

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФАСОННОГО ОГНЕУПОРА

RESEARCH OF THE ROTATION FURNACE STRAINED STATE WITH FASHIONED REFRACTORY USAGE

В.Ю. Щербина

Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина

А.С. Сахаров

Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина

Ю.Н. Самиленко

Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина

Abstract

The questions related to mathematical modeling of the rotary kiln with the use of lining refractories with configuration changes to increase the thermal resistance and reduce heat loss into the environment.

Keywords: rotary kiln, the thermal resistance, the stress-strain state.

ВВЕДЕНИЕ

Трубчатые печи широко применяются на предприятиях нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и газовой промышленности, где они используются для нагрева, испарения и разложения нефти и продуктов ее переработки, а также для химического превращения ряда нефтепродуктов в процессах термического крекинга, пиролиза, в которых печь выполняет технологические функции теплового аппарата.

Однако наиболее широко они распространены в промышленности строительных материалов, где являются основными установками для производства цементного клинкера, керамзита, извести, перлита и других материалов.

Несмотря на то, что расчетом и проектированием вращающихся печей специалисты занимаются уже более 100 лет их нельзя считать идеальным тепловым аппаратом. В используемых вращающихся печах потери тепла через корпус в окружающую среду весьма значительны и достигают 20-25% от общей теплоты сжигания. При этом одним из основных факторов, определяющих тепловую эффективность работы вращающейся печи, является величина теплового сопротивления футеровки [1].

Постановка задачи исследования

Отсутствие прочного термостойкого материала с хорошими теплоизоляционными

свойствами в значительной мере определяло направление работ по созданию футеровки с повышенным тепловым сопротивлением путем изменения формы огнеупора и введением в образовавшуюся ячейку дополнительного волокнистого теплоизоляционного материала [2, 3].

В данной работе была исследована вращающаяся печь 4,5х80м Криворожского цементного завода с вварным бандажом, конструктивные элементы которой, приведенные на рис. 1.

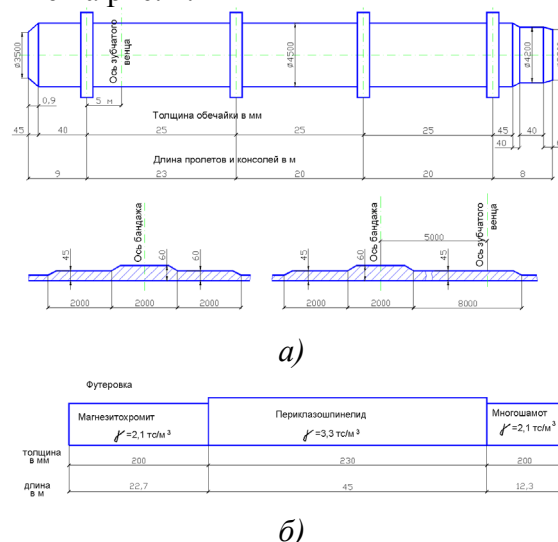


Рис. 1. Конструктивные элементы печи.

а) схема корпуса печи;

б) схемы размещения футеровки.

Уменьшение тепловых потерь печи в окружающую среду и массы футеровки дос-

тигается за счет установки фасонных огнеупоров в высокотемпературной зоне печи, чем также обеспечивается большая передача тепла обрабатываемому материалу и уменьшение массы теплового аппарата [2]. Для этого в огнеупорном кирпиче, со стороны корпуса, делают ячейки, которые имеют форму трапеции и заполненными теплоизоляционным материалом, например муллитокремнеземистой ватой. При этом величина верхней основы трапеции увеличивается по длине печи в сторону снижения температуры. Форма ячеек приведена на рис. 2 относительно длины печи.

На рис.2 показан огнеупорный кирпич, который 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.

