покрытие этих потерь значителен.

Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду через корпус вращающейся печи предлагается устанавливать защитные экраны вокруг барабана [25]. Согласно расчетным данным, такая конструкция позволяет на 40–50 % снизить потери в окружающую среду.

В связи с особенностями строения самого печного агрегата классическая футеровка имеет небольшую толщину. По данным [26], это обуславливает большой температурный градиент в огнеупоре — 50–70 °С/см толщины кирпича

при высокой температуре газового потока, что приводит к возникновению в огнеупорной кладке термических напряжений. При малой толщине температурных швов тепломеханические напряжения, которые испытывает футеровка вращающейся печи, приводят к разрушению кирпича [23]. Как один из способов уменьшения данного вида затрат можно предложить увеличение толщины футеровки. Однако при этом возрастают потери на аккумуляцию, происходит увеличение капитальных затрат, становится тяжелее печь, что приводит к усложнению конструкции опор и дополнительным затратам электроэнергии на вращение барабана. По этой причине наиболее актуальным направлением в данной области является решение задачи оптимизации футеровки печи с улучшением теплоиспользующих, эксплуатационных и стоимостных характеристик.

Известны технологические разработки по производству многослойных огнеупоров для вращающихся печей различного назначения [16, 21] за счет изменения формы огнеупора и введения в нее дополнительного волокнистого теплоизоляционного материала. Теплоизолятором может быть муллитно-кремнеземистая вата с неорганическими добавками, базальтовое волокно и подобные структуры с рабочей температурой до 1600 °С. В этом случае между огнеупором и корпусом печи образуется ячейка, заполненная теплоизоляционным материалом. При этом наибольшего уменьшения тепловых потерь печи в окружающую среду и массы футеровки можно достичь за счет установки фасонных огнеупоров в высокотемпературной зоне печи, что также увеличивает передачу тепла обрабатываемому материалу и уменьшает массу печи.

Наиболее уязвимым местом с точки зрения потерь излучением через неплотности ограждения во вращающихся печах является стык корпуса печи (цилиндрического вращающегося барабана) и откатной разгрузочной головки, между которыми предусматривается зазор, учитывающий наклон корпуса. Отрицательно влияние этого зазора на энергоэффективность печи усугубляется еще и тем, что в рабочем пространстве печи устанавливается разрежение, а значит, через указанный зазор подсасывается холодный воздух из окружающего пространства.

В работе [27] предложена конструкция откатной головки, состоящей из двух частей, с разъемом в плоскости, перпендикулярной оси печи. Одна часть головки, в торце которой устанавливается горелочное устройство, — откатная, а другая — стационарная, с разъемом по продольной оси печи. Такая конструкция

разгрузочного конца печи позволяет минимизировать зазор между разгрузочной головкой и корпусом до величины его линейного расширения, так как корпус и неподвижная часть головки стационарно установлены относительно продольного перемещения. К тому же такая конструкция головки упрощает ремонтные работы.

Совокунность тепловых и физико-химических процессов во вращающихся печах определяется значениями температур материала по ходу его движения в печи. Эти процессы можно регулировать изменениями режима работы горелок, что определяет температурное поле в печи и протяженность технологических зон.

В длинных печах с отношением длины к диаметру $L/D > 30$ (например, для спекания глиноземсодержащих шихт и в цементных печах) требуется удлиненный факел. Дополнительные средства удлинения факела заключаются в искусственных приемах, например, в подмешивании части отходящих газов к воздуху или в подаче уловленной пыли в факел. По данным [28], подача пыли увеличивает производительность печей до 15 % и выше. В печах с соотношением $L/D \leq 30$ стоит другая задача. Для точного соблюдения температурных зон по длине печи факел должен быть определенной длины, соответствующей времени пребывания материала в высокотемпературной зоне.

Другой характеристикой, существенно влияющей на экономичность работы вращающихся печей и качество готового продукта, является интенсивность теплообмена между греющимися газами, кладкой и материалом, подвергающимся термической обработке.

При устойчивом стационарном режиме работы вращающейся печи футеровка претерпевает значительные колебания температуры. При каждом соприкосновении с газовым потоком футеровка нагревается, а при соприкосновении с материалом отдает часть накопленного тепла. По данным [28], колебания температуры поверхности футеровки в высокотемпературной зоне за один оборот печи могут достигать 180 °С. При этом колебания температуры сказываются на глубине футеровки 3–4 см, а их число составляет в сутки 1400–4300 раз [23].

