

УДК 66.041.491

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ОГНЕУПОРА НА ТЕПЛОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУТЕРОВКИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

*Розглянуто питання, пов'язані з математичним моделюванням роботи обертової печі при використанні футерівки зі зміненою конфігурацією вогнетриву для збільшення теплового опору та зменшення втрат тепла в навколишнє середовище*

*Ключові слова: піч, що обертається, тепловий опір, напружено-деформований стан*

*Рассмотрены вопросы, связанные с математическим моделированием работы вращающейся печи с использованием футеровки с измененной конфигурацией огнеупора для увеличения теплового сопротивления и уменьшения потерь тепла в окружающую среду*

*Ключевые слова: вращающаяся печь, тепловое сопротивление, напряженно-деформированное состояние*

*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*

*Key words: rotary kiln, the thermal resistance, the stress-strain state*

**А. С. Сахаров**

Доктор технических наук, профессор\*

Контактный тел.: 8 (044) 456-91-40

E-mail: AlexSakharov@gmail.com

**В. Ю. Щербина**

Кандидат технических наук, доцент\*

Контактный тел.: 8 (044) 241-76-88

E-mail: xpsm@ukr.net

**Чжан Юлин (张佑林)**

Профессор

Уханьский технологический университет

ул. Лоши, 122, кв. 82, г. Ухань, провинция Хубей, КНР

Контактный тел.: 8 107 (0086-27) 878-654-41

E-mail: jdxyl@sina.com

**Ю. Н. Самиленко**

Магистр, аспирант\*

Контактный тел.: 8 (044) 454-90-01

E-mail: ecf@kpi.ua

**В. В. Бобах**

Студент\*

\*Кафедра ХПСМ

Национальный технический университет Украины

г. Киев, Украина

Контактный тел.: 8 (044) 236-92-47

## 1. Введение

Вращающиеся тепловые агрегаты барабанного типа – вращающиеся печи, нашли широкое применение во многих областях промышленности, где они используются как основные устройства в процессе обработки сырьевого материала. Многие печи явля-

ются уникальными не только по размерам, но и по сложности конструкции. Кроме того, работа большей части таких аппаратов происходит в условиях высоких температур, давлений, агрессивных сред и повышенной запыленности, что требует специальных мер по повышению их надежности, безопасности и долговечности. Эффективность их применения в значительной

степени зависит от использования эффективных и рациональных конструктивных элементов, которые должны обеспечить долгосрочную и надежную работу печного агрегата.

Вместе с тем, коэффициент использования топлива во вращающихся печах незначительный. Так, например, основная масса цементного клинкера обжигается в печах, тепловой КПД которых не превышает (55-60)%. Поэтому задача по повышению эффективности использования таких агрегатов является весьма актуальной, так как увеличение этих показателей даже на несколько процентов дает существенный экономический эффект [1].

Вопросы о состоянии вращающихся печей и перспективах их развития являются на сегодняшний день важной научной и производственной задачей. Однако их нельзя эффективно решать, не затронув вопрос о состоянии футеровки и методах, направленных на ее усовершенствование.

Для решения этих вопросов ставится задача определения температурных условий, при которых огнеупор работает в высокотемпературной зоне вращающейся печи.

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. Отсутствие прочного термостойкого материала с хорошими теплоизоляционными свойствами в значительной мере определяло направление работ по созданию футеровки с повышенным тепловым сопротивлением путем введения у нее дополнительного волокнистого теплоизоляционного материала, что достигается за счет изменения формы огнеупора (рис. 1) [2]. Например, таким теплоизолятором может быть муллиткремнеземистая вата с неорганическими добавками, которую можно использовать при температуре до 1600°C. В этом случае между огнеупором и корпусом печи образуется ячейка, заполненная теплоизоляционным материалом.

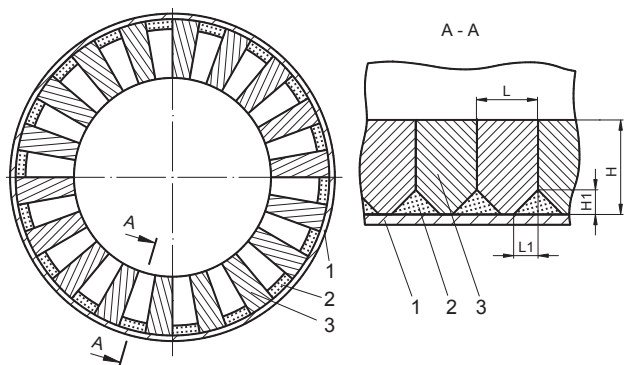


Рис. 1. Футеровка печи с фасонным огнеупором  
 1 – корпус печи; 2 – ячейка с дополнительной теплоизоляцией; 3 – огнеупор;  
 L – ширина огнеупора (150мм); L1 – ширина ячейки (0, 60, 65, 70, 72.5 мм);  
 H – высота огнеупора (80, 120, 190, 230 мм);  
 H1 – высота ячейки (60 мм)

Эффективность дополнительной теплоизоляции достигается при установке фасонных огнеупоров в высокотемпературных зонах печи, чем обеспечивается наибольшая передача тепла обрабатываемому материалу [1]. При работе печи огнеупор изнашивается, и толщина футеровки уменьшается от 230 до 80 мм. Это изменяет градиент температур и, соответственно, термомеханические напряжения в ней. Подобная конструкция позволяет, вместе с уменьшением тепловых потерь в окружающую среду, уменьшить массу футеровки.

