



УДК 669.2

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОБЖИГА В ТРУБЧАТЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО СКАНИРОВАНИЯ

Ю.В.ШАРИКОВ¹, Т.О.КОЙРАНЕН²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Россия

² Лаппеенрантский технологический университет, Финляндия

В статье рассмотрена роль футеровки в работе трубчатых вращающихся печей, применяемых для проведения процессов термообработки сырья в металлургической, химической и других отраслях промышленности. Предложена методика выбора новой конструкции теплоизолирующих элементов, обеспечивающих снижение тепловых потерь в окружающую среду, способной более точно выдерживать заданный тепловой режим обработки путем моделирования в программном пакете Ansys Fluent. Предложена система мониторинга состояния футеровки с помощью тепловизора и система управления, обеспечивающая целостность футеровки без остановки печи.

На основании проводимого мониторинга температуры наружной поверхности предложена система управления потоком вводимой пыли, обеспечивающей восстановление необходимой толщины гарнисажа. Это позволяет продлить сроки эксплуатации печи без остановки ее для ремонта футеровки внутренней поверхности и сократить эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: трубчатая вращающаяся печь, футеровка, 3D-моделирование, мониторинг состояния футеровки, управление процессом обжига.

Как цитировать эту статью: Шариков Ю.В. Система управления процессами обжига в трубчатых вращающихся печах с использованием тепловизионного сканирования / Ю.В.Шариков, Т.О.Койранен // Записки Горного института. Т.221. С.681-687. DOI 10.18454/PMI.2016.5.681.

Введение. Футеровка трубчатой вращающейся печи играет важную роль в выполнении основных технологических функций трубчатых вращающихся печей (ТВП) и обеспечении их экономической эффективности. От эффективности и целостности работы футеровки зависит соблюдение выбранного оптимального режима обработки и потери тепловой энергии в окружающую среду. Как показывает опыт эксплуатации ТВП, через наружную поверхность в окружающую среду теряется до 10 % потребляемой энергии [6]. Футеровка предохраняет металлоконструкции печи и обслуживающий персонал от воздействия высоких температур и печной среды. Она обеспечивает необходимую плотность газа в рабочей камере печи, т. е. полную герметизацию для поддержания давлений, необходимых для технологического процесса.

Футеровка – это один из основных конструктивных элементов печей, с помощью которого можно осуществлять высокотемпературные термотехнологические и теплофизические процессы в печной среде при наличии механических нагрузок с сохранением в течение длительного времени геометрической формы внутреннего печного пространства, его механической и строительной прочности. Она находится в тесной взаимосвязи с шихтой, получаемыми продуктами и печной средой [6].

Отсутствие теплоизоляционных материалов, обладающих достаточно низкой теплопроводностью и высокой механической прочностью, заставляет искать новые конструкции теплоизоляционных элементов, которые бы обеспечили минимальные тепловые потери в окружающую среду [1, 8]. Кроме того, для устойчивой работы печей в процессе эксплуатации необходимо создать систему управления, которая бы позволила контролировать состояние футеровки в процессе ее эксплуатации и поддерживать ее теплоизоляционные свойства. Таким образом, создание новых конструкций теплоизоляционных элементов совместно с системой контроля и управления является крайне актуальной задачей для успешной эксплуатации широкого круга промышленных процессов в ТВП [9, 10].

В глиноземном производстве ТВП применяют для спекания бокситов, нефелинов и кальцинации (разложения) гидроксида алюминия. Рассмотрим процесс спекания бокситов во вращающихся печах. Как показал выполненный нами ранее анализ процессов, протекающих в ТВП с использованием экспериментальных данных по кинетике тепловыделения в калориметре теплового потока [12] и создания одномерной математической модели ТВП [13], в зависимости от температуры горячих топочных газов, нагревающих шихту, и изменений, происходящих в шихте, печь можно условно разделить на четыре зоны.

Первая зона – сушки и обезвоживания – находится в верхней (холодной) части, температура топочных газов 200-1250 °С, шихты – от 20 до 700 °С. Здесь удаляется вся влага.

Вторая зона – кальцинации – имеет температуру газов от 1250 до 1400 °С и шихты – от 700 до 1000 °С. В этой зоне происходит полное разложение известняка шихты.



