МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПЕЧИ ОБЖИГА КЛИНКЕРА

© В. В. Шухин, М. С. Насуханов, М. С. Бараев
ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

Вращающиеся печи используются для преобразования кальцинированной сырьевой смеси в цементный клинкер. В этой статье рассматривается система контроля и управления клинкерной вращающейся печью посредством трехмерной модели для моделирования ключевых процессов, происходящих в твердом слое клинкерных печей. Эта система опирается на математическую модель, состоящую из пяти операционных уровней: три слоя для мониторинга состояния печи и два для ее системы управления. Изменение высоты слоя и образование расплава в горячей зоне внутри печи были учтены. Энергетический баланс (включая кондуктивный, конвективный и радиационный теплообмен) определялся на основе квазистационарного приближения. Численные эксперименты проводились с целью исследования влияния основных рабочих и проектных параметров на потребление энергии печи. Модель можно использовать для мониторинга температурного профиля внутри печи, для снижения потребления энергии на тонну клинкера. Модель и результаты, рассматриваемые в данной статье, обеспечивают настройку системы управления печи обжига клинкера.

Ключевые слова: печь обжига клинкера, мониторинг, контрольно-измерительные приборы, прогнозирование, диагностика, оптимальное управление на основе математической модели.

Печь обжига клинкера представляет собой длинный слегка наклоненный вращающийся цилиндр, который используется в процессе непрерывного прокаливания известняка при температуре свыше 1400°C для производства клинкера в цементной промышленности (рис. 1). Печь обжига клинкера является основной линии производства цемента, производительность которой, как правило, и определяет общую производительность завода. Процесс прокаливания, который происходит в печи, очень энергоемкий и выделяет большое количество пыли и углекислого газа. Подсчитано, что печь потребляет более 80% тепловой энергии на цементном заводе [6]. Печь также выбрасывает до 5-7% CO_2 , производимого человеком в мире, и этот уровень может достичь 20% к 2050 году, учитывая текущий растущий спрос на цемент и существующую технологию производства [1]. Следовательно, повышение эффективности печи обжига клинкера и сокращение выбросов CO_2 являются основными целями [8]. Для достижения этих целей первым шагом будет мониторинг процесса обжига.

Из-за технических и эксплуатационных ограничений наблюдение внутри печи довольно затруднительно, что вызывает необходимость в определении полного и точного состояния печи, при невозможности визуального наблюдения, за счет оценки ее основных параметров. Это можно определить посредством математического моделирования процесса в режиме реального времени. Состояние печи обжига предоставляется системой мониторинга, следовательно, используется в качестве поддержки принятия решений операторов и инженеров для оптимального управления процессом обжига (рис. 2). Эта модель также может быть использована для изучения возможности технологического улучшения процесса обжига.

Как уже упоминалось, система мониторинга опирается на математическую модель процесса обжига. Модель также считается основным компонентом системы мониторинга, поскольку ее точность гарантирует точность результатов мониторинга. Хотя использование печи обжига в цементной промышленности датируется началом 1900-х годов, их эффек-

Рис. 1. Печь обжига клинкера

тивное моделирование было отложено на десятилетия. Модели для печей обжига в основном делятся на две категории. В первой категории уравнения материального и энергетического баланса решаются как для газовой, так и для твердой фаз. Затем решается двухточечная краевая задача с использованием соответствующих численных методов для получения температурного профиля и массовой доли каждой фракции. Одна из первых успешных попыток моделирования печей обжига с использованием метода материального и энергетического баланса моделировалась системой дифференциальных уравнений в частных производных. Этот подход к моделированию стал основным для многих будущих работ по моделированию печей обжига.

В то время как осевая одномерная модель используется многими исследователями для описания области обжига, поток газа в печи принимает сложные трехмерные формы из-за горелок, геометрии печи, установок, а также сложных физических или химических явлений, происходящих внутри печи. Эти закономерности существенно влияют на механизмы теплообмена газовых материалов, в то время как одномерная модель не может их уловить. В связи с этим коды вычислительной гидродинамики (ВГД) [2] используются для описания

поля потока и сжигания топлива. Результаты показывают, что такие коды могут использоваться для крупномасштабных промышленных печей.

В данной работе представлена 3D модульная модель. Первый модуль содержал многомерный код ВГД для сжигания газа. Температура в стенках печи описывается трехмерным уравнением теплопроводности, а фракционный состав материалов слоя – одномерной осевой моделью. Эти три модуля решаются одновременно для определения температуры газа и печи, а также состава слоя.