Температурный режим футеровки определяется расположением факела, его формой и свойствами применяемых огнеупоров. В некоторых источниках [16, 28], рекомендуется направлять факел или располагать его как можно ближе к открытой поверхности шихты, так как считается, что нагрев материала во вращающихся печах происходит в основном за счет излуче-

ния от факела, открытой поверхности футеровки и печных газов. Однако при таком подходе к нагреву материала возникают значительные градиенты температур в слое материала при недостаточном прогреве его внутренних слоев, поэтому такой подход не обеспечивает достаточную равномерность прогрева материала. Все вышесказанное снижает производительность печей и качество конечного продукта. В работе [29] на основе анализа теплового баланса вращающихся печей для производства извести отмечается возможность снижения потерь с уходящими газами за счет интенсификации теплообменных процессов в рабочей зоне.

Таким образом, наиболее важным критерием при разработке горелок и систем отопления вращающихся печей является возможность регулирования параметров факела, его положения в рабочей зоне и направленности воздушных потоков. Новые современные системы отопления и горелки выполняются под конкретные печи заказчика и сочетают в себе надежные проверенные технологии с индивидуальным подходом для каждой печной технологии, чтобы максимально удовлетворить технологическим требованиям процесса.

В отечественной и зарубежной практике имеется опыт применения на вращающихся печах горелочных устройств с регулируемыми параметрами факела, работающих на традиционном и альтернативных видах топлив. В горелках системы M.A.S. австрийского производства для традиционного и альтернативных видов топлива регулировка параметров факела осуществляется за счет гибкого управления положением воздушных сопел и разной степени закрутки газозадушной смеси [17].

Мультитопливные горелки Ari8 S.R.L. (Италия), предназначенные для сжигания природного газа, рудно-термического газа и пылеугольного топлива в промышленных нагревательных печах, характеризуются возможностью регулировки длины факела и работой на разных видах топлива. Регулировка размера факела в них осуществляется перераспределением доли так называемого тангенциального воздуха в общем потоке воздуха на горелку.

Горелочное устройство фирмы Metso Corporation (Финляндия), предполагающее в воздушном кольце установку ЗЗУ, работает одновременно на жидком и газообразном топливе. Закрутка воздушных потоков осуществляется направляющими лопаткам, газ подается отдельными струями (около 25) [30–32].

Институтом газа НАН Украины разработаны и внедрены в промышленную эксплуатацию

горелки с регулируемыми параметрами факела [10, 31, 32], работающие на природном газе и предназначенные для различных технологий. Горелки ПГ-35 и ПГ-35М предназначены для применения в печах с полной или частичной подачей воздуха в них, а горелки ГУРФ-30 предназначены для использования в печах, где весь воздух на горение подается через охладитель в рабочую зону. В этих горелках регулирование формы факела обеспечивается перераспределением топливного потока между центральным соплом и направленными под углом к воздушному потоку отдельными соплами. Промышленная эксплуатация таких горелок доказала возможность интенсификации передачи тепла нагреваемому материалу за счет организации температурного поля в объеме печи, соответствующего требованиям технологии обжига и виду материала, а также увеличения теплового потока к материалу со стороны нагретой кладки, в том числе при контакте с ним. Применение вышеуказанных горелок позволяет получить экономию топлива до 15 % при сохранении качества готового продукта.

Выводы

Анализ достижений в области усовершенствования вращающихся печей и состояния таких печей отечественной промышленности показал резерв повышения их энергоэффективности по следующим направлениям.

1. Снижение потерь через ограждения печи за счет разработки и применения футеровки с улучшением теплоизоляционных, эксплуатационных и стоимостных характеристик, например, за счет изменения формы огнеупора и введения в нее дополнительного волокнистого теплоизоляционного материала; применения защитных экранов и покрытий, снижающих тепловой поток от наружной поверхности корпуса печи в окружающее пространство; уменьшения неплотностей в конструкции печи.

2. Утилизация тепла отходящих газов и потоков тепла от корпуса печи для нагрева воздуха на горение и предварительного нагрева загружаемого материала.

3. Частичная или полная замена дефицитного и дорогого топлива на более дешевые и альтернативные виды топлива.