Третья зона – спекания – имеет наивысшую температуру газов 1600-1650 °С и шихты 1200-1250 °С. Здесь завершается разложение соды и образование спека. Эта зона находится в пределах длины факела горения топлива.

Четвертая зона – охлаждения – расположена в самой нижней части печного барабана, за огневым факелом. Здесь температура газов несколько снижается – от 1550 до 1500 °С. Поступая в холодильник, спек охлаждается до 60-70 °С.

Процесс спекания характеризуется температурой отходящих газов и их составом, движением материалов в печи и внешним видом спека. При нормальном протекании процесса температура отходящих газов в отходящем газоходе печи составляет 180-200 °С, что обеспечивает стабильную работу электрофильтров и вентиляторов. Нормальный спек представляет собой материал темно-серого цвета с размерами кусков 40-50 мм. В отходящих газах не должно быть больше 0,4-0,6 % СО и О₂, а содержание СО₂ должно быть в пределах 25-27 % [1, 8].

Во вращающихся печах для кальцинации гидроксида алюминия также наблюдаются температурные (технологические) зоны, соответствующие определенным стадиям превращения исходного гидроксида. Анализ изменения температуры газового потока и материала по длине печи позволяет выделить четыре зоны

Зона сушки – верхняя наиболее холодная часть печи, где температура газов изменяется от 300 до 600 °С, а гидроксида – от 40 до 200 °С. Здесь происходит полное испарение гигроскопической влаги гидроксида.

Зона кальцинации – средняя часть печи. В этой зоне газы нагреты до температур 600-1050 °С, а гидроксид – до 200-950 °С. При этом происходит удаление химически связанной влаги и гидроксид превращается в безводный гамма-глинозем.

Зона прокалики находится в области факела горения топлива и здесь происходит перекристаллизация гамма-глинозема и альфа-глинозема. Температура газов составляет 1050-1400 °С, а глинозема 950-1250 °С. Иногда диаметр печного барабана в этой зоне делают несколько большего размера, чем диаметр барабана в других зонах. Этим достигается снижение скорости перемещения материала и увеличение продолжительности пребывания его в этой зоне.

Зона охлаждения – нижняя часть печи, где температура глинозема снижается с 1250 до 1000 °С. Из этой зоны глинозем поступает в холодильник.

При достаточной полноте сгорания топлива и отсутствии подсосов воздуха в отходящих газах должно быть 13-15 % СО₂ и не более 0,8 % СО. Прокаленный глинозем должен содержать определенное количество альфа-глинозема.

Математическое моделирование температурных полей во фрагменте футеровки трубчатой вращающейся печи. Одним из главных факторов, определяющих тепловую эффективность печи, является величина термического сопротивления футеровки, так как в трубчатой печи через футеровку потери тепла достигают 10-15 % от всей потребляемой энергии [1, 8].

Отсутствие прочного термостойкого материала с хорошими теплоизоляционными свойствами в значительной мере определяло направление работ по созданию футеровки с повышенным тепловым сопротивлением путем введения в нее дополнительного волокнистого теплоизоляционного материала, что достигается за счет изменения формы огнеупора. Теплоизолятором может быть волокнистая структура, такая как муллит-кремнеземистая вата с неорганическими добавками, базальтовое волокно и подобные структуры, которые можно использовать при температуре до 1600 °С. В этом случае между огнеупором и корпусом печи образуется ячейка, заполненная теплоизоляционным материалом [9, 10].

Наибольшего уменьшения тепловых потерь печи в окружающую среду и массы футеровки можно достичь за счет установки фасонных огнеупоров в высокотемпературной зоне печи, чем также обеспечивается большая передача тепла обрабатываемому материалу и уменьшение массы теплового аппарата [9, 10]. На рис.1 показано конструктивное решение, где огнеупорный кирпич опирается на корпус с помощью ножки, образованной за счет ячеек. При механических и тепловых нагрузках, которые возникают во время работы, приведенная форма дает возможность лучше сохранить механическую стойкость огнеупорного кирпича и обеспечить высокую тепловую эффективность.