Используя любой из подходов, предполагается, что параметры модели являются постоянными значениями, тогда как печь хорошо известна как распределенный параметр и сильно изменяющийся во времени динамический процесс. В этой работе, чтобы повысить точность моделирования и воспроизвести более точное состояние внутренней части печи в режиме реального времени, предлагается структура модели, в которой параметры считаются пространственно-распределенными и изменяются во времени. Параметры настраиваются и настраиваются динамически с использованием доступных наблюдений из печи. Эта модель

затем используется для оценки оперативных переменных, которые технически не поддаются измерению или наблюдению. Наблюдаемые и оцененные рабочие переменные дают полное описание печи, которое визуализируется для процедур анализа и принятия решений. Предложенная модель может быть дополнительно использована для прогнозирования и диагностики на основе модели, а также для оптимального управления процессом обжига.

В этой статье в первую очередь представлена 3D-структура системы мониторинга. Как явно указано в названии, мы сосредоточены на системе мониторинга. Однако операционные уровни прогнозирования и управления также кратко поясняются, хотя их подробное описание требует применения расширенной теории оптимального управления для процессов с распределенными во времени параметрами.

Иерархическая схема предлагаемой системы мониторинга и управления печью обжига клинкера показана на рисунке 2. Система мониторинга [3] состоит из трех рабочих уровней: измерения, обработки математической модели и визуализации; двух уровней прогно-

зирования и диагностики, и управления процессом на основе модели, рассматриваемые как расширение системы мониторинга для завершения цикла автоматического управления печью.

Чтобы объяснить систему мониторинга, мы сформируем второй уровень, называемый уровнем обработки математической модели, поскольку он рассматривается как обрабатывающий центр системы.

Уровень обработки математической модели.

Этот уровень является основой мониторинга и для последующих этапов системой управления процессом. Он содержит математическую модель процесса, которая лежит в основе систем контроля и управления.

Предложенная математическая модель процесса в данной работе описывается в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных и состоит из двух частей. Для разработки структуры модели, в первую очередь, мы выбираем три рабочие переменные в качестве переменных состояния, которые представляют собой температу-

Рис. 2. Визуализация, мониторинг и управление работой печи обжига клинкера

ру газа $T_G(x, t)$, температуру слоя клинкера $T_c(x, t)$ и распределение массы слоя клинкера $M_c(x, t)$. Очевидно, что состояние печи в рабочем режиме может быть оценено по состоянию данных переменных. Кроме того, любая другая рабочая переменная может быть оценена через них, используя простые дополнительные уравнения процесса.

Первая часть модели описывает эволюцию переменных состояния во времени относительно переменных процесса, которые выводятся из уравнений баланса массы и энергии в подвижном контролируемом объеме, перпендикулярном горизонтальной оси печи (рис. 3). Это приводит к следующей системе дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial T_G(x, t)}{\partial t} = f_{1,1}(x, t) \cdot T_c(x, t) + f_{1,2}(x, t) \cdot \frac{\partial T_G(x, t)}{\partial x} + f_{1,3}(x, t) \cdot \frac{\partial M_c(x, t)}{\partial x} + f_{1,6}(x, t) \cdot M_{Fuel}(x, t) + f_{1,4}(x, t)[T_G(x, t) - T_c(x, t)] + f_{1,5}(x, t)[T_G(x, t) - T_B(x, t)] \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_c(x, t)}{\partial t} = f_{2,1}(x, t) \cdot T_G(x, t) + f_{2,2}(x, t) \cdot \frac{\partial T_c(x, t)}{\partial x} + f_{2,3}(x, t) \cdot \frac{\partial M_G(x, t)}{\partial x} + f_{2,4}(x, t)[T_G(x, t) - T_c(x, t)] + f_{2,5}(x, t)[T_c(x, t) - T_B(x, t)] \quad (2)$$

$$\frac{\partial M_c(x, t)}{\partial t} = f_{3,1}(x, t) \cdot \frac{\partial M_c(x, t)}{\partial x} + f_{3,2}(x, t) \cdot T_c(x, t) + f_{3,3}(x, t) \cdot T_G(x, t) \quad (3)$$

для $f_{ij}(x, t)$ в качестве параметров модели. $M_{Fuel}(x, t)$ и $T_B(x, t)$ представляют соответственно массу впрыскиваемого топлива в печи и температуру огнеупорного слоя. Параметры модели рассматриваются как изменяющиеся во времени и пространственно-распределенные, чтобы учитывать изменяющиеся во времени и распределенные параметры процесса.