При выборе конфигурации огнеупора учитывается как эффективность получаемой теплоизоляции, которая с увеличением размера ячеек повышается, так и конструктивная надежность огнеупора, обусловленная величиной возникающих в нем термомеханических напряжений.

**Целью данной работы** является исследование возможностей установки футеровки с фасонным огнеупором для увеличения теплового сопротивления и уменьшения потерь тепла в окружающую среду. При этом предлагается метод расчета корпуса, футеровки, бандажей и других конструктивных элементов вращающейся печи с определением напряженно-деформированного состояния конструкций при комплексном учете термосиловых и других факторов нагрузки, которая позволяет отдельно проанализировать их влияние и определить оптимальные условия их работы.

## 2. Описание математической модели

Для моделирования НДС конструкций, в частности вращающихся печей, которые находятся под действием внешних сил и неравномерных температурных полей, воспользуемся общими соотношениями механики деформированного твердого тела – уравнениями движения и сохранения энергии

$$\rho \frac{d^2 u^i}{dt^2} = \nabla_j \sigma^{ij} + f^i \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dt} = \sigma^{ij} \frac{d\epsilon_{ij}}{dt} - \nabla_i q^i + Q_V \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $u^i$  – компоненты вектора перемещений,  $\sigma^{ij}$  – контравариантные компоненты тензора напряжений,  $f^i$  – компоненты вектора объемных силовых нагрузок,  $U$  – внутренняя энергия единицы объема материала,  $\epsilon_{ij}$  – ковариантные компоненты тензора деформаций,  $q^i$  – компоненты вектора теплового потока,  $Q_V$  – источник тепловой энергии единицы, отнесенный единицы объема материала.

Для получения замкнутой системы уравнений к (1) – (2) необходимо прибавить геометрические уравнения Коши для полных деформаций  $\epsilon_{ij}$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i u_j + \nabla_j u_i) \quad (3)$$

соотношение для упругих деформаций  $\epsilon_{ij}^{(e)}$ , как разность между полными и тепловыми деформациями

$$\epsilon_{ij}^{(e)} = \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^{(T)}, \quad (4)$$

$$\epsilon_{ij}^{(T)} = \alpha_{(T)}(T - T_0)g_{ij} \tag{5}$$

уравнение обобщенного закона Гука для напряжений с учетом тепловых деформаций

$$\sigma^{ij} = C^{ijmn}\epsilon_{ij}^{(e)} = C^{ijmn}(\epsilon_{mn} - \epsilon_{ij}^{(T)}), \tag{6}$$

а также закона Фурье, который разрешает определить вектор теплового потока через температуру  $T$

$$q_i = -\lambda \nabla_i T, \tag{7}$$

и зависимости от температуры внутренней энергии  $U$

$$U = c_v T + \text{const}, \tag{8}$$

где  $C^{ijmn}$  – компоненты тензора упругости,  $g_{ij}$  – компоненты метрического тензора,  $\alpha_{(T)}, \lambda, c_v$  – коэффициенты теплового расширения, теплопроводности и теплоемкости материала.

Рассмотрим стационарные задачи термомеханики твердых тел, для которых температура и все параметры НДС являются независимыми от времени  $t$ . Тогда взаимно связанная система уравнений (1) – (8) упрощается и распадается на две подсистемы, которые решаются последовательно:

теплопроводности (с учетом (2), (7)) в виде

$$\nabla_i (\lambda g^{ij} \nabla_j T) + Q_v = 0 \tag{9}$$

и термоупругости

$$\nabla_j \sigma^{ij} + f^i = 0, \tag{10}$$

где напряжения  $\sigma^{ij}$  выражаются через перемещение  $u^i$  в соответствии с соотношениями (3) – (6) и значение температуры  $T$ , полученные согласно (9).

Для краевых задач механики система уравнений должна дополняться граничными условиями. При решении уравнения (9) на внешней поверхности тела задаются условия теплообмена, которые на разных частях поверхности могут быть разными. Будем рассматривать четыре типа.

