

тивления, функционирующих в условиях ОАО «МАЗ» и ОАО «БелАЗ» при модернизации футеровок. Полученные результаты показали, что при учете реальной стоимости модернизации и расчетной величины экономии энергоресурсов срок окупаемости таких печей составляет от 1,35 до 1,52 лет. В случае, если предприятие будет пользоваться кредитными ресурсами для модернизации печного парка эти цифры возрастут в 1,3–1,5 раз в зависимости от ставки банка и срока кредита.

Литература

1. **Гринчук, П.С.** Модернизация парка промышленных печей / П.С. Гринчук, А.М. Русецкий // Наука и инновации. – 2010. – № 12 (94). – С.74–76.

2. **Свенчанский, А.Д.** Электрические промышленные печи: в 2-х ч. Ч. 1. Электрические печи сопротивления / А.Д. Свенчанский // – М.: Энергия. –1975. – 384 с.

3. **Электротермическое оборудование:** Справочник / Под общ. ред. А.П. Альтгаузена, М.Я. Смелянского, М.С. Шевцова. – М.: Энергия. – 1967. – 488 с.

4. **Арендарчук, А.В.** Общепромышленные электропечи периодического действия / А.В. Арендарчук, А.С. Бородачев, В.И. Филиппов. – М.: Энергоатомиздат. –1990. – 112 с.

УДК 621.783:519

С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук (БНТУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В МЕТАЛЛОЗАВАЛКЕ*

Введение. При моделировании подогрева металлошихты в установках различного типа одним из важных вопросов является адекватность используемой физико-математической модели реальным условиям процесса. Одной из проблем является расчет внутреннего

теплопереноса в слое металлошихты за счет теплопроводности и радиационной составляющей.

Основной проблемой исследований нагрева металлошихты является сложность практического измерения средней температуры металлозавалки и отсутствие доступного теоретического математического аппарата для расчета данных температур. Другой проблемой является значительный разброс в размерах кусков лома, которые могут существенно различаться даже в пределах одной категории.

Моделирование переноса теплоты в металлической шихте. Моделирование переноса теплоты в пористых средах применительно к реальным объектам является сложной задачей ввиду огромного разнообразия структуры и случайного распределения параметров этой структуры. К таким объектам относится и металлическая шихта, используемая в сталеплавильном производстве.

Одной из основных задач при моделировании нагрева шихты является определение ее теплофизических характеристик, таких как коэффициент теплопроводности и теплоемкость, представленных в качестве эффективных величин.

Главными параметрами, влияющими на значения коэффициентов переноса, являются пористость и распределение размеров структурных элементов. Особое внимание при моделировании необходимо уделять экспериментальной проверке полученных моделей, так как параметры лома имеют значительный разброс.

Определение эффективного коэффициента теплопроводности материала

Эффективный коэффициент теплопроводности наряду с эффективной теплоемкостью определяет скорость распространения температуры внутри пористого тела, которым является металлошихта, загружаемая в различные металлургические агрегаты.

Если при определении объемной теплоемкости пористого материала, как правило, трудностей не возникает, так как она однозначно связана с насыпной плотностью материала, то при определении эффективного коэффициента теплопроводности возникает ряд особенностей. Основными параметрами, влияющими на значения коэффициентов переноса, являются пористость, температура и распределение размеров структурных элементов. Анализ методик расчета теплофизических характеристик показал, что существует два подхода при расчете эффективного коэффициента теплопроводности

сти: без учета и с учетом переноса излучения внутри пористого объема. Первый подход справедлив в области низких температур (до 300 °С). Второй подход применен в работах [1, 2] при моделировании плавления металлошихты в сталеплавильных агрегатах.

Рассмотрим определение коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры, пористости и различных толщин кусков материала без учета продувки слоя горячими газами.

При перпендикулярном расположении слоев сплошного металла к распространению теплоты эффективный коэффициент теплопроводности можно определить:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \frac{\lambda_{\text{м}} \cdot \lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{м}} \cdot P + \lambda_{\text{п}} \cdot (1 - P)}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{м}}$ – коэффициент теплопроводности твердого металла в зависимости от температуры, Вт/(м·К); $\lambda_{\text{п}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности воздушных прослоек, Вт/(м·К); P – пористость объема металлошихты.

При параллельном расположении слоев к направлению распространения теплоты эффективный коэффициент теплопроводности:

$$\lambda_{\text{эфф}}(T, P) = \lambda_{\text{м}}(T) \cdot (1 - P) + \lambda_{\text{п}}(T) \cdot P. \quad (2)$$

Пористость определяется через насыпную плотность металлошихты:

$$P = \frac{\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{м}}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{м}}$ – плотность металла, кг/м³; $\rho_{\text{н}}$ – насыпная плотность металлошихты, кг/м³.