На практике из-за технических ограничений и, за исключением нескольких моментов, переменные состояния являются приблизительно измеримыми и наблюдаемыми. Чтобы установить связь между измеримыми и неизмеримыми переменными, разработаны два дополнительных уравнения:

$$T_B(x, t) = f_{0,1}(x, t) \cdot T_c(x, t) + f_{0,2}(x, t) \cdot T_G(x, t) \quad (4)$$

$$T_{Shell}(x, t) = f_{0,3}(x, t) \cdot T_B(x, t) + f_{0,4}(x, t) \cdot T_{Surr}(x, t) \quad (5)$$

где $T_{Surr}(x, t)$ и $T_{Shell}(x, t)$ – соответственно температура окружающей среды и температура оболочки. В (4) и (5) $T_{Surr}(x, t)$ и $T_{Shell}(x, t)$ измеримы, в то время как $T_B(x, t)$ наблюдается в нескольких точках с использованием тепловых зондов. Как и прежде, параметры модели пространственно-распределены и изменяются во времени. Краткое описание параметров модели в (1) – (5) приведено в таблице 1.

Рис. 3. Горизонтальное и поперечное сечение печи обжига клинкера

Таблица 1 – Описание параметров модели

Параметр	Описание	Параметр	Описание
$f_{0,1}(x, t)$	Теплообмен огнеупорного слоя и клинкера	$f_{1,6}(x, t)$	Сгорание топлива в печи
$f_{0,2}(x, t)$	Теплообмен огнеупорного слоя и газа	$f_{2,1}(x, t)$	Диффузия газа в твердой фазе
$f_{0,3}(x, t)$	Теплообмен огнеупорного слоя и топлива	$f_{2,2}(x, t)$	Перемещение клинкера вдоль печи
$f_{0,4}(x, t)$	Теплообмен окружающей среды и топлива	$f_{2,3}(x, t)$	Физико-химические реакции
$f_{1,1}(x, t)$	Диффузия материалов в газовой фазе	$f_{2,4}(x, t)$	Теплообмен клинкера и газа
$f_{1,2}(x, t)$	Перемещение газа вдоль печи	$f_{2,5}(x, t)$	Теплообмен огнеупорного слоя и клинкера
$f_{1,3}(x, t)$	Физико-химические реакции	$f_{3,1}(x, t)$	Перемещение материала вдоль печи
$f_{1,4}(x, t)$	Теплообмен клинкера и CO ₂	$f_{3,2}(x, t)$	Диффузия массы клинкера в газовой фазе
$f_{1,5}(x, t)$	Теплообмен CO ₂ и огнеупорного слоя	$f_{3,3}(x, t)$	Диффузия массы газа в твердой фазе

Система уравнений (1) – (5) представляет собой модель печи обжига [5]. В отличие от существующих математических моделей, в которых добавление какой-либо переменной усложняет структуру модели и увеличивает время обработки, в предложенной модели легко можно учесть:

1. Изменение диаметров частиц сырья на входе в печь.
2. Наличие цепей, решеток и подъемников для улучшения смешивания материалов слоя и теплообмена между газом и материалами слоя [7].
3. Диффузия частиц материалов в газе.

4. Наличие высокой концентрации воды в сырье во влажных процессах.

5. Сжигание отходов.

Поскольку печь обжига – это процесс с сильно изменяющейся во времени динамикой, параметры модели должны быть откалиброваны и перенастроены во время работы печи для получения точных результатов моделирования. Поэтому наличие системы сбора данных для проведения необходимых полевых измерений и передачи их на уровень математической модели для идентификации параметров является обязательным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Улавливание и хранение двуокиси углерода. Резюме для лиц, определяющих политику. Доклад рабочей группы III МГЭИК. Техническое резюме. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
2. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы: учебное пособие / В. А. Павловский, Д. В. Никущенко. Санкт-Петербург: Лань, 2018. 368 с.
3. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология. Кн. 1: Справ. изд. В 2 кн. / В. Лисиенко, Я. Щелоков, М. Ладыгичев; под ред. В. Г. Лисиенко. М.: Теплотехник, 2010. 687 с.
4. Моделирование систем: учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. Москва: Высш. шк., 2001. 343 с.