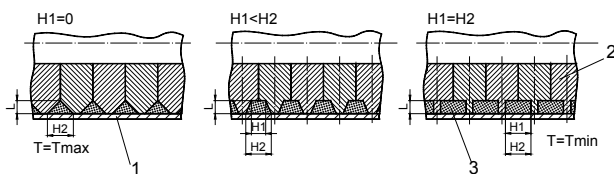


Рис. 2 – Футеровка печи с фасонным огнеупором. 1 – корпус печи; 2 – огнеупор; 3 – ячейка с дополнительной теплоизоляцией; L – высота ячейки (60мм); $H1$ – ширина верхней основы ячейки (0... $H2$ мм); $H2$ – ширина нижней основы ячейки (120 мм).

В ножке огнеупора с ячейками, за счет увеличения градиента температур, увеличиваются температурные нагрузки. Поэтому длина верхней основы трапеции $H1$ изменяется по длине печи для исключения возможностей возникновения критических температурных нагрузок. В зоне максимальных температур футеровки она минимальная и представляет $H1=0$. При этом ячейка приобретает треугольную форму. В других зонах, при уменьшении температур по длине печи, она увеличивается и в конце печи, где температура газового потока обычно наиболее низкая принимает прямоугольную форму $H1=H2$. В этом случае тепловая эффективность футеровки увеличивается, а увеличение термических напря-

жений не является критическим и не приводит к разрушению огнеупора.

При решении задачи необходимо учитывать, что при работе печи обрабатываемый материал вызывает частичное стирание футеровки и ее толщина может уменьшаться на 60-75%. Поэтому высота ячейки, выполненная в виде трапеции, ограниченная условиями сноса футеровки и равна L .

При работе печи в футеровке возникают значительные механическая и тепловая нагрузки, обусловленные массовыми силами и градиентом температур между внутренней и внешней поверхностями огнеупора футеровки. Такие нагрузки отрицательно влияют на долговечность огнеупора, и вызывают его смещение относительно корпуса и разрушение при продолжительной эксплуатации. Предложенное конструктивное решение оказывает содействие более равномерному распределению нагрузок в футеровке, и улучшает условия работы печи.

Целью данной работы является исследование возможностей установки футеровки с фасонным огнеупором различной конфигурации, с учетом, как тепловой эффективности, так и конструктивной надежности, обусловленной величиной возникающих в огнеупоре термомеханических напряжений.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Для решения задачи по расчету температурных полей и напряженно-деформированного состояния (НДС) в корпусе вращающегося теплового аппарата использовалась интегрированная система VESNA, разработанная на кафедре ХПСМ НТУУ „КПИ” [4]. Указанная система предназначена для моделирования гидродинамических, тепловых процессов и выполнения прочностных расчетов с использованием метода конечных элементов (МКЭ). В системе учитываются процессы линейного и нелинейного деформирования пространственных комбинированных систем, выполненных из изотропных и анизотропных материалов.

С точки зрения строительной механики в расчетном отношении корпус вращающейся печи представляет собой тонкостенную цилиндрическую оболочку, которая уста-

новлена на нескольких опорах. Опорными элементами являются бандажи, установленные в подбандажной обечайке.

Основными нагрузками являются собственный вес корпуса печи, футеровки, бандажей и ведущего зубчатого колеса. Значительно меньшую часть составляет вес обрабатываемого материала, поэтому в расчетах он обычно не учитывается. При определении усилий, которые действуют на печь, влияние ее продольного наклона не учитывалось, так как он незначительный и составляет 3-4%.

Основными нагрузками являются собственный вес корпуса печи, футеровки, бандажей и ведущего зубчатого колеса. В расчетах учитывалось, что печь является не только несущей конструкцией, но и тепловым агрегатом, на прочность которого большое влияние оказывают силы, что возникают под действием неравномерных температурных полей и вызывают соответствующие напряжения.

Футеровка моделируется огнеупорами, уложенными кольцами, и соответствует конфигурации приведенной на рис.2. При решении задачи для футеровки были использованы значения указанные в [5]. Коэффициент теплоотдачи в окружающую среду от корпуса и бандажей определяется по эмпирической зависимости $\alpha_{0.c.} = 3.5 + 0.062t_K$.

Результаты расчета

Решение тепловой задачи. Результаты теплового расчета для внешней поверхности корпуса и внутренней поверхности футеровки при использовании стандартного огнеупора толщиной 230 мм приведены на рис.3.