Коэффициент теплопроводности внутри воздушных прослоек складывается из коэффициента теплопроводности воздуха внутри пор и эффективного коэффициента лучистой теплопроводности, рассмотренного например, в работе [3]:

$$\lambda_{\Pi}(T) = \lambda_{\text{в}}(T) + \frac{32}{9} \sigma T^3 h = \lambda_{\text{в}}(T) + \frac{32}{9} \sigma T^3 \frac{P}{1-P} d, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T – температура, К; h – размер пор в направлении распространения теплоты, м; d – размер куска металла в направлении распространения теплоты.

С повышением температуры металлошихты возрастает та часть коэффициента теплопроводности, которая учитывает переизлучение внутри газовых прослоек.

Моделирование одномерного распространения теплоты в шихте разной пористости и геометрических размеров

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований, проведенных нами в ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси». Эксперимент по нагреву стального лома проводился в нагревательной печи камерного типа со сводовым отоплением. Для обеспечения приближения одномерной задачи лом укладывали в колодец, сооруженный из шамотного кирпича и установленный на поду печи.

На рисунке 1 приведен объект исследования, представляющий собой емкость из материала с низким коэффициентом теплопроводности (шамота), в который помещена шихта определенной пористости и размеров структурных элементов. Средняя толщина кусков лома составила около 10 мм, масса лома – 37,7 кг, насыпная плотность – 2234 кг/м³.

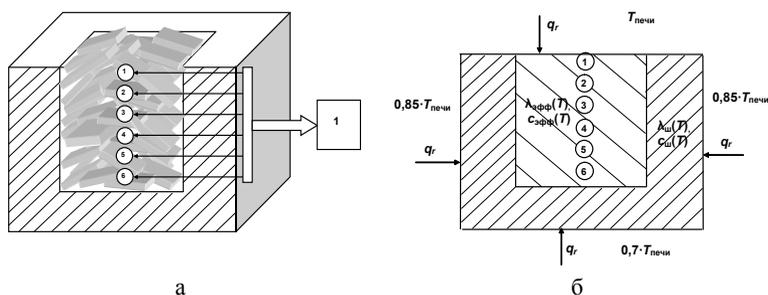


Рисунок 1 – Схема эксперимента по определению теплопроводности металлической шихты (а) и схема расчетной модели (б)

Для сопоставления результатов моделирования с реальным распространением теплоты в металлошихте было проведено три эксперимента по нагреву металлошихты в колдце. При этом в одном случае использовали случайное расположение кусков при засыпке лома в шахту, а в двух других случаях лом укладывали с преимущественным горизонтальным и вертикальным расположением кусков металла.

Моделирование проводилось решением задачи нестационарной теплопроводности при задании значения эффективного коэффициента теплопроводности и сравнением получаемых результатов с результатами термометрирования нагрева слоя, полученными в экспериментах.

На рисунке 2 представлен пример результатов моделирования нагрева металлошихты в сопоставлении с результатами эксперимента.

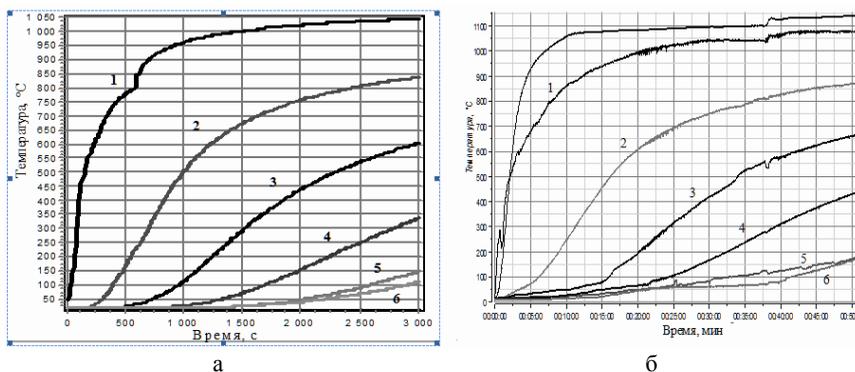
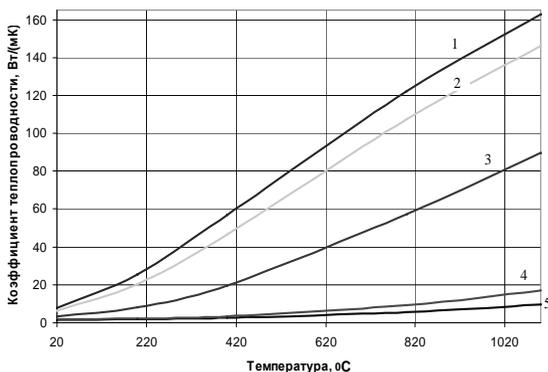


Рисунок 2 – Пример расчетов нагрева (а) и результатов термометрирования нагрева металлошихты в колдце (б)