4. Интенсификация теплообмена в рабочей зоне печи за счет регулирования длины, ширины, направленности факела, а также оптимальной организации воздушных потоков. Необходимы серьезные исследования по интенсификации процессов теплообмена во вращающихся

печах за счет применения горелочных устройств нового поколения, позволяющих обеспечить состав и температуру газовой среды в рабочем объеме, необходимые для протекания процессов в слое, в том числе за счет повышения тепловых потоков от нагретой кладки в период ее непосредственного контакта с внутренними слоями материала.

Список литературы

1. Вальберг С.Г. Природный газ в цементной промышленности. — М. : Госстройиздат, 1962. — 172 с.
2. Монастырев А.В., Александров А.В. Печи для производства извести : Справ. — М. : Metallurgia, 1979. — 232 с.
3. Гальбек А.А., Шалыгин Л.М., Шмонин Ю.Б. Расчеты пирометаллургических процессов и аппаратуры цветной металлургии. — Челябинск : Metallurgia, 1990. — 379 с.
4. Гиттис Э.Б., Стригунов Ф.И., Васильева Л.Ф. Получение сульфата алюминия из каолина // Хим. пром-сть. — 1985. — № 5. — С. 32–33.
5. Гиттис Э.Б., Стригунов Ф.И., Соляких С.К. Восстановление целестина во вращающейся печи // Хим. пром-сть. — 1980. — № 4. — С. 60–62.
6. Пинчук М. Нужное из ненужного // Наука и жизнь. — 1986. — № 7. — С. 56–61.
7. Ленцов Д.И. Тепловой баланс вращающейся печи для производства извести и его анализ // Труды XVII Междунар. конф. «Теплотехника и энергетика в металлургии», Днепропетровск, Украина, 7–9 окт. 2014 г. — Днепропетровск : Нац. металлург. акад. Украины, 2014. — С. 115–116.
8. Карп И.Н. Энергосбережение в Украине : Проблемы и пути решения // Экологические и ресурсосбережение. — 2004. — № 4. — С. 3–13.
9. Губинский В.И. Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей // Металлургическая теплотехника : Сб. науч. тр. Нац. металлург. акад. Украины. — Днепропетровск : Пороги, 2005. — Кн. 1. — С. 149–156.
10. Троценко Л.Н., Пикашов В.С. Система регулирования температурного режима вращающейся печи // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2015. — № 5–6. — С. 88–92.
11. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел. — М. : Госстройиздат, 1956. — 437 с.
12. Баум В.А. Металлургические печи / Под ред. М.А.Глинкова. — М. : Metallurgizdat, 1951. — 975 с.
13. Dolginun V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A. The treatment of nonuniform granular materials by means of operating the segregated flows // Transactions of TSTU. — 2008. — Vol. 14, № 2. — P. 321–327.
14. Тринг М.В. Наука о пламенах в печах. — М. : Metallurgizdat, 1958. — 482 с.
15. Петраш В.Д. Теплопостачання на основі утилізації енергії охолодження обертових печей, яке