На всей внешней поверхности тела или на части его поверхности  $S_T$  заданная температура  $T$

$$T|_{S_T} = \theta, \tag{11}$$

где  $\theta$  – заведомо заданные значения температуры.

На поверхности тела  $S_\alpha$  заданные условия конвективного теплообмена

$$-q^i n_i |_{S_\alpha} = \lambda (\nabla_i T) n^i |_{S_\alpha} = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - \theta), \tag{12}$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\theta$  – температура окружающей среды возле внешней поверхности  $S_\alpha$ ,

$n_i$  – компоненты единичного вектора внешней нормали к поверхности тела.

На поверхности тела  $S_\gamma$  заданные условия лучистого теплообмена

$$-q^i n_i |_{S_\alpha} = \lambda (\nabla_i T) n^i |_{S_\alpha} = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta (T^4 - \theta^4), \tag{13}$$

где  $\beta$  – коэффициент излучаемой (или поглощающей) способности поверхности тела относительно лучевой энергии,  $\theta$  – температура источника лучевой энергии.

При определении НДС на базе (10), предельные условия могут быть сформулированы или относительно напряжений (статические условия)

$$\sigma^{ij} n_j |_{S_p} = p^i, \tag{14}$$

где  $p^i$  – компоненты внешних поверхностных сил, отнесенных к единицы площади внешней поверхности  $S_p$ ,  $n_j$  – компоненты единичного вектора внешней нормали к поверхности тела, или относительно перемещений (кинематические условия)

$$u^i |_{S_u} = \tilde{u}^i, \tag{15}$$

где  $\tilde{u}^i$  – компоненты вектора вынужденных перемещений, которые заданы на поверхности  $S_u$ , или в смешанном варианте (смешанные предельные условия), когда часть уравнений являются статическими, а вторая – кинематическими условиями, но общее количество уравнений в каждой точке внешней поверхности должна быть неизменной.

**Алгоритм решения задачи**

Система дифференциальных уравнений (1)–(15) с помощью метода конечных элементов (МКЭ) дискретизируется и представляется в виде двух систем алгебраических уравнений высокого порядка – теплопроводности и термомеханики. Задача теплопроводности соответствует матричному уравнению

$$[\Lambda]\{T\} = \{Q\}, \tag{16}$$

где  $[\Lambda]$  – матрица теплопроводности, которая учитывает свойства теплопроводности материала и нелинейные граничные условия теплообмена (12),  $\{T\}$  – вектор неизвестных узловых температур,  $\{Q\}$  – вектор внутренних и граничных тепловых источников. Задача термомеханики формулируется относительно узловых перемещений в виде уравнения

$$[K]\{U\} = \{P\}, \tag{17}$$

где  $[K]$  – матрица жесткости, которая учитывает упругие свойства материала и граничные условия,  $\{U\}$  – вектор неизвестных узловых перемещений,  $\{P\}$  – вектор эквивалентных узловых термосиловых нагрузок, которые обусловлены действием внешних сил и градиентами температуры внутренних и граничных тепловых источников.

Процесс моделирования термонагруженного состояния конструкций выполняется в два этапа. На

первом решается задача теплопроводности. Поскольку система уравнений (16) есть нелинейной, то используется итерационный алгоритм:

1) Формируется линеаризованная матрица  $[A]$  и вектор  $\{Q\}$  принимая, что температура, от которой зависит коэффициент теплоотдачи в (12), сначала равняется температуре окружающей среды  $\theta$ ,

2) Решается система линеаризованных уравнений (16) и определяется очередное приближенное значение вектора  $\{T\}$ ,

3) По найденным температурам уточняется значение коэффициента теплоотдачи и вычисляется новая матрица  $[A]$  и вектор  $\{Q\}$ . Определяется погрешность линеаризованного уравнения (16), и если она находится в допустимых пределах, то последнее значение  $\{T\}$  принимается как решение задачи теплопроводности. В другом случае выполняется переход к п. 2).

Второй этап заключается в формировании матрицы жесткости и вектора эквивалентных узловых термосиловых нагрузок уравнения (17) с учетом полученного температурного поля.

После решения (17) по полученным значениям узловых перемещений вычисляются деформации и напряжение в элементах конечноэлементной модели, и анализируется общее напряженно-деформированное состояние конструкции.

### 3. Постановка задачи исследования

Для решения задачи по расчету температурных полей и термомеханических напряжений в корпусе вращающегося теплового аппарата, использовалась интегрированная система VESNA, разработанная на кафедре ХПСМ НТУУ „КПИ” [3]. Указанная система предназначена для моделирования гидродинамических, тепловых процессов и прочностных расчетов с использованием метода конечных элементов. В системе учитываются процессы линейного и нелинейного деформирования пространственных комбинированных систем, выполненных из изотропных и анизотропных материалов.