Таким образом, при экспериментальном и компьютерном моделировании для насыпной плотности 2234 кг/м^3 (пористость 0,71) и средней толщине куска лома равной 10 мм, значение эффективного коэффициента теплопроводности изменялось в зависимости от температуры в пределах 1,7–17 Вт/(м·К), что количественно меньше коэффициента теплопроводности сплошного металла, изменяющегося в пределах 50–29 Вт/(м·К). В работе [4] показано, что коэффициент теплопроводности металлошихты при пористости 46 % изме-

няется от 16 Вт/(м·К) (при 700 °С) до 23 Вт/(м·К) (для 1200 °С), что подтверждает факт зависимости коэффициента теплопроводности от структуры металлошихты и температуры. Низкие коэффициенты теплопроводности даже при высоких температурах связаны с плотной металлозавалкой и малыми размерами пор.

Результаты расчета зависимости эффективного коэффициента теплопроводности от температуры при различном размере пор представлены на рисунке 3.



1 – $d = 0,4$ м; 2 – $d = 0,3$ м; 3 – $d = 0,1$ м; 4 – $d = 0,01$ м; 5 – $d = 0,005$ м

Рисунок 3 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры при различном размере пор

В результате поставленного эксперимента была определена качественная картина распространения теплоты в шихтовых материалах в различных условиях их нагрева. Кроме того была определена зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от пористости, размера пор и температуры. Показано, что на эффективную теплопроводность определяющее влияние оказывает ориентация кусков лома к потоку тепла.

Модель учета лучистого теплообмена при моделировании нагрева металлошихты. Нахождение температурных полей связано с решением дифференциального уравнения теплопроводности, которое устанавливает зависимость между температурой, временем и координатами элементарного объема с соответствующими крайними условиями.

Граничное условие третьего рода задает либо закон конвективного, либо радиационного, либо суммарного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Например, граничное условие при упрощенном варианте моделирования можно записать в следующем виде.

$$-\lambda_j(T) \frac{\partial T_j(\tau)}{\partial \bar{n}} = \alpha_j(T) [T_c - T_{nj}(\tau)], \quad (5)$$

где $T_{nj}(\tau)$ – температура поверхности металла; T_c – температура печной среды (печи).

В случае радиационного теплообмена

$$\alpha_j = \alpha_{pj} = \varepsilon \sigma \{ [T_{nj}^2(\tau) + T_c^2] \cdot [T_{nj}(\tau) + T_c] \}. \quad (6)$$

Будем рассматривать только радиационный теплообмен и конвективную составляющую в конкретном случае примем равной нулю.

Для серых тел радиационный поток можно записать в следующем виде

$$q_j = \varepsilon_j (P_j - \sigma T_j^4), \quad (7)$$

где ε_j – излучательная способность поверхности тела; P_j – полный падающий на поверхность тела радиационный поток; σ – постоянная Стефана-Больцмана; T_j – температура поверхности тела.

Полный падающий на поверхность тела радиационный поток можно представить как сумму

$$P_j = P_{mj} + F_{aj} \sigma T_{aj}^4, \quad (8)$$

где P_{mj} – взаимное излучение, приходящее от всех границ в модели, Вт/м²; F_{aj} – коэффициент облученности, равный доле области пространства, не покрытой другими границами и изменяющийся в пределах от 0 до 1; T_{aj} – температура удаленного источника (среды).

Задача внутренней теплопроводности решается в каждом куске металлолома. Схема решения задачи при перпендикулярном расположении кусков к оси шахты представлена на рисунке 4. В качестве граничных условий задается тепловой поток на поверхности шахты (слева). Распространение теплоты внутри шахты происходит только за счет лучистого потока (без учета искусственной и естественной конвекции).

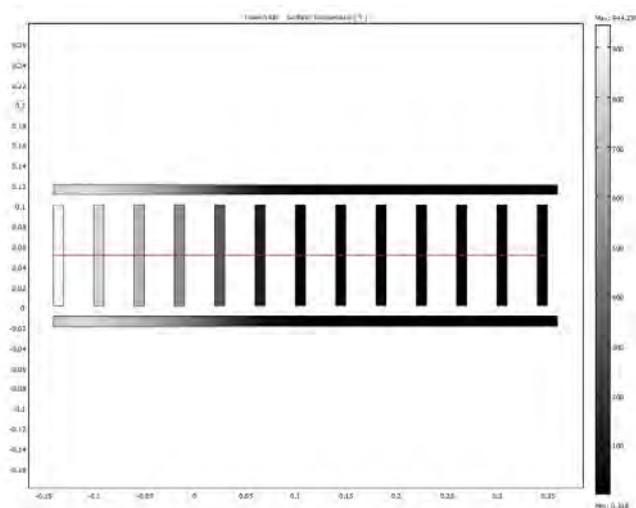


Рисунок 4 – Схема решения задачи радиационного нагрева металла при перпендикулярном расположении кусков к оси шахты и температурное поле

Результаты решения задачи по схеме