

Шапоров П. В., аспирант,
Питак И. В., канд. техн. наук, доц.,
Себко В. В., д-р техн. наук, проф.

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ШАХТНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ МЯГКОГО ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА

ipitak@rambler.ru

В статье рассмотрены вопросы распределения топочных газов по сечению шахтной печи, характер движения материалов и газа, кинетика процесса. По результатам исследований предложена конструкция шахтной печи. Рассмотрен вопрос о применении газообразного топлива в шахтных известково-обжигательных печах для производства высокообожженной извести с высокой активностью.

Ключевые слова: известь, кинетика процесса, обжиг, печь, конструкция, материал, топливо.

Введение

К извести, которая потребляется для технологических целей различными отраслями промышленности, и соответственно к ее качеству предъявляют разнообразные требования. Для обеспечения различных отраслей народного хозяйства известью требуемого качества перед производством всегда стояла задача разработки новых технологических режимов и конструкций печей, которые обеспечивали бы стабильное получение продукта с заданными свойствами. Основными агрегатами для многотоннажного производства извести являются шахтные известково-обжигательные печи, в которых в качестве топлива используются доменный кокс или антрацит или сортовые угли. Как правило тощие виды топлива применяют в производствах, где наряду в технологическом цикле используется углекислый газ, который содержится в топочных газах с концентрацией 36–40% масс.

Ряд производств, обеспечивающих выпуск высокодисперсных наполнителей и ингредиентов по физико-химическим свойствам близки к наноматериалам первого рода, используют в технологическом процессе.

Известь с содержанием основного вещества $\text{CaO} > 96\%$, содержащем $\text{CaO}_{\text{акт}} > 92\%$ и суммарным содержанием примесей менее 1,5% [1]. Производство извести для таких технологических процессов требует не только определенной подготовки известняка или мела к обжигу, но в основном использования в качестве топлива природного газа, продукты сжигания которого исключают загрязнение извести.

К вышеуказанному ряду производств относятся производства химически осажденного мела, высокодисперсного оксида и гидроксида кальция, гидрохлорида кальция, кальциевых наполнителей для парфюмированной и медицинской промышленности и др. Использование альтернативных источников энергии с целью производства чистого продукта для проведения

процесса обжига известняка, как например, СВЧ-энергии, электрообогрева [2], солнечной энергии, проблематично, поскольку неотработанны реакторные установки для реализации процесса, а также достигнутый уровень исследований не позволяет надеяться организацию в ближайшем будущем многотоннажного производства извести.

Поэтому применение газообразного топлива в шахтных известково-обжигательных печах для производства высокообожженной извести с высокой активностью остается необходимым приемом.

Конструктивное оформление обжиговых шахтных печей с использованием газообразного топлива и особенности процесса

Как показал анализ данных по эксплуатации 6 печей на территории Украины на предприятиях основное распространение получили газовые шахтные печи цилиндрического и щелевого типа с прямым профилем футеровки производительностью от 100 до 250 т/сутки, диаметром шахты от 3,2 до 5,4 м и высотой 6–8 диаметров печи. Чаще всего на них используются системы отопления с центральной и двумя рядами периферийных инжекционных горелок без высова. Таким печам характерен высокий удельный расход топлива, составляющий 4000–4700 кДж/кг, в продукте повышенное остаточное содержание CO_2 – до 12% и относительно низкая реакционная способность продукта по времени гашения – 25 минут. При этом содержание $\text{CaO}_{\text{акт}}$ в продукте не превышает 60–65%. В виду этого, производство извести с содержанием основного вещества $\geq 96\%$, остаточным $\text{CO}_2 \leq 2\%$ и содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}} > 90\%$ в таких печах затруднено. Очевидно, что печи, работающие на газообразном топливе, расходуют тепла на 15–25% больше, чем лучшие печи на твердом топливе. Перерасход тепла вызывается неполнотой сгорания в фильтрационном слое из-за неравномерного распределения топливного

газа по поперечному сечению печи, неблагоприятных условий для перемешивания газа с воздухом в слое пускового материала, в связи с чем затрудняется горение газа, возможен недожег топлива. Кроме того по этой же причине в слое материала возможно возникновение зон с аномально высокой и относительно низкими температурами, что приводит к спеканию продукта реакции или недожегу исходного сырья (известняка, мела). Известные разработки по усовершенствованию конструктивного оформления шахтных печей с целью ликвидации вышеотмеченных недостатков, например, усовершенствование процесса сжигания природного газа с принудительным отклонением факела ил отвод части подогретого воздуха из внутренней части печи перед зоной подогрева, а также оснащение печи балочными многосопловыми горелками не дают кардинального улучшения при протекании фильтрационного горения топлива.