В данной работе была исследована вращающаяся печь 4,5x80 м Криворожского цементного завода с сварным бандажом.

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

которая установлена на нескольких опорах. Опорными элементами являются бандаж, установленные в подбандажной обечайке.

Корпус печи имеет изменяющееся поперечное сечение, которое определяется разной толщиной самого корпуса и футеровки. Кроме того, в зоне спекания на футеровку печи налипают части обрабатываемого материала.

Этот слой называется «обмазкой», который с одной стороны является продуктом обрабатываемого материала, с другой - служит предупредительным слоем, который защищает футеровку от лишнего температурного влияния. Возле одной из опор печи на корпус крепится ведущее зубчатое колесо привода, которое передает на корпус вращающийся момент, и имеет соответствующий вес, который учитывается в расчетах.

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 на величину усилий обычно не учитывается, так как он незначительный и составляет 3-4%.

Также при 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 в рабочих зонах теплового агрегата и вызывают соответствующие термомеханические напряжения в корпусе печи.

Конструктивные элементы печи, которые включают элементы корпуса, и размещение футеровки приведены на рис. 2.

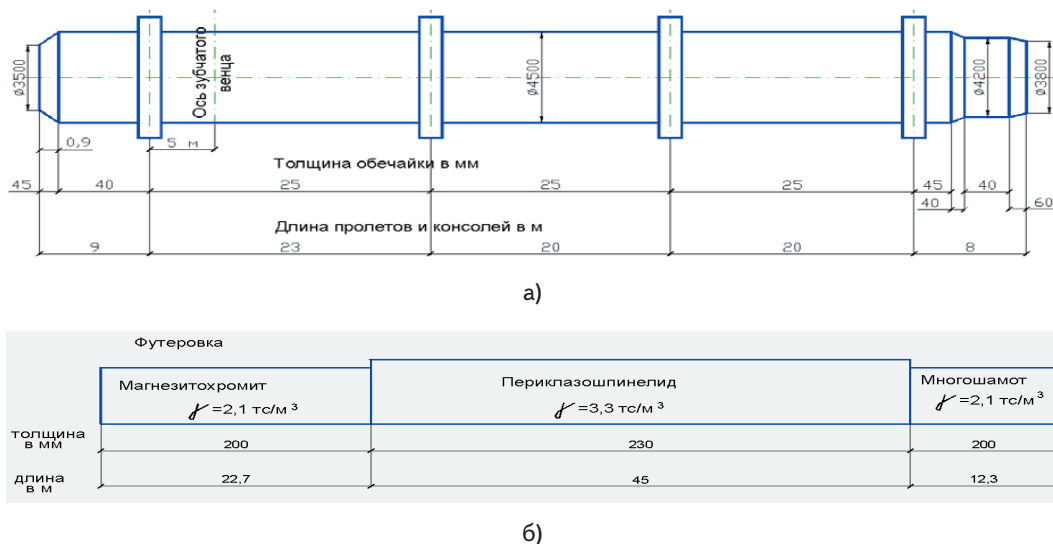


Рис. 2. Конструктивные элементы печи  
а) схема корпуса печи; б) схемы размещения футеровки

Температура футеровки внутри печи задается из экспериментальных зависимостей графиком, показанным на рис. 3.

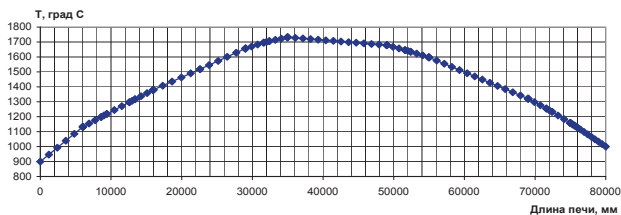


Рис. 3. Температура поверхности футеровки внутри печи

Отдельным вопросом при расчете печи есть выбор физико-механических свойств футеровки. Для определения напряжения, необходимо знать ряд ее физико-механических характеристик, основными из которых есть модуль упругости и коэффициент термического расширения.

Модуль упругости футеровки в значительной мере зависит от начального напряжений сжатия, которое вызвано тем, что при укладке футеровка распирается в корпусе печи „замком”, который забивается между огнеупорами. При нагревании температура футеровки превышает температуру корпуса, поэтому считается, что она крепко прижимается к нему. В расчетах рекомендуется принимать модуль упругости футеровки приблизительно на два порядка меньше модуля упругости корпуса [4].