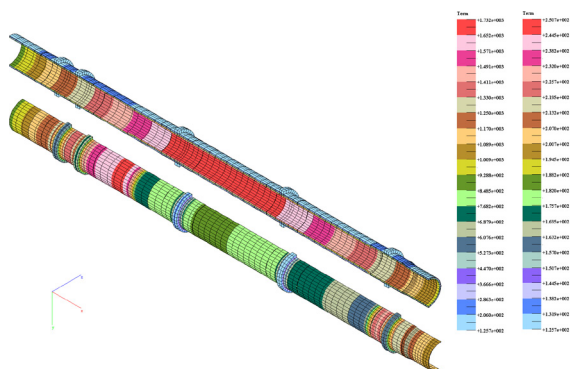


Рис. 3. Температурные поля в корпусе и внутри печи

Из рисунка видно, что температура корпуса печи изменяется от 200⁰С в зонах охлаждения и экзотермических реакций до 270⁰С в зоне спекания. Снижение температуры наблюдается в зоне установки бандажей и венцовой шестерни за счет более интенсивного охлаждения. Значения температур корпуса, по продольному сечению печи, приведено на графике приведенному на рис.4.

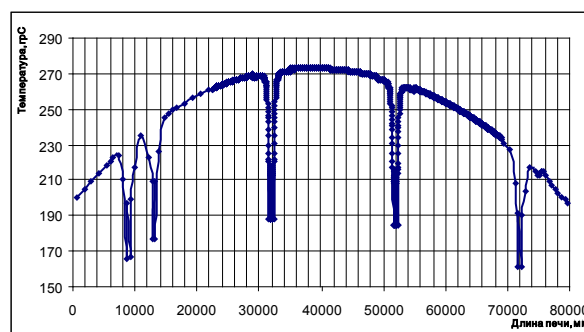


Рис. 4 – Температура корпуса при укладке обычного огнеупора

После установки футеровки в высокотемпературной зоне с дополнительной теплоизоляцией, где уложен фасонный огнеупор, в зоне высоких температур наблюдается уменьшение температуры до 250⁰С. Результаты расчета приведены на рис. 5.

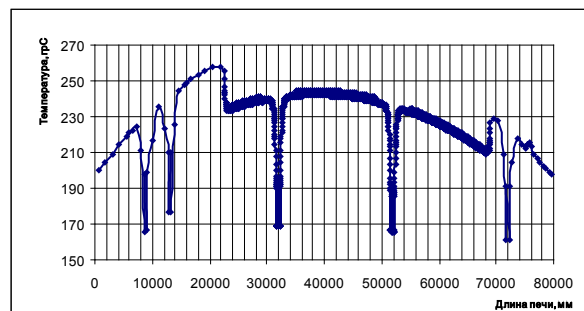


Рис. 5 – Температура корпуса при укладке огнеупора с теплоизоляцией

В процессе работы печи толщина футеровки изменяется с течением времени за счет износа от действия агрессивной среды. В работе моделировалась ситуация при которой огнеупор имеет размер 230 мм – в начале кампании печи, 185 мм – середина кампании, 80 мм – конец кампании. На рис.6. приведены результаты расчета температуры корпуса печи при различных толщинах футеровки и разной конфигурации ячеек N1=0, N1=N2/2, N1=N2 и стандартном огнеупоре (согласно рис. 2).

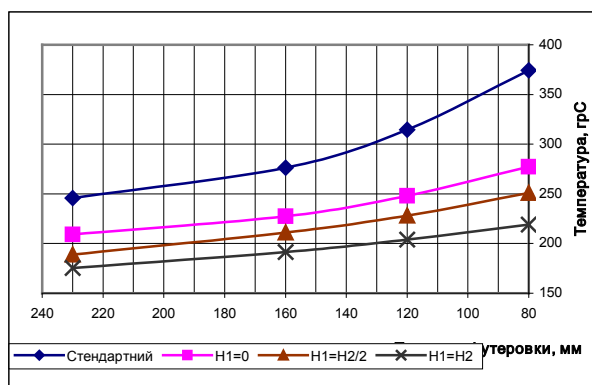


Рис. 6 – Температура корпуса при изменении толщины футеровки

По мере износа огнеупора температура корпуса повышается, так при толщине футеровки 230 мм (начало кампании печи) она составляет 250°C , после износа до 80 мм (конец кампании) повышается до 370°C . При установке футеровки с фасонным огнеупором начальная температура составляет 170°C – 210°C , в зависимости от формы ячейки с теплоизоляцией, а конечная не превышает 270°C . Существенное уменьшение температур объясняется большим влиянием теплоизоляционной ячейки на тепловое сопротивление футеровки печи.