Целью этой части исследования является изучение возможностей установки футеровки с фасонным огнеупором различной конфигурации с учетом теплоизолирующих свойств и конструктивной надежности, обусловленной возникшими в огнеупоре термомеханическими напряжениями.

Задача проведения исследований связана с необходимостью разработки методики расчета температурных полей в теле огнеупора. Данные о температурном поле в кладке печи были получены на основе математического моделирования.

Для оценки тепловых полей применим уравнение теплопроводности в декартовой системе координат:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{C\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{C\rho}, \quad (1)$$

где t – температура системы, К; τ – время нагрева футеровки, с; λ – коэффициент теплопроводности материала футеровки, Вт/(м·К); ρ – плотность материала футеровки, кг/м³; C – теплоемкость материала футеровки, Дж/(кг·К);

$\frac{q_v}{C\rho}$ – член уравнения, учитывающий внут-

ренние источники тепловой энергии.

Начальные и граничные условия при решении дифференциального уравнения принимаем для высокотемпературной зоны спекания трубчатой печи [12, 13]:

- температура на внутренней поверхности и вращающейся печи $t_{\text{вн}} = 1873$ К;
- температура воздуха окружающей среды $t_{\text{возд}} = 300$ К;

- коэффициент теплопроводности шамотных огнеупоров определяется как функция температуры

$\lambda_{\text{шам}} = (0,72 + 0,0005t)1,16$, где t – температура шамотного огнеупора, °С;

- коэффициент теплопроводности базальтового волокна $\lambda_{\text{баз}} = 0,06$ Вт/(м·К);

- плотность шамота $\rho_{\text{шам}} = 1800$ кг/м³;

- плотность базальтового волокна $\rho_{\text{баз}} = 200$ кг/м³;

- коэффициент конвективной теплоотдачи на наружной поверхности печи $\alpha = 30$ Вт/(м²·К) [5, 6].

Толщину футеровки принимаем в соответствии с технологическими требованиями работы вращающихся печей [1].

Решение дифференциального уравнения производилось средствами программного пакета ANSYS 14.0 с помощью метода конечных элементов. В качестве генератора создания сетки из конечных элементов применялся пакет ICEMCFD 14.0. Полученные сетки из конечных элементов представлены на рис.2. Количество элементов сетки выбиралось в соответствии с вычислительными требованиями для решения уравнения теплопроводности [9].

На основе уравнения (1) получены температурные поля в футеровке из шамотного огнеупора и новой конструкции футеровки (рис.3).

В стандартной и новой конструкции футеровки вращающейся печи соответственно плотность теплового потока через наружную поверхность, $q_1 = 6427$ Вт/м² и

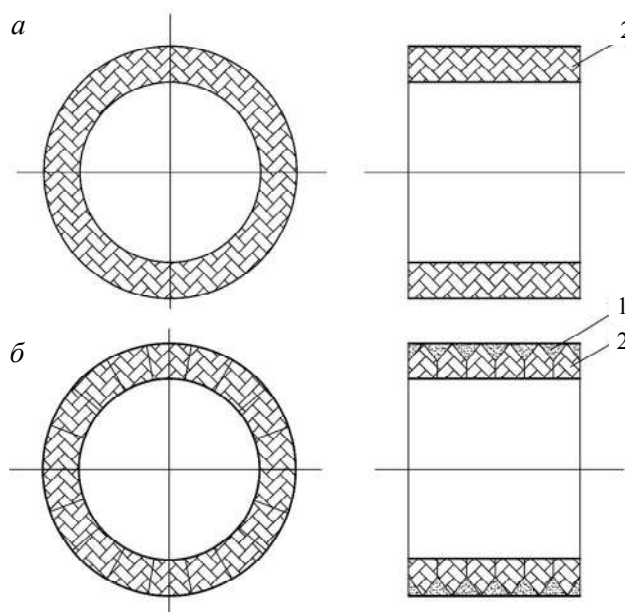


Рис.1. Конструкции футеровки вращающейся печи с использованием шамота (а); с использованием шамота и волокнистой структуры (б)