Термическое расширение футеровки оказывает важное значение при расчете на прочность для всех элементов конструкции. В результате термического расширения огнеупоров, она выдерживает значительные нагрузки, которые могут привести (при недостаточной ширине температурных швов и др.) к скалыванию кирпича и выпадению всего кольца футеровки. Трещины и деформации футеровки в основном увеличиваются при ее разогреве или охлаждении. Картина возникновения и развития этого явления весьма сложная, так как на него влияют разные факторы, которые включают: величину коэффициента термического расширения, значение температур и характер их распределения в футеровке, степень монолитности, количество нагревов и охлаждений, скорость изменения температуры, толщину швов между кирпичинами и много других. Характер влияния всех этих факторов на процессы расширения футеровки может быть различным, причем отдельные влияния часто комбинируются и находятся во взаимозависимости [5].

При решении задачи для футеровки были использованы значения указанные в [6]

$$\sigma_m = 3100 \quad 0, \quad \alpha = 3.5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}, \quad \mu = 0.3.$$

#### 4. Анализ результатов расчета

**Выбор конструкции огнеупора.** Вначале определяется возможная конструкционная форма огнеупора, который дает максимальное тепловое сопротивление, но, вместе с тем, температура в ячейке не превышает допустимую температуру теплоизоляционного материала, а также эффективность применения теплоизоляционного материала. Исследовалась конструкция, включающая огнеупор, корпус и ячейку с теплоизоляцией, приведенные на рис. 1. Огнеупор находится в зоне максимальной температуры, которая составляет 1730°C, коэффициент теплоотдачи в окружающую среду от корпуса равен  $\alpha_{0.c.} = 3.5 + 0.062t_K$ .

Результаты расчета представлены на рис. 4 – рис. 7. На рис. 4 показана температура корпуса печи. Из графиков видно, что по мере износа огнеупора температура корпуса повышается, при толщине футеровки 230 мм (начало кампании печи) она составляет 270°C, после износа до 80 мм (конец кампании) повышается до 450°C. При установке футеровки с фасонным огнеупором начальная температура составляет 240°C, конечная не превышает 350°C.

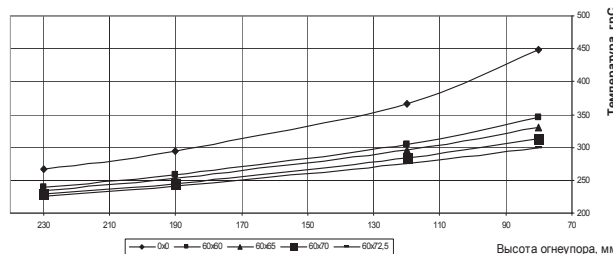


Рис. 4. Температура корпуса печи

На рис. 5 приведена максимальная температура в ячейке с теплоизоляцией. Из графиков видно, что в начале кампании печи температура для различных ячеек незначительна и не превышает 1000°C. По мере износа огнеупора она повышается и соответственно составляет – 1552°C для ячейки 60x60 мм, 1567°C для ячейки 60x65 мм, 1584°C для ячейки 60x70 мм, 1602°C для ячейки 60x72,5 мм.

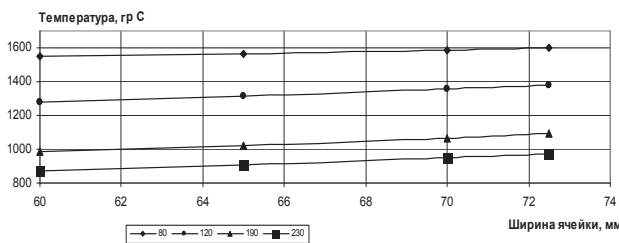


Рис. 5. Максимальная температура в ячейке с теплоизоляцией

На рис. 6 показаны результаты расчета теплового потока от корпуса печи в окружающую среду. Из графиков видно, что тепловые потери от корпуса печи существенно увеличиваются по мере износа огнеупора. Для обычного огнеупора они изменяются от 5480Вт/м<sup>2</sup> до 1350Вт/м<sup>2</sup>. При использовании фасонного огнеупора они существенно меньше, особенно в конце кампании печи и составляют 8300Вт/м<sup>2</sup> для ячейки 60x60 мм, 7630Вт/м<sup>2</sup> для ячейки 60x65 мм, 6920Вт/м<sup>2</sup> для ячейки 60x70 мм и 6530Вт/м<sup>2</sup> для ячейки 60x72,5 мм.

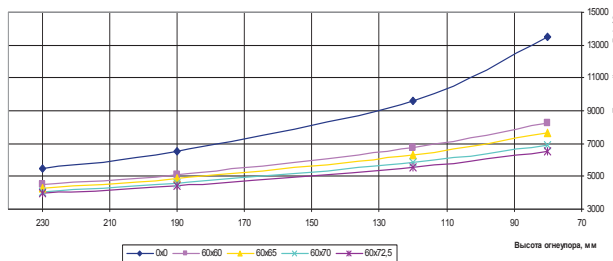


Рис. 6. Тепловой поток от корпуса в окружающую среду



На рис. 7 приведены результаты интегрального расчета эффективности использования футеровки с дополнительной теплоизоляцией за счет уменьшения теплового потока от корпуса печи в окружающую среду. Сравнение проводилось с базовой футеровкой со стандартной конструкцией огнеупора. Как видно из графика, установка огнеупоров с теплоизоляцией в зоне максимальных температур позволит уменьшить тепловой поток в окружающую среду на 30–40%.