5. Лочер Г. Математические модели для процесса обжига цементного клинкера, часть 1: Реакции и единичные операции // ZKG INTERNATIONAL. 55 (2002). № 1. С. 29-38.
6. Гольцова О. Б., Клековкин В. С. и др. Теплотери туннельной печи для обжига кирпича // Стекло и керамика. 2006. № 4. С. 24-25.
7. Борисов И. Н. Пути повышения эффективности работы цепных завес вращающихся печей [Текст] // Цемент и его применение. 2003. № 3. С. 17-20.
8. Магергут В. З. Повышение эффективности работы вращающейся печи с применением комбинированных методов // Сб. трудов XXIII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». 2010. С. 41-45.

MODELING A CLINKER FURNACE MONITORING SYSTEM

© V. V. Shukhin, M. S. Nasukhanov, M. S. Baraev

GSTOU named after acad. M. D. Millionshchikova, Grozny, Russia

Rotary kilns are used to convert calcined raw materials into cement clinker. This article discusses a control and management system for a clinker rotary kiln through a 3D model to simulate key processes occurring in the solid bed of clinker kilns. This system is based on a mathematical model consisting of five operating levels: three layers for monitoring the state of the furnace and two for its control system. The change in the layer height and the formation of melt in the hot zone inside the furnace were taken into account. The energy balance (including conductive, convective and radiative heat transfer) was determined on the basis of a quasi-stationary approximation. Numerical experiments were carried out to investigate the influence of the main operating and design parameters on the energy consumption of the furnace. The model can be used to monitor the temperature profile inside the kiln to reduce energy consumption per tonne of clinker. The model and results discussed in this article provide tuning of the clinker kiln control system.

Keywords: clinker kiln, monitoring, instrumentation, forecasting, diagnostics, optimal control based on a mathematical model.

REFERENCES

1. Ulavlivanie i khranenie dvoukisi ughleroda. Rezyume dlya lits, opredelyayushchikh politiku. Doklad rabochei grupy III MGEIK i Tekhnicheskoe rezyume. [Capture and storage of carbon dioxide. Summary for policy makers. IPCC Working Group III Report and Technical summary], available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
2. Pavlovsky, V.A. Nikushchenko, D. V. (2018) Vychislitel'naya gidrodinamika. Teoreticheskie osnovy: uchebnoe posobie [Computational Fluid Dynamics. Theoretical foundations: tutorial]. Lan, St. Petersburg, 368 p.
3. Lisienko, V.G. Shchelokov Y., and Ladyigichev M., in Lisienko V.G. (ed). (2010) Vrashchayushchiesya pechi: teplotekhnika, upravlenie i ekologiya Kn. 1: Sprav. izd.: V 2 kn [Rotary kilns: heat engineering, management and ecology]. Book. 1: Ref. ed.: in 2 books, Teplotekhnika, Moscow, 687 p.
4. Sovetov, B. Ya. And Yakovlev, S. A. (2001) Modelirovanie sistem: ucheb. dlya vuzov [Modeling of systems: textbook. for universities]. Vyssh. shk., Moscow: 343 p.

5. Locher, G. (2002) *Matematicheskie modeli dlya protsessa obzhiga tsementnogo klinkera, chast' 1: Reaktsii i edinichnye operatsii*. [Mathematical models for the cement clinker burning process, part 1: Reactions and unit operations]. ZKG INTERNATIONAL 55 (2002) No. 1, pp. 29-38.
6. Goltsova, O. B. and Klekovkin, B. C. (2006) and others. 'Teplopoteri tunnel'noi pechi dlya obzhiga kirpicha'. *Steklo i keramika*. [Heat loss of a tunnel kiln for firing bricks. Glass and ceramics]. № 4. Pp. 24-25.
7. Borisov, I. N. (2003) 'Puti povysheniya effektivnosti raboty tsepnykh zaves vrashchayushchikhsya pechei'. *Tsement i ego primeneniye*. [Ways to improve the efficiency of the chain curtains of rotary kilns. Cement and its application]. No. 3. pp. 17-20.
8. Magergut, V. Z. (2010) 'Povysheniye effektivnosti raboty vrashchayushcheysya pechi s primeneniem kombinirovannykh metodov' *Sb. trudov XXIII Mezhdunarodnoi nauchoi konferentsii «Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh»*. [Increasing the efficiency of a rotary furnace using combined methods. / Proceedings of the XXIII International Scientific Conference "Mathematical Methods in Engineering and Technology"]. pp. 41-45.