1 – волокнистая структура; 2 – шамотная футеровка

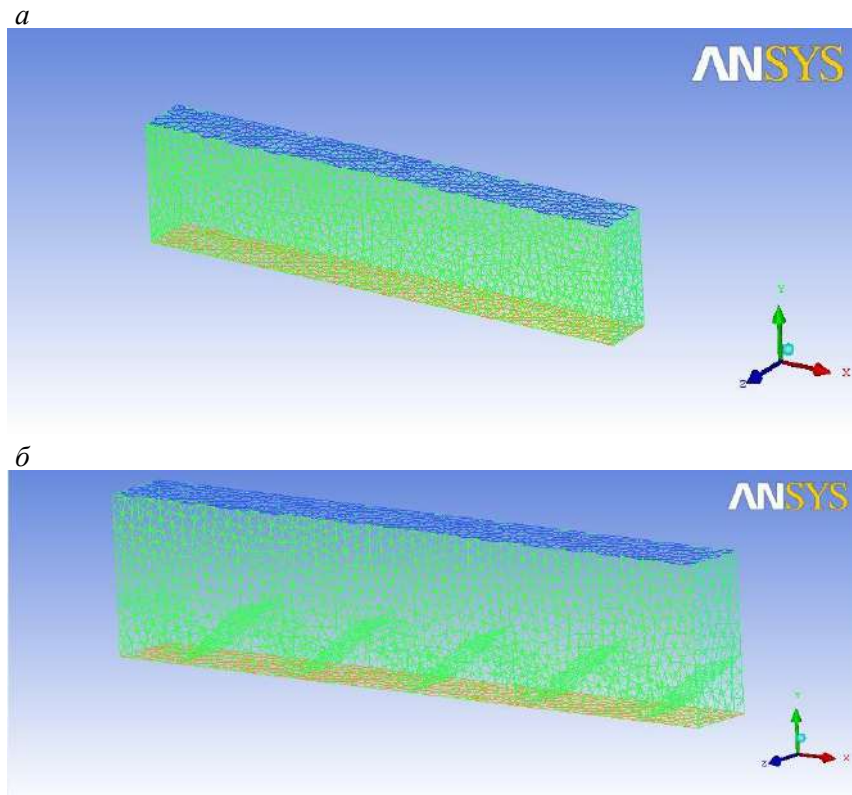
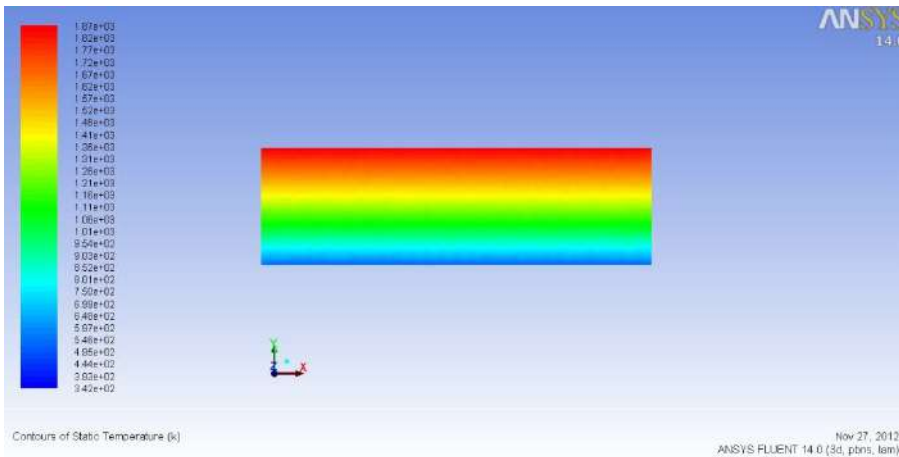


Рис.2. Сетка конечных элементов для стандартной (а) и новой (б) конструкции футеровки:

а – количество элементов 46672, количество узлов 8153; б – количество элементов 47693, количество узлов 8124. Средний размер элементов 0,02 м