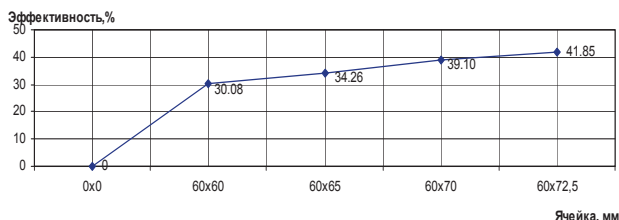


Рис. 7. Эффективность использования фасонного огнеупора

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о целесообразности применения футеровки с использованием фасонного огнеупора для уменьшения тепловых потерь. Однако, полученные результаты также позволяют сделать вывод о невозможности использования конструкции огнеупора с ячейкой 72.5x60 мм, так как при этом в ячейке с теплоизоляцией возникают температуры превышающие допустимые (1600<sup>0</sup>С). Здесь следует отметить, что обычно в зоне максимальных температур цементной печи (зона спекания) на футеровке возникает защитный теплоизоляционный слой обмазки, который предохраняет футеровку от влияния высоких температур.

Однако, в данной работе исследуется наиболее неблагоприятный вариант. Поэтому в дальнейших расчетах конструктивный вариант огнеупора 72.5x60 мм не рассматривается.

**Решение тепловой задачи.** Конструктивные элементы печи показаны на рис. 2. Температура футеровки внутри печи задается из экспериментальных зависимостей графиком, приведенным на рис. 3. Коэффициент теплоотдачи в окружающую среду от корпуса и бандажей определяется по эмпирической зависимости  $\alpha_{0,c} = 3.5 + 0.062t_k$ . Исследовалась работа вращающейся печи при толщине футеровки 230 и 80 мм, с ячейками для теплоизоляции размером 60x60 мм, 60x65 мм, 60x70 мм.

Результаты теплового расчета представлены на рис. 8 – рис. 9.

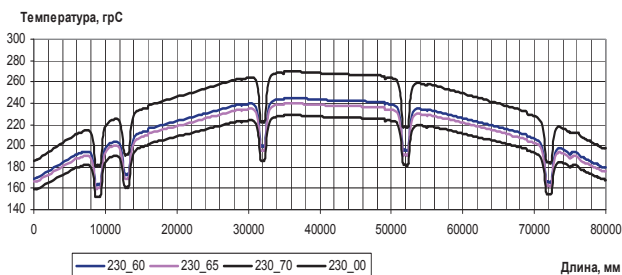


Рис. 8. Температура корпуса печи при толщине футеровки 230 мм

На рис. 8 приведены результаты расчета температуры корпуса печи при толщине футеровки 230 мм со стандартной футеровкой и футеровкой выполненной фасонным огнеупором с теплоизоляцией.

Из графиков видно, что температура корпуса при стандартной футеровке изменяется от 190<sup>0</sup>С в зонах охлаждения и экзотермических реакций до 270<sup>0</sup>С в зоне спекания.

Некоторое снижение температуры наблюдается в зоне установки бандажей и венцовой шестерни за счет более интенсивного охлаждения. Наблюдаются незначительные скачки температур в зоне установки подбандажных обечаек.

При этом в случае установки огнеупоров с теплоизоляционными ячейками 60x70 мм температура корпуса понижается и составляет от 160<sup>0</sup>С в зонах охлаждения и экзотермических реакций до 230<sup>0</sup>С в зоне спекания.

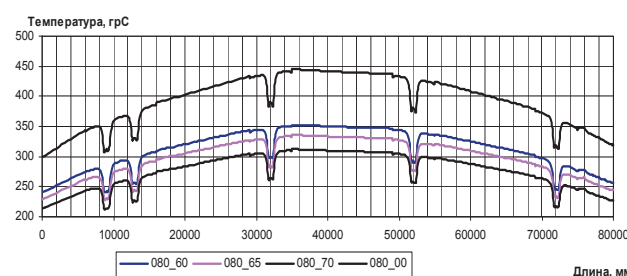


Рис. 9. Температура корпуса печи при износе футеровки до 80 мм

На рис. 9 приведены результаты расчета температуры корпуса печи при толщине футеровки 80 мм со стандартной футеровкой и футеровкой, выполненной фасонным огнеупором с теплоизоляцией. Из графиков видно, что температура корпуса при стандартной футеровке изменяется от 300<sup>0</sup>С в зонах охлаждения и экзотермических реакций, до 450<sup>0</sup>С в зоне спекания.