Согласно для термической обработки полидисперстных пород с регулируемой температурой теплоносителя печь должна характеризоваться следующими особенностями: сжигание топлива должно осуществляться вне слоя материала с получением продуктов горения заданной температуры; для обеспечения равномерного распределения теплоносителя и снижения аэродинамического сопротивления движение газов в зоне обжига должно происходить в перпендикулярном направлении по отношению к опускающемуся материалу. Однако достоверные данные по эксплуатации таких печей отсутствуют.

Во всех типах печей независимо от конструктивного оформления различают три основных зоны: зону подогрева, зону обжига и зону охлаждения. Неравномерное распределение скоростей газового потока по сечению шахты оказывают влияние рабочие фракции известняка и характер движения материала в цилиндрической части печи. Наилучшим вариантом характера режима движения материала является вариант, когда средние вертикальные скорости \bar{V} крупных кусков (0,06 – 0,08 м); меньших кусков (0,03–0,04 м) в объеме \bar{V}_v и мелких кусков в

кристаллической области \bar{V}_w равны. В работах проведено численное моделирование течения сыпучего материала в реакторе шахтного типа и было с достаточной достоверностью установлено, что выше, указанный вариант может достигаться при среднем размере мелких кусков – 0,03 м, среднем размере крупных кусков – 0,07 м и соответственно массовом содержании фракций 25 – 30 и 70 – 75%. Следует отметить, что такое соотношение фракционного состава известняков достигается перед подачей их в печь при их обогащении с использованием фотоэлектронного сепаратора [3].

Однако общепринятым является утверждение, что в шахтную печь необходимо подавать размеры кусков известняка при соотношении $D_p / d > 45 - 50$. При этом считается, что размер d не влияет на распределение газового потока. Последнее свидетельствует о том, что известняк должен подаваться в печь строго определенной фракцией примерно $d = 0,07 - 0,08$ м при внутреннем диаметре печи $D_p = 3,7 - 5,5$ мм.

Тем не менее даже при таком фракционном составе при движении материала в цилиндрической части шахтной печи при центральной выгрузке наблюдается отличие приосевой и пристенной скоростей в зоне обжига на 5–8% с преобладание приосевой. Эта неравномерность может быть сглажена с использованием нескольких отверстий для выгрузки извести вблизи стен. Таким образом вопрос о фракционном составе известняка, подаваемого в печь и условиях равномерного движения материала с различным фракционным составом вдоль шахты печи теоретически и практически решен в известной литературе.

Кинетика обжига известняка при условии движения плотного слоя материала и фильтрации через этот слой топочных газов достаточно исследована во многих работах. Для практических случаев, когда кусковой слой материала нагревается горячими газами время полного разложения известняка, то есть условное время пребывания в зоне обжига печи, может быть оценено по уравнению:

$$\tau_{II} = \frac{Q_y \cdot \rho_o \cdot C_o \cdot r_o}{300 \cdot \alpha \cdot \lambda_o \cdot \Delta T_2} \cdot \left[(1 - E \cdot T_B) \cdot \left(\lambda_o + \frac{\alpha \cdot r_o}{2} \right) - \frac{1}{4} \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T_2 \cdot r_o \right] \quad (1)$$

где Q_y – удельный расход тепла кДж/кг; ρ_o – плотность известняка – 2553 кг/м³; C_o – содержание CaCO₃, %_{масс}; r_o – радиус куска известняка, м; α – коэффициент теплообмена в интерва-