а



б

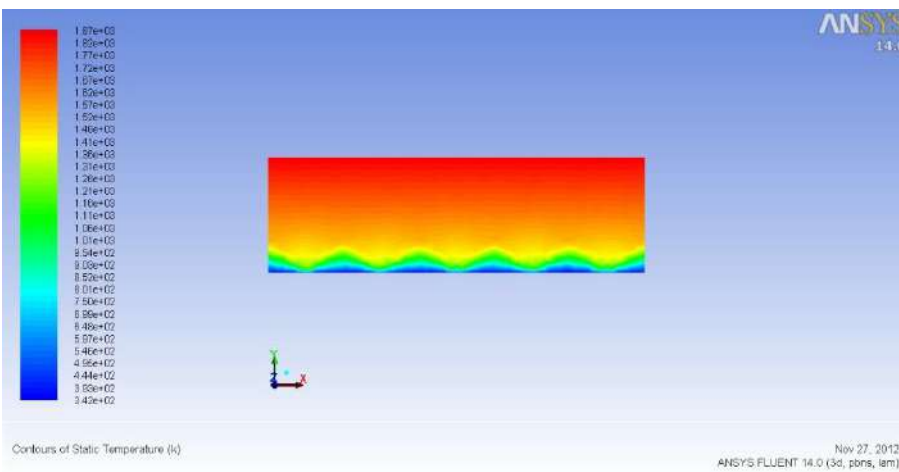


Рис.3. Температурное поле в стандартной (а) и новой (б) конструкции футеровки вращающейся печи

$q_2 = 2671 \text{ Вт/м}^2$; среднее значение температуры на наружной поверхности $T_{\text{нар}_1} = 514 \text{ К}$ и $T_{\text{нар}_2} = 389 \text{ К}$.

На основании полученных термограмм можно сделать выводы о новой конструкции футеровки:

1. За счет прослойки из базальтового волокна на внешней границе шамотной футеровки было достигнуто снижение температуры на $125 \text{ }^\circ\text{К}$.

2. Плотность теплового потока через новую конструкцию футеровки в 2,4 раза меньше, чем у стандартной шамотной.

3. Применение новой конструкции футеровки в глиноземном и цементном производствах позволит понизить долю тепловых потерь пропорционально уменьшению теплового потока.

Для проверки адекватности модели проводились исследования на ОАО «Базел-Цемент». Тепловизор модели OptrisPI-230 был использован для проведения съемки температурного поля поверхности футеровки вращающейся трубчатой печи. Результаты представлены на рис.4.

Из представленной термограммы видно, что температуры на поверхности вращающейся печи совпадают с температурой на поверхности футеровки, рассчитанной с помощью модели в среде Ansys Fluent. Результаты подтверждают адекватность модели.

Разработанная математическая модель футеровки вращающейся трубчатой печи позволяет оценить температурное поле внутри футеровки и на ее внешней поверхности и использовать его для построения системы управления процессом обжига с учетом состояния футеровки.