Скачки температуры на графике также объясняются более интенсивным охлаждением выступающих частей корпуса.

При использовании огнеупоров с теплоизоляционными ячейками 60x70 мм, температура корпуса понижается и составляет от 220<sup>0</sup>С в зонах охлаждения и экзотермических реакций до 315<sup>0</sup>С в зоне спекания. Более существенное распределение температур в этом случае связано с большим влиянием теплоизоляционной ячейки на тепловое сопротивление футеровки печи.

**Определение термомеханических напряжений.** После определения распределения температур, выполняется прочностной расчет с учетом термосиловых нагрузок, которые включают градиент температур и действие массовых сил.

Расчетная схема и деформированная модель корпуса печи со стандартной футеровкой толщиной 230 мм представлены рис. 10.

Для иллюстрации деформаций он выполнен с коэффициентом масштабирования деформаций 2000.

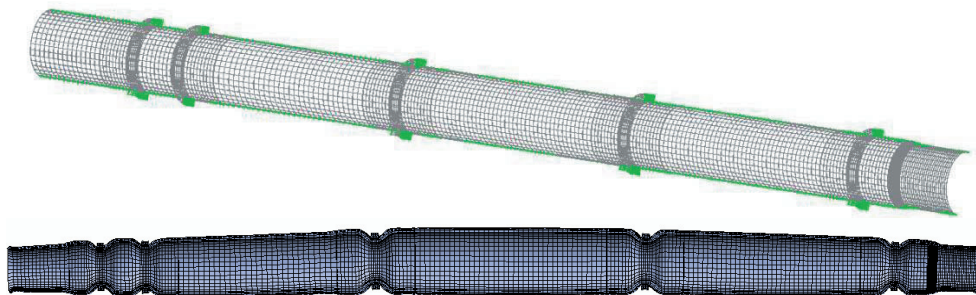


Рис. 10. Расчетная схема и деформация корпуса печи

При анализе напряжений, возникающих в корпусе печи, было установлено, что нагрузки от действия только массовых сил, значение которых максимальное на участке бандажей и не превышает 14.1 МПа, а нагрузка от суммарного действия массовых и термосиловых нагрузок, максимальное значение которых составляет 73.4 МПа и находится в зоне спекания. В корпусе вращающейся печи возникают напряжения разной интенсивности. Характер распределения напряжений свидетельствует о том, что температурные нагрузки значительно больше, чем нагрузки от массовых сил, особенно в местах установления бандажей и венцовой шестерни, где наблюдаются локальные перепады, которые вызваны локальным охлаждением корпуса в этих местах.

По полученному напряженно-деформированному состоянию (НДС) конструкции, исследовались напряжения возникающие, в футеровке. При этом эквивалентные напряжения определялись в центрах конечных элементов (КЕ) с использованием критерия наибольших линейных деформаций. Полученные данные для различных вариантов огнеупора приведены на рис. 11, рис. 12.

На рис. 11 показаны эквивалентные напряжения в футеровке печи L=230 мм в зоне спекания. Исследовались участки огнеупора с максимальными напряжениями. Как видно из графика при стандартной футеровке, выполненной обычным огнеупором, напряжения не превышают 20.7 МПа. При использовании фасонного огнеупора с теплоизоляционным слоем, напряжения увеличиваются до 25.0 МПа. Данное увеличение связано с увеличением теплового градиента и соответственно термосиловых напряжений. По графикам видно, что интенсивность нагрузок при введении теплоизоляционного слоя изменяется не линейно. С увеличением теплоизоляционного слоя, напряжения увеличиваются более интенсивно. Однако они не превышают допустимых напряжений, которые для периклазошпинелида составляют 30-35 МПа [7].