ле температур от 950–1300 °С – 62,85÷838 кДж/(м²·ч·К); ΔT_2 – разность температур между газовой средой и веществом; λ_o – коэффициент теплопроводности кДж/(м·с·К),

$$\lambda_o = \frac{\lambda_T}{(1 + ET)}$$

где E – коэффициент $\sim 0,42 \cdot 10^{-3}$;

$$\lambda_T = \lambda_o(1 + ET).$$

В общем случае время пребывания материала в печи от момента загрузки и до момента выгрузки определяется суммой времен пребывания в каждой из зон шахтной печи:

$$\tau_1 + \tau_{II} + \tau_{ок} = \tau \quad (2)$$

где τ_1 – время пребывания в зоне подогрева; τ_{II} – ф.2; $\tau_{ок}$ – время пребывания в зоне охлаждения.

Согласно расчет τ_1 и $\tau_{то}$ производится аналогичным образом, для τ_1 выбираем интервал температур среды от 1300 до 250 – 300 °С, $\tau_{ок}$ – выбирается интервал температур для материала от 1000 до 100 °С и учитывается плотность продукта при степени разложения известняка 98% ($\rho_{CaO} = 1700 \text{ кг/м}^3$). В зоне подогрева лимитирующей стадией является подвод тепла от газа к кусковому материалу и при этом α можно принять равным $\sim 400 \div 450 \text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К)}$ и τ_1 оценивается $0,8 \div 1$ часа. Общее время пребывания материала в печи (зоне подогрева и зоне обжига) оценивается $1,4 \div 1,5$ часа, средняя скорость перемещения материала в цилиндрической части печи оценивается как $0,004 \text{ м/с}$, что позволяет считать фильтрующий слой условно неподвижным.

Таким образом можно считать, что наиболее ответственной частью всех печей является распределение скоростей газового потока по сечению шахты печи и глубина радиального проникновения газового потока в слой материала. Эти характеристики оказывают влияние на качество известняка и равномерность обжига известняка.

Исследование распределения тепловых газов по сечению печи и кинетики разложения известняка в печах являются целью данной работы.

Методика проведения эксперимента

Исследования процессов были проведены на холодной и горячей аэродинамической модели, выполненной в виде сектора промышленной печи. Шахта горячей модели имела прямоугольную форму с размерами в плане $0,5 \times 1,2 \text{ м}$ и высотой $7,5 \text{ м}$, с зонами: подогрева (40% полезной высоты шахты от Н-засыпки), обжига (40% от Н-засыпки), охлаждения (20% от Н-засыпки). Ниже границы между предполагаемыми зонами подогрева и обжига, а также на половине зоны

обжига установлено по три фурмы для подачи топочных газов. В области установки фурм имеется уменьшение внутреннего размера модели за счет высова корпуса фурм на 10–15%. Вне внутренней части печи (модели) фурмы соединены с футерованными боровами из легковеского наливного огнеупора, в которых установлены горелки типа ГПН-3 конструкция института теплопроект.

В опытах исследовался природный газ с теплотой сгорания $Q_H^p = 35,6 \text{ МДж/м}^3$, $\rho = 0,73 \text{ кг/м}^3$. Учитывая возможность использования рециркулирующего воздуха из зоны охлаждения температура воздуха подаваемого в горелки принята 150–200 °С, коэффициент расхода воздуха $\alpha = 1,1$, давление в топке 50–100 Па. Длина пламени горелки 0,5–0,6 м, соответственно факел заканчивается на выходе из фурмы. Фурмы ниже зоны подогрева установлены по воображаемой окружности через 120°, а в зоне обжига фурмы по отношению к предыдущей смещены на 60°, то есть они также друг от друга установлены через 120°, но смещены относительно предыдущих на 60°. воздух нагнетался в горелки и борова соответственно вентиляторами в борова подавался холодный воздух, измерение расхода осуществлялось с помощью диафрагм и микроанометров. Отвод газа из печи также осуществляли с помощью вентиляторов через систему циклонов, а затем в дымовую трубу.