На рис.7 показаны результаты расчета теплового потока от корпуса печи в окружающую среду. Тепловые потери от корпуса печи существенно увеличиваются по мере износа огнеупора. Для обычного огнеупора они изменяются при износе футеровки от 4230Вт/м^2 до 9950Вт/м^2 . При использовании фасонного огнеупора они существенно меньше, особенно в конце кампании печи и составляют для ячеек $H1=0$, $H1=H2/2$, $H1=H2$ 5250Вт/м^2 , 4900Вт/м^2 , 4458Вт/м^2 соответственно.

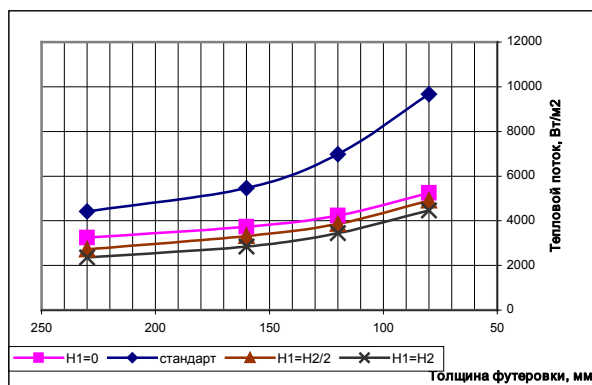


Рис. 7 – Тепловой поток от корпуса в окружающую среду

На рис.8 приведены результаты интегрального расчета эффективности использования футеровки с дополнительной теплоизоляцией за счет уменьшения теплового потока в окружающую среду. Сравнение проводилось с базовой футеровкой стандартной конструкции огнеупора. Как видно из графика установка огнеупоров с теплоизоляцией в зоне максимальных температур позволяет уменьшить тепловой поток в окружающую среду на 30–50%. А в общем по печи до 30%.

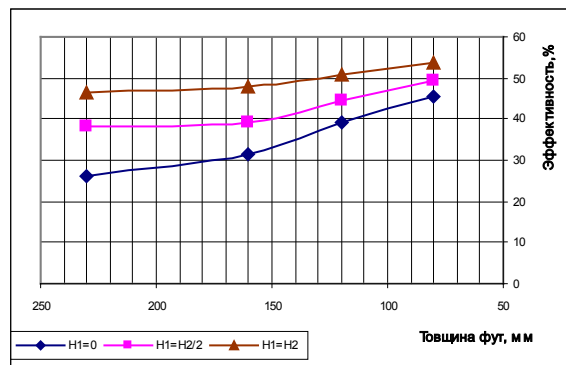


Рис. 8 – Эффективность использования фасонного огнеупора

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о целесообразности применения футеровки с использованием фасонного огнеупора для уменьшения тепловых потерь.

Термомеханические напряжения. После определения распределения температур выполняется прочностной расчет с учетом термосиловых нагрузок, включающих учет температурных напряжений и гравитационных сил. Деформированная модель корпуса печи со стандартной футеровкой толщиной 230 мм представлены Рис.9. Деформации выполнены с коэффициентом масштабирования 2000.

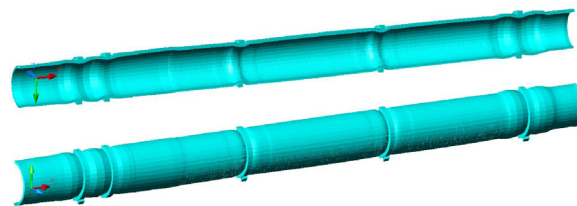


Рис. 9 – Деформация корпуса печи

При анализе напряжений возникающих в корпусе было установлено, что нагрузки от действия массовых и термосиловых нагр-

узок, увеличились по сравнению со стандартным огнеупором. По полученному НДС футеровки, с использованием критерия наибольших линейных деформаций, определялись эквивалентные напряжения. Полученные данные, для высокотемпературной зоны, где установлена футеровка с фасонным огнеупором, приведены на Рис.10.