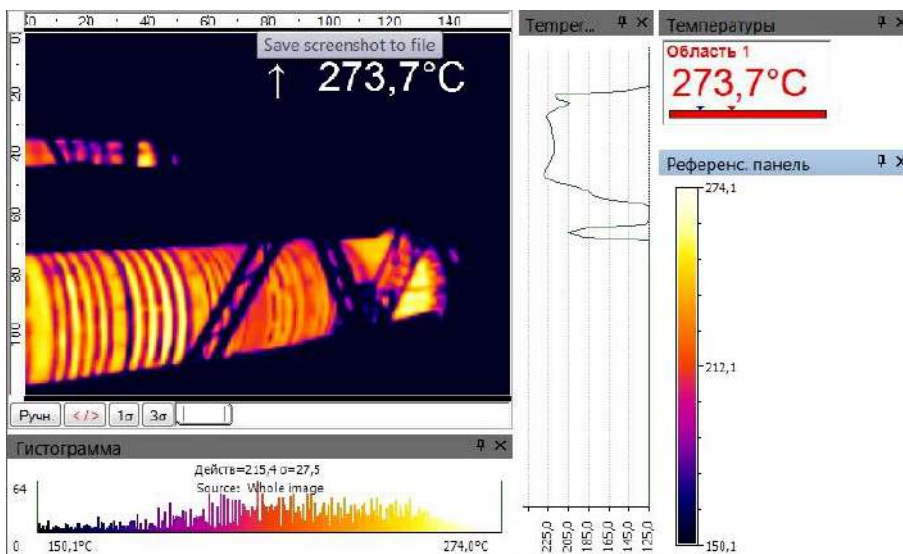


Рис.4. Температурное поле на поверхности футеровки вращающейся печи



Футеровка печи является неотделимым составным элементом химико-термической печной системы «материал – среда – футеровка». Поэтому ее работа должна рассматриваться только совместно с остальными элементами печной системы. Во вращающейся печи футеровка покрыта слоем гарнисажа, который обеспечивает ее защиту от теплового излучения и движущейся шихты. Для поддержания заданной толщины гарнисажа используются данные о температуре на поверхности вращающейся печи. Если температура поверхности превышает значение, установленное технологическими требованиями, это свидетельствует об уменьшении толщины гарнисажа, оголении футеровки и необходимости изменения теплового режима внутри печи [9].

Гарнисаж во вращающейся печи образуется за счет налипания движущейся шихты в печном пространстве. Обычно при температуре менее 1600 °С на поверхности гарнисажа образуется устойчивый к термомеханическому разрушению слой.

При повышении температуры выше 1600 °С понижается вязкость гарнисажа, что приводит к образованию скола и оголению футеровки [9]. Изменение толщины и оголение футеровки показано на рис.5. Повышение температуры приводит к образованию вязкой структуры, уменьшению сил сцепления гарнисажа и футеровки. В дальнейшем в этой зоне может наблюдаться прогар кладки печи, что может привести к нарушению технологического режима и остановке печи для ремонта.

В настоящее время контроль зон перегрева вращающихся печей осуществляется вручную, пирометром через установленные интервалы времени [1]. Недостаток данного метода заключается в невозможности точной оценки состояния температуры футеровки печи, что может привести к невозможности обнаружения зон перегрева и разрушению футеровки.

Целью данной части работы является разработка такой системы контроля футеровки, которая бы позволяла непрерывно отслеживать образование зон с повышенной температурой и при этом сигнализировала бы оператору об их возникновении в реальном времени. Принцип работы системы основан на использовании технического зрения. Датчиком, измеряющим тепловое поле на поверхности печи, служит тепловизор передающий видеосигнал в блок автоматизированной системы управления (АСУ), который анализирует и находит зоны перегрева кладки печи. Общая схема данной системы представлена на рис.6.

Схема контроля состояния футеровки вращающейся печи включает инфракрасные датчики, которые расположены вдоль длины печи в наиболее горячих зонах. Эти датчики представляют собой тепловизоры, которые измеряют пространственное двумерное температурное поле на поверхности футеровки печи. Цифровой сигнал от них передается в блок системы управления, который анализирует тепловую нагрузку на футеровку. Далее сигнал поступает оператору, управляющему