Для замера температур по высоте печи и на выходе из фурм установлены термодпары в защитных чехлах. Воздух для охлаждения известия вводился в нижнюю часть конического бункера, который имел угол раскрытия конуса 30° и на выходе валковый выгрузатель. Пробы газа, отбираемые по высоте печи и на выходе, анализировались на аппарате ВТИ-2, химический недожег определяли по методике. В него загружался известняк (CaCO_3 – 98,5%, MgO – 0,2%) полидисперстного состава с содержанием фракции $0,027 \text{ м}$ – 30% и фракции $0,065 \text{ м}$ – 70%, общий расход природного газа составлял $38,7 \text{ нм}^3/\text{ч}$. Холодная аэродинамическая модель была выполнена из прозрачного стекла и соответствовала 1/10 предполагаемой промышленной печи диаметром $3,5 \text{ м}$. область распространения газового потока в слое материала определялась путем фиксирования окрашенных участков кусковой засыпки. В качестве индикатора цветной реакции использовалось взаимодействие паров йода, содержащихся в подаваемом воздухе имитирующим газ, с крахмалом, нанесенным на поверхность кусков известняка слоем $\sim 1 \text{ мм}$ ($0,001 \text{ м}$). воздух из модели отводился посредством вентилятора, в модели осуществлялся пере-

крестный ток материала и газа с последующим противоточным отводом газа через верх модели.

Штуцера для подачи газа в холодной модели примерно соответствовали расположению фурм в горячей модели. Опыты проводились как с использованием полидисперсного состава известняка так и с отдельными фракциями.

В штуцера подавался воздух насыщенный парами йода с расходом в 10–15 раз меньше по отношению суммарного расхода образующихся топочных газов на выходе из фурм.

Результаты экспериментальных исследований

Визуальные наблюдения на холодной модели показали, что при засыпке однородными размерами известняка (0,06–0,07 м) при подаче воздуха в одну или три штуцера наиболее яркая и «густая» окраска наблюдается у стен и на расстоянии от стен ~ 75–80 мм, затем при продвижении по радиусу модели к центру окраска «блекнет». Такая же картина наблюдалась и при загрузке в модель известняка фракцией 0,03–0,04 м, однако окраска блекла уже на расстоянии 45–55 мм от стенок моделей, а в центре сечения практически цветне изменялся. Другой особенностью, которая наблюдалась, было то, что окраска распространялась вдоль оси холодной модели как вверх, так и вниз от точки ввода газа. Если условно оценить толщину окраски за единицу, то примерно от точки ввода газа вверх окрашено 0,7–0,8, а вниз 0,2–0,3. В целом оценивая вышеприведенные результаты можно считать, что они свидетельствуют преимущественно о кольцевом токе подаваемых газов в модели вдоль стенок и взаимодействии зон противотока и прямотока соответственно вверх и вниз модели. Увеличение расхода газа через штуцера в 1,5 раза сместило глубину окраски на 5–7 мм в радиальном направлении, что свидетельствует о в целом-то неэффективности этого мероприятия. Относительно равномерное распределение окраски по поперечному сечению слоя было достигнуто, когда штуцера подачи воздуха были выдвинуты вглубь слоя на 0,04 м, а слой известняка представлял собой полидисперстную систему состоящую из кусков размером 0,04 м и 0,07 м при соотношении 20 и 80% соответственно. Куски меньшего размера произвольно распределялись по объему модели при загрузке смеси, тем не менее наблюдалось относительно равномерное их распределение по объему исследуемого слоя, степень сегрегации составляла примерно 5–7%. В этом случае максимальное радиальное проникновение Π_o струи воздуха примерно пропорционально $\sim 0,06 \frac{H}{d}$, где d – размер 0,06 м. При этом также наблюдалось

возникновение зон противотока ~0,6–0,7 и прямотока 0,3–0,4. Такой эффект (условно равномерное распределение окраски) по-видимому наблюдается из-за изменения структуры потока материала за счет высова штуцеров. Определение глубины проникновения топочных газов с температурой 1250 °С в радиальном направлении проводилось также на горячей модели путем одновременного отбора проб газа, отходящего из печи и из слоя кускового материала по диаметру шахты на уровнях, где расположены фурмы и на уровнях выше фурм (на расстояниях 1,2 м) и ниже фурм (на расстояниях 1, 2 м). Средний размер кусков загруженного в печь известняка в разных опытах был равен $d = 0,037$ и $0,076$ м. Каждый последующий отбор проб газа проводили через 9–10 минут (540–600 сек). Расчет статистических характеристик и коэффициентов уравнений проникновения топочных газов в радиальном направлении был проведен на ЭВМ. Получено уравнение для расчета проникновения топочных газов в радиальном направлении.