- регулюється : Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Харків, 2004. — 33 с.
16. Хрестоматія енергосбереження : Справ. / Под ред. В.Г.Лисиенко. — М. : Теплотехник, 2003. — 688 с.
 17. Трусова И.А., Менделеев Д.В., Ратников П.Э. Выбор горелочного устройства при производстве клинкера во вращающихся печах // Литье и металлургия. — 2011. — № 1. — С. 124–126.
 18. Юркова В.В., Шкляр В.І., Дубровська В.В. Екологічна та економічна доцільність спалювання лушпиння сояшиника для теплозабезпечення об'єкту // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Енергоефективність — 2013», Киев, 14–16 окт. 2013 г. — Киев, 2013. — С. 98–99.
 19. Лысенко А.А., Пьяных К.Е., Антощук Т.А., Пьяных К.К. Использование биотоплива для обжига материалов во вращающихся печах // Труды XVII Междунар. конф. «Теплотехника и энергетика в металлургии», Днепропетровск, Украина, 7–9 окт. 2014 г. — Днепропетровск : Нац. металлург. акад. Украины, 2014. — С. 123–124.
 20. Осиевский В.А., Китранов С.А., Пикашов В.С., Великодный В.А. Технология сжигания жидких отходов в цементных печах // Пром. теплотехника. — 2001. — Т. 23, № 4–5. — С. 111–113.
 21. Пикашов В.С., Троценко Л.Н., Новиков Н.В. и др. Опыт перевода вращающихся барабанных печей на отопление природным газом // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2009. — № 1. — С. 73–75.
 22. Теплоизоляция. Материалы. Конструкции. Технологии / Под ред. С.М.Кочергина. — М. : Стройинформ, 2008. — 440 с.
 23. Кривандин В.А., Молчанов Н.Г., Соломенцев С.Л. Металлургическая теплотехника. — М. : Металлургия, 1986. — Т. 2. — 424 с.
 24. Ходоров Е.И. Печи цементной промышленности. — Л. : Гипроцемент, 1968. — 452 с.
 25. Колодяжный В.С., Губинский М.В., Перерва В.Я. и др. Разработка эффективного способа теплоизоляции металлургических агрегатов // Труды XVI Междунар. конф. «Теплотехника и энергетика в металлургии», Днепропетровск, Украина, 4–6 окт. 2011 г. — Днепропетровск : Нац. металлург. акад. Украины, 2011. — С. 107–108.
 26. Маркус А. А. Моделирование тепловых процессов в трубчатых вращающихся печах спекания : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, 2014. — 20 с.
 27. А.с. 1606832 СССР, МКИ⁶ F 27 В 7/00. Вращающаяся печь / Е.П.Маков, Ю.А.Тупкин, В.А.Миллер и др. — Опубл. 15.11.90, Бюл. № 42.
 28. Детков С.П., Еринов А.Е. Тепловые процессы в печных агрегатах алюминиевой промышленности. — Киев : Наук. думка, 1987. — 270 с.
 29. Ленцов И.А. Тепловой баланс вращающейся печи для обжига известняка и его анализ // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту. Сер. Технічні науки. — 2014. — Вип. 29. — С. 103–115.
 30. <http://www:metso.com/miningandconstruction/MaTobox>
 31. Цкитишвили Э.О., Троценко Л.Н., Пикашов В.С. Регулирование параметров факела как средство экономии топлива при обжиге извести // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2013. — № 1. — С. 57–64.
 32. Троценко Л.Н., Пикашов В.С., Виноградова Т.В. Повышение эффективности нагрева и обжига сыпучих материалов во вращающихся печах // Металлург. и горноруд. пром-сть. — 2014. — № 5. — С. 101–104.

Поступила в редакцию 14.04.16

Троценко Л.М., канд. техн. наук
 Інститут газу НАН України, Київ
 вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: t-ln@ukr.net

Особенности конструкции та теплової роботи обертових печей та перспективні напрямки їх вдосконалення (Огляд)

Представлено огляд сучасного стану обертових печей для термічної обробки зернистих та кускових матеріалів. Наведено основні напрямки та досягнення у галузі енергозбереження та поліпшення якості кінцевого продукту при роботі таких печей. Показано резерви поліпшення роботи обертових печей вітчизняної промисловості, у тому числі за рахунок зниження втрат з робочого простору, утилізації теплоти з печі та інтенсифікації тепло- та масообмінних процесів у робочому об'ємі. Визначено перспективні напрямки щодо вдосконалення конструкції та теплової роботи обертових печей на основі аналізу накопиченого досвіду їх експлуатації. *Бібл. 32.*

Ключові слова: обертова піч, сипкий матеріал, енергозбереження.

Trotsenko L.N., Candidate of Technical Sciences
The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
 39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: t-ln@ukr.net

Features Design and Thermal Performance of Rotary Kilns and Perspective Directions of Their Improvement (Review)

This is a review of rotary kilns for thermal treatment of granular and lump materials. The main directions and achievements obtained in the field of energy efficiency and improvement of the quality of the final product are shown while using such furnaces. Shown reserves improve rotary kilns of the domestic industry, including reducing the loss of working space, recycling of heat from the furnace and the intensification of heat and mass transfer processes in the working volume. The purpose of this survey is to identify promising areas for improving the design and operation of thermal rotary kiln based on the analysis of experience of their operation. *Bibl. 32.*

Key words: rotary kiln, the bulk material, energy saving.