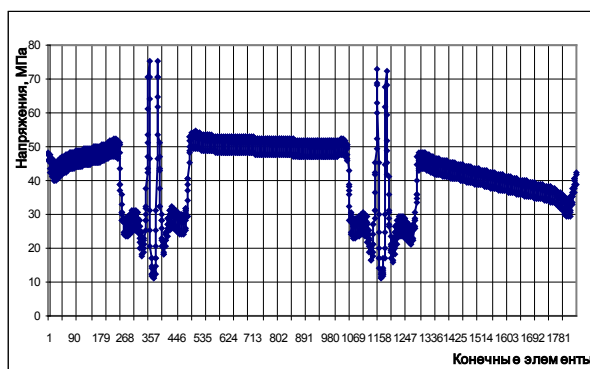


Рис. 10 – Напряжения в корпусе печи в зоне установки футеровки с теплоизоляцией

Максимальное значение возникает в зоне спекания, и составляет 55 МПа, в зоне установки бандажей 73.4 МПа. При обычном огнеупоре в зоне спекания – 30 МПа в области бандажей 69.8 МПа. Характер распределения напряжений свидетельствует о том, что температурные нагрузки значительно больше, чем нагрузки от массовых сил. Пики напряжений наблюдаются в месте установки сварных бандажей, что вызвано большим градиентом температур, за счет более интенсивного охлаждения и повышенной жесткостью конструкции, обеспеченной непосредственно бандажом и подбандажными обечайками. Непостоянство напряжений в корпусе объясняется перепадом температур и соответственно возникающим тепловым градиентом в ячейках с теплоизоляцией.

При использовании теплоизоляционного слоя напряжения в корпусе увеличились, но не превышают допустимых, которые для листа стали толщиной 21..32 мм составляют 75-80 МПа (с учетом температур и цикличности нагружения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика и алгоритмы расчета позволяют определять НДС вращающихся печей с учетом, как массовых сил, так и термосиловых нагрузок в комплексной постановке, что дает возможность подробного моделирования и исследования вращающейся печи в процессе работы.

Разработан огнеупор с повышенным тепловым сопротивлением, предложены формы ячеек с теплоизоляцией и определены зоны его установки. Предложенное конструктивное решение позволяет обеспечить термическую стойкость футеровки, уменьшить массу печи и тепловые потери в окружающую среду на 30%.

Исследовано и проанализировано НДС корпуса вращающейся печи при установке огнеупора с повышенным термосопротивлением. Сделан вывод о работоспособности данной конструкции в действующих тепловых агрегатах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Энциклопедия машиностроения. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Т.IV-12 / М.Б. Генералов, В.П. Александров, В.В. Алексеев и др. Под общ. ред. М.Б. Генералова. – М.: Машиностроение. 2004 – 832с.; ил.
- [2] 张佑林, В.Ю Щербина (谢尔宾纳) 利用辅助绝热材料提高回转窑热效率 (Heat Efficiency Improvement of Rotary Kiln aid by Subsidiary Insulating Material) // Cement Technology(China) –2005. –№4, –p.28-30.
- [3] А.С. SU №1141291, МПК F27B 7/28. Вращающаяся печь. 23.02.85. Бюл. №7 (72) П.А.Староминская, Ю.М.Величко и др.
- [4] О. С. Сахаров, В. Ю. Щербина, О. В. Гондлах, В.І. Сівецький. САПР. Інтегрована система моделювання технологічних процесів і розрахунку обладнання: – К.: ТОВ “Поліграф”, 2006. – 156 с.
- [5] Мурашев В.И. Исследования по жароупорным железобетонным и армокирпичным конструкциям. М.: Госстройиздат, 1959, 343 с., ил