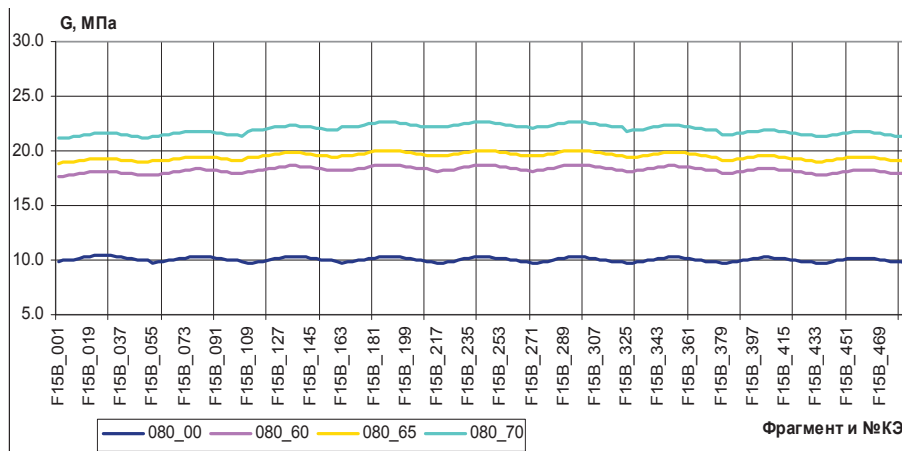


Рис. 12. Напряжение в футеровке печи L=80 мм

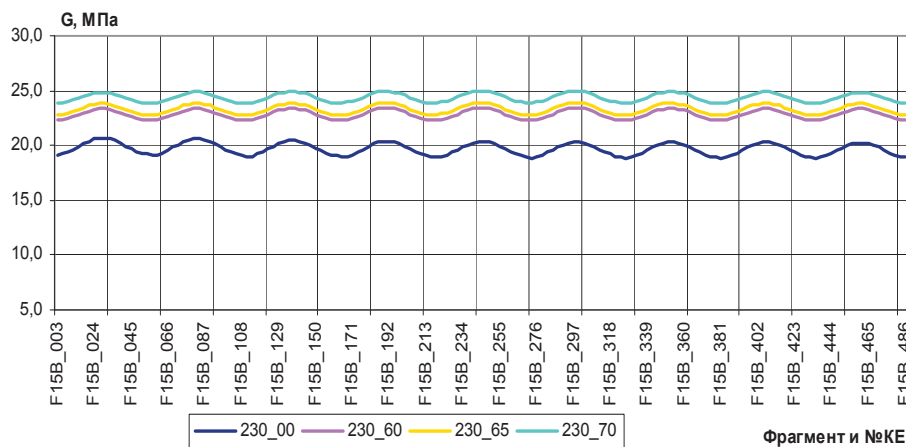


Рис. 11. Напряжение в футеровке печи L=230 мм

На рис. 12 представлены эквивалентные напряжения в футеровке печи L=80 мм в зоне спекания. Как видно из графика при стандартной футеровке, выполненной обычным огнеупором, напряжения не превышают 10.5 МПа. При использовании фасонного огнеупора с теплоизоляционным слоем, напряжения увеличиваются до 22.6 МПа.

Как следует из расчетов, более напряженное состояние в огнеупоре возникает в начале работы печи, когда толщина футеровки составляет 230 мм.

Таким образом, разработанная математическая модель

и алгоритмы расчета позволяют довольно полно определить НДС вращающейся печи с учетом массовых сил и термосиловых нагрузок, что дает возможность детального моделирования и исследования вращающейся печи в процессе ее работы. Полученные данные позволяют анализировать условия работы футеровки и определять возможности эффективности ее использования при изменении конструктивных размеров и физически-механических свойств огнеупоров.

### Выводы

Предлагаемая математическая модель и алгоритмы расчета позволяют проводить более полные расчеты с возможностью определять НДС печного агрегата с учетом как массовых сил, так и термосиловых нагрузок в комплексной постановке.

Определение нагрузок в футеровке позволяет моделировать работу не только корпуса, но и футеровки и определять как напряженно-деформированное состояние, так и эффективность ее работы как теплового элемента печи.

Полученные данные позволяют анализировать условия работы футеровки и определять возможности эффективности ее использования при изменении конструктивных размеров и физически-механических свойств огнеупоров. В данном случае для печи 4.5x85м размер ячейки с дополнительной теплоизоляцией размером 60x70 мм является наиболее эффективным. позволяет уменьшить тепловые потери в окружающую среду на 40%. Напряжения, возникающие в периклазошпинелидном огнеупоре, не превышают допустимых, и могут быть рекомендованы для работы в действующих тепловых агрегатах.

### Литература

1. 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, –р.28-30.
2. А.С. SU №1141291, МПК F27B 7/28. Вращающаяся печь. 23.02.85. Бюл. №7 (72) П.А.Староминская, Ю.М.Величко и др.
3. О. С. Сахаров, В. Ю. Щербина, О. В. Гондях, В. І. Сівецький. САПР. Інтегрована система моделювання технологічних процесів і розрахунку обладнання хімічної промисловості: Навчальний посібник – К.: ТОВ "Поліграф Консалтинг", 2006. – 156 с.
4. Рояк Д.А. Опытное исследование жесткости корпусов вращающихся печей //Цемент –1962. –№2. –с.11-13.
5. Исламов М.Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей. – Л.: Химия, 1986. – 280 с., ил.
6. Мурашев В.И. Исследования по жароупорным железобетонным и армокирпичным конструкциям. М.: Госстройиздат, 1959, 343 с., ил.
7. Силенок С.Г., Грицак Ю.С., Лысенко В.Д., Нефедов Д.Е. Механическое оборудование для производства вяжущих строительных материалов. М.: Машиностроение, 1969, 338 с., ил.