$$\Pi_o = C \cdot V_{T_r} \cdot d^{0,4} \cdot H^{0,3} \quad (3)$$

где $C = 4,0$; V_{T_r} – объем топочных газов м^3 ;

d – диаметр кусков материала большого размера, м; H – высота засыпки, м.

Величина среднего отклонения значений проникновения, рассчитанных по уравнению составляет $\pm 12\%$.

Наблюдения за поведением материала непосредственно у фурм свидетельствует об отсутствии очагов высокой температуры (рисунки 1).

При этом зона поддержания указанного распределения температур по высоте составляла примерно 3–3,2 м. Ниже этой зоны температуры слоя составляла 860–900 °С, при этой температуре дальнейший обжиг прекращался. Тем не менее установлено, что по сравнению с типовыми шахтными печами в зоне поддержания температур 1050–1070 °С наблюдается адиабатическая выдержка при температурах больше 1000 °С в слое 1,2–1,5 м, то есть по высоте слоя ниже и выше точек ввода топочных газов.

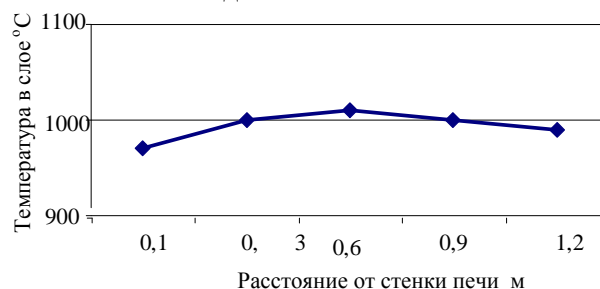


Рис. 1. Температурное поле в слое материала в районе фурм

Это свидетельствует о том, что существует (как и в холодной модели) прямоток топочных газов ниже зоны ввода и противоток выше этой зоны, что удлиняет зону обжига и позволяет увеличить степень обжига на 3–4%, а производительность печи на 10%.

Проведенные результаты экспериментов свидетельствуют о том, что диссоциация кускового известняка на начальном этапе процесса определяется фактором температуры, а при степени обжига куска свыше $\alpha = 80$ –85 лимитирующими процессом является внутренний массоперенос в поверхностной оболочке извести. Конструкция печи, которая обеспечивает прямоточно–противоточный принцип теплообмена позволяет осуществлять адиабатическую выдержку в зоне обжига при температурах 1050–1070 °С, что обеспечивает возможность получать известь с содержанием основного вещества 96–97% и содержанием $\text{CaO}_{\text{акт}}$ » 90%. Достигнутое при исследованиях увеличение производительности на 20–25%, сопровождалось снижением удельного расхода топлива на 10%. Фракционный состав известняка загружаемый в печь позволяет считать, что возможна утилизация отходов классификации карбонатного сырья

фракции 20–40 мм.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о целесообразности разработки и широкого внедрения новой конструкции печи в различных отраслях промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карзун Е.Г. Исследование процесса смачивания извести водой перед подачей ее в гидратор в производстве высокодисперсного гидроксида кальция или пушонки [Текст] / Е.Г. Карзун, Д.В. Боглаенко, В.П. Шапоров, П.В. Шапоров // Восточно–Европейский журнал передовых технологий – 2007. – № 1/3 25. С. 41–46.
2. Шахин И.Х. Анализ способов производства извести и обжига карбонатного сырья [Текст]: / И.Х. Шахин, В.П. Шапоров, О.А. Лопухина // Вестник НТУ «ХПИ». 2003. – №3. – С. 76–90.
3. Шапоров П.В. О возможности обогащения известняков класса 40–150 мм с использованием фотоэлектронного сепаратора [Текст] / П.В. Шапоров, В.Ф. Райко, В.В. Себко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 16. – С. 139–153.