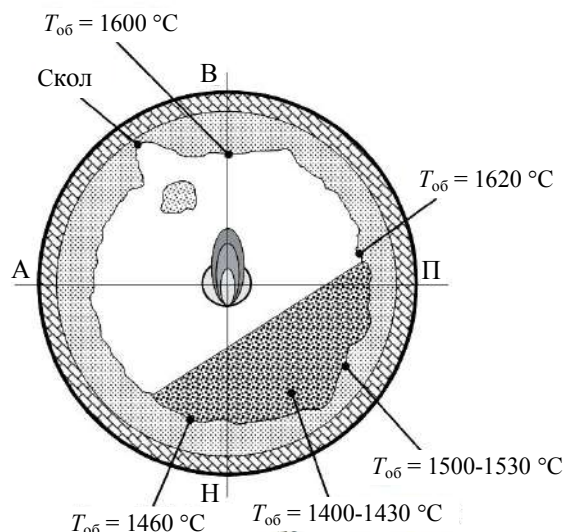


Рис.5. Образование скола гарнисажа во вращающейся печи

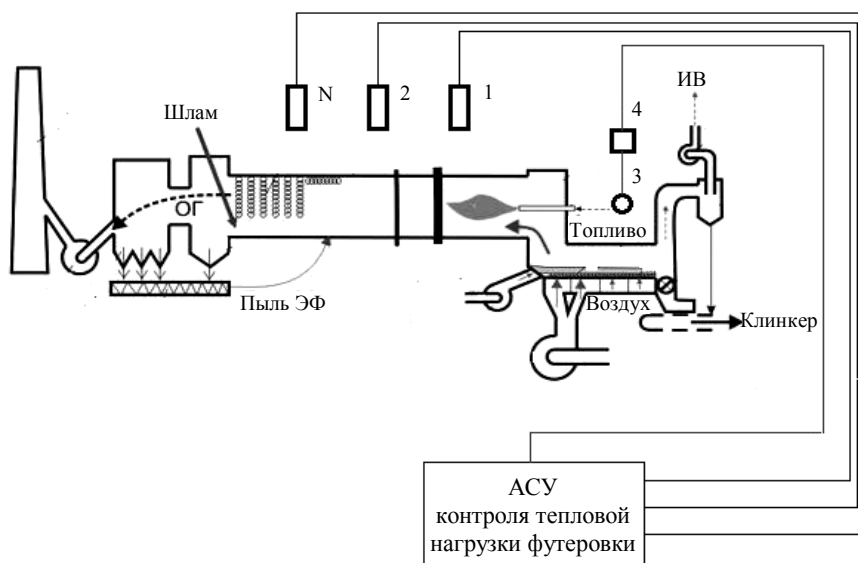


Рис.6. Схема контроля состояния футеровки вращающейся печи
1, 2, N – инфракрасные датчики; 3 – исполнительный механизм; 4 – контроллер

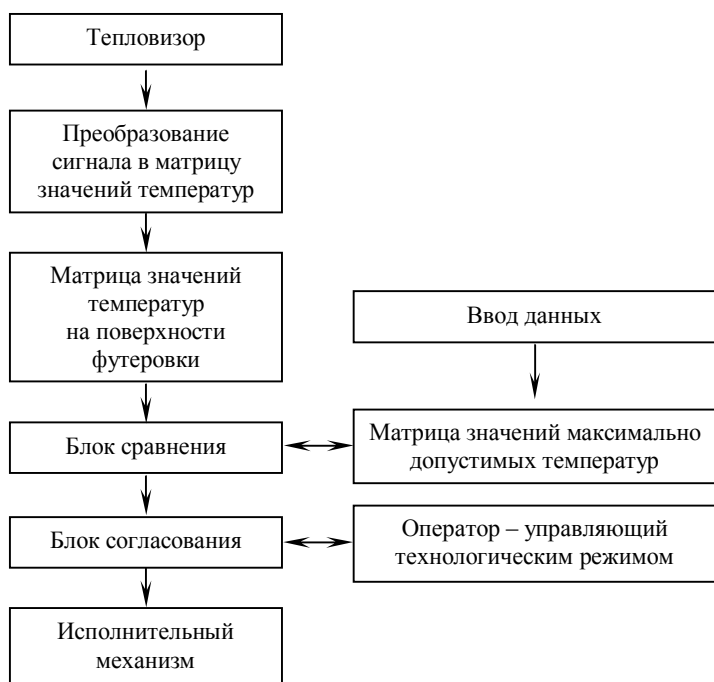


Рис.7. Схема АСУ контроля тепловой нагрузки футеровки

технологическим режимом, чтобы он мог принять решение об изменении радиационного режима внутри печного пространства, тем самым снизив перегрев.

Общая схема блока регулирования АСУ контроля тепловой нагрузки футеровки представлена на рис.7.

Рассмотрим составные компоненты представленной выше схемы АСУ контроля тепловой нагрузки футеровки.

Тепловизор выполняет функцию датчика пространственного температурного поля поверхности вращающейся печи.

Видеосигнал от тепловизора преобразовывается в матрицу T_m , характеризующую тепловое поле на поверхности футеровки в момент времени τ_m . Данную матрицу можно представить в виде

$$T_m = \begin{bmatrix} t_{1,1} & \dots & t_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ t_{m,1} & \dots & t_{m,n} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где элементы матрицы $T_{m,n}$ – это значения температур на поверхности печи. Каждый из элементов матрицы соответствует отдельной группе пикселей изображения, получаемого от тепловизора.

Далее сигнал поступает в блок сравнения, где происходит сравнение значений матрицы T_m с заданной матрицей T_{const} , которая имеет вид

$$T_m = \begin{bmatrix} t_{1,1} & \dots & t_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ t_{m,1} & \dots & t_{m,n} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где элементы матрицы $T_{m,n}^{const}$ – это максимально допустимые значения температур на поверхности печи.