References

1. Valberg S.G. Prirodny gas v tsementnoy promishlennosti, Moscow : Gosstroyizdat, 1962, 172 p. (Rus.)
2. Monastyryov A.V., Aleksandrov A.V. [Furnaces for Lime Production], Moscow : Metallurgy, 1979, 232 p. (Rus.)
3. Galnbek A.A., Shalygin L.M., Shmonin Yu.B. Rascheti pirometalurgicheskix protsesov i aparaturi tsvetnoy metalurgii, Chelabinsk : Metallurgiya, 1990, 379 p. (Rus.)
4. Gitis E.B., Strigunov F.I., Vasilieva L.F. Poluchenie sulfata aluminiya iz kaolina, *Khimicheskay promishlennost*, 1985, (5), pp. 32–33. (Rus.)
5. Gitis E.B., Strigunov F.I., Solyznix S.K. Vostanovlenie tcelestina vo vrashayusheysya pechi, *Khimicheskay promishlennost*, 1980, (4), pp. 60–62. (Rus.)
6. Pinchuk M. Nugnoe iz nenugnoy, *Nauka i Zhizn*, 1986, (7), pp. 56–61. (Rus.)
7. Lentcov D.I. Teplovoy balans vrashayusheysya pechi dlya proizvodstva izvesti i ego analiz. *Trudi 17th megdunarodnoy konferencii «Teplotexnika i energetika v metalurgii»*, Dnepropetrovsk, 7–9 Okt. 2014, Dnepropetrovsk : Nacional'naja Metallurgi- cheskaja Akademiya Ukrainy, 2014, pp. 115–116. (Rus.)
8. Karp I.N. Energoberegeniye v Ukraine : Problemy i puti resheniya, *Ecotechnologii i resursoberegeniye [Ecotechnologies and Resource Saving]*, 2004, (4), pp. 3–13. (Rus.)
9. Gubiskiy V.A. Aktualnie zadachi rekonstrukcii nagrevatelnix pechey, *Metalurgicheskaya teplotexnika : Sbornik nauchnich trudov Nacional'noj Metallurgicheskoy Akademii Ukrainy*, Dnepropetrovsk : Porogi, 2005, Iss. 1, pp. 149–156. (Rus.)
10. Trotsenko L.N., Pikashov V.S. Sistema regulirovaniya temperaturnogo reshima vrashayusheysya pechi, *Energotechnologii i resursoberegeniye [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2015, (5–6), pp. 88–92. (Rus.)
11. Kleyn G.K. Stroitel'naya mexanika sipuchih tel, Moscow : Gosstroyizdat, 1956, 437 p. (Rus.)
12. Baum V.A. Metalurgicheskkiye pechi, Moscow : Metalurgizdat, 1951, 975 p. (Rus.)
13. Dolginun V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A. The treatment of nonuniform granular materials by means of operating the segregated flows, *Transactions of TSTU*, 2008, 14 (2), pp. 321–327.
14. Tring M.V. Nauka o plamenax v pechax, Moscow : Metalurgizdat, 1958, 482 p. (Rus.)
15. Petrash V.D. Teplopostachanya na osnovi utilizatsii energii oxolodgenya obertovix pechey, yake regulyuetsya : Avtoreferat na zdotuyta naukovogo ctupenya doktora texnichnih nauk, Kharkov, 2004, 33 p. (Ukr.)
16. Khrestomatiya energosberegeniya, Ed. Lisienko V.G., Moscow : Teplotexnik, 2003, 688 p. (Rus.)
17. Trusova I.A., Mendelev D.V., Ratnikov P.E. Vibor gorelochnogo ustroystva pri proizvodstve klinkera vo vrashayushichsya pechach, *Litye i metallurgiya*, 2011, (1), pp. 124–126. (Rus.)
18. Yurkova V.V., Shklyar V.I., Dubrovskaya V.V. Ekologichna ta ekonomichna dotcilnist spalyuvanya lushpinya sonyashnika dlya teplozabezpechenya obektu, *Tezisi dokladov megdunarodnoy nauchno-technich. konferencii «Energoeffektivnost-2013»*, Kiev, 14–16 Okt. 2013, Kiev, 2013, pp. 98–99. (Ukr.)
19. Lisenko A.A., Pianykh K.Ye., Antoshchuk T.A., Pianykh K.K. Ispolzovaniye biotopliva dlya obzhiga materialov vo vrashayushichsya pechach, *Trudi 17th megdunarodnoy konferencii «Teplotexnika i energetika v metalurgii»*, Dnepropetrovsk, 7–9 okt. 2014, Dnepropetrovsk : Nacional'naja Metallurgicheskaja Akademiya Ukrainy, 2014, pp. 123–124. (Rus.)
20. Osievskiy V.A., Kitranov S.A., Pikashov V.S., Velikodny V.A. Tehnologiya szhiganiya zhidkikh

- otchodov v tsementnich pechah, *Promishlennaya teplotekhnika*, 2001, 23 (4–5), pp. 111–113. (Rus.)
21. Trotsenko L.N., Pikashov V.S., Novikov N.V., Dunaychuk S.N., Tsvetkov S.V., Pruskiy A.A., Opit perevoda vrashayushixsya barabanix pechey na otoplenie prirodnim gazom, *Energotexnologii i resursosberegeniye [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2009, (1), pp. 73–75. (Rus.)
 22. Teploizolyatciya. Materiali. Konstrukcii. Tehnologii, Ed. Kochergin S.M., Moscow : Stroyinform, 2008, 440 p. (Rus.)
 23. Krivandin V.A., Molchanov N.G., Solomentcev S.L. Metallurgicheskaya teplotekhnika, Moscow : Metallurgiya, 1986, 2, 424 p. (Rus.)
 24. Khodorov E.I. Pechi tsementnoy promishlenosti, Leningrad : Giprocement, 1968, 452 p. (Rus.)
 25. Kolodyagniy V.S., Gubinskiy M.V., Pererva V.Ya., Usenko A.Yu., Volkov V.F., Tryapichkin M.G., *Trudi 16th megdunarodnoy konferentcii «Teplotekhnika I energetika v metalurgii»*, Dnepropetrovsk, 4–6 Okt. 2011, Dnepropetrovsk : Nacional'naja Metallurgicheskaja Akademiya Ukrainy, 2014, pp. 107–108. (Rus.)
 26. Markus A.A. Modelirovanie teplovih protcesov v trubchatix vrashayushixsya pechax spekaniya : Avtoreferat na zdotuyta naukovogo ctupenya Candidata Texnichnih Nauk, Sankt-Peterburg, 2014, 22 p. (Rus.)
 27. A.s. 1606832 SU, IC F 27 B 7/00. Vrashayushayasya pech, E.P.Makov, Yu.A.Tupkin, V.A.Miler, G.V.Khramkov, S.P.Makov, Publ. 15.11.90, Bull. 42. (Rus.)
 28. Detkov S.P., Erinov A.E. Teplovie protcesi v pechax alyuminievoy promishlenosti, Kiev : Naukova dumka, 1987, 270 p. (Rus.)
 29. Lentcov I.A. Teplovoy balans vrashayusheysya pechi dlya obgiga izvestnyaka i ego analiz, *Vestnik Priazovskogo dergavnogo texnichnogo universitetu, Seriya: Tehnichni nauki*, 2014, Iss. 29, pp. 103–115. (Rus.)
 30. [http://www: metso.com/miningandconstruction /MaTobox](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox).
 31. Tkitchivili E.o., Trotsenko L.N., Pikashov V.S., Matcishin N.V., Kukuy K.A., Leykovskiy K.G., Vinogradova T.V., Adjustment of Flame Parameters as Mean of Fuel Economy at Burning Lime, *Energotexnologii i resursosberegeniye [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2013, (1), pp. 57–64. (Rus.)
 32. Trotsenko L.N., Pikashov V.S., Vinogradova T.V. Povishenie effektivnosti nagreva i obgiga sipuchih materialov vo vrashayushixsya pechah, *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promishlenost*, 2014, (5), pp. 101–104. (Rus.)

Received April 14, 2016

Передплачуйте журнал
«Енерготехнології і ресурсосбереження» (індекс 74546)
 на II півріччя 2017 р. за «Каталогом видань України»

у відділеннях поштового зв'язку;

- в операційних залах поштамтів;
- в пунктах приймання передплати;
- на сайті ДП «Преса»: www.presa.ua

Нагадуємо, що в будь-який час можна здійснити передплату, скориставшись послугою **«Передплата ON-LINE»** за допомогою електронних версій **«Каталогу видань України»** та **«Каталогу видань зарубіжних країн»** на сайті ДП **«Преса»** www.presa.ua.

Оплату можна здійснити у будь-який зручний для Вас спосіб: в банку або на пошті за сформованим на сайті рахунком та за допомогою платіжних карток Visa чи MasterCard.