Если пять элементов из одного вертикального столбца матрицы $T_{m,n}$ превышают значение соответствующих элементов матрицы $T_{m,n}^{const}$, это сигнализирует о возникновении зоны перегрева в футеровке вращающейся печи [2, 3].

При выполнении этого условия оператор получает оповещение о появлении зоны локального перегрева. Он может принять решение об изменении радиационного режима внутри печи или оставить его прежним, в зависимости от требований технологического режима [4, 11]

Далее сигнал поступает в контроллерный блок, который активирует исполнительный механизм, управляющий горелочным устройством. При этом изменяется положение факела и меняется тепловой режим внутри печного пространства.

Использование данной системы контроля температуры футеровки вращающейся печи позволит в режиме реального времени получать информацию о наличии зон перегрева и быстро принимать решение о снижении тепловой нагрузки на эти зоны, тем самым продлив срок службы футеровки и сократив время на ремонт печи.

Выводы

1. Проведен анализ процессов распространения тепла в футеровке ТВП при одновременном протекании технологического процесса обработки шихты во внутренней части печи.
2. Разработана математическая модель процесса и предложена конструкция теплоизолирующих элементов, обеспечивающих снижение тепловых потоков в окружающую среду.



3. Предложенная конструкция позволяет снизить тепловые потери и понизить температуру наружной поверхности печи.

4. Предложена система сканирования наружной температуры поверхности вращающейся печи. Система позволяет определять с помощью математической модели точки разрушения внутреннего защитного слоя и направлять в эти места поток пыли, восстанавливающий защитный слой гарнисажа без остановки работы печи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воскобойников В.Г. Общая металлургия / В.Г.Воскобойников, В.А.Кудрин, А.М.Якушев. М.: Металлургия, 2005. 768 с.
2. Визильтер Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
3. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MatLAB / Р.Гонсалес, Р.Вудс, С.Эдинс. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
4. Екимов В.А. Исследование степени равномерности температуры материала на открытой поверхности слоя во вращающейся печи / В.А.Екимов, Е.И.Ходоров // Производство глинозема: Труды ВАМИ. Л., 1974. Вып.88. С. 58-71.
5. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Госэнергоиздат, 1990. 367 с.
6. Кривандин В.А. Теплотехника металлургического производства / А.В.Кривандин, В.А.Арутюнов, В.В.Белоусов. М.: Изд-во МИСиС, 2002. Т.1. 608 с.
7. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А.Михеев, И.М.Михеева. М.: Энергия, 1973. 319 с.
8. Теплоизоляция. Материалы. Конструкции. Технологии / Под ред. С.М.Кочергина. М.: Стройинформ, 2008. 440 с.
9. Шариков Ю.В. Математическое моделирование теплопередачи через футеровку вращающейся трубчатой печи / Ю.В.Шариков, А.А.Маркус // Металлург. 2013. № 12. С.50-54.
10. Шариков Ю.В. Математическое моделирование теплопередачи тел трубчатой структуры применительно к трубопроводам металлургических агрегатов / Ю.В.Шариков, А.А.Маркус // Записки Горного института. 2013. Т.202. С.235-238.
11. Ходоров Е.И. Печи цементной промышленности. М.: Металлургия, 1968. 365 с.
12. Sharikov Yu. Optimization of process conditions in a tubular rotary kiln with applying TG/DSC technique and mathematical modeling / Yu.Sharikov, F.Sharikov, O.Titov // J Therm Anal Calorim. 2015. Vol.122. P.1029-1040.
13. Sharikov Yu. Mathematical modeling of processes in the tubular rotary kiln, LAMBERT / Yu.Sharikov, F.Sharikov, O.Titov. Deutschland: Academic Publishing, 2013. 102 p.

Авторы: Ю.В.Шариков, *д-р техн. наук, профессор, yvshar@mail.ru* (Санкт-Петербургский горный университет, Россия), Т.О.Койранен, *д-р техн. наук, профессор, tuomas.koiranen@lut.fi* (Ланпееврантский технологический университет, Финляндия).

Статья принята к публикации 25.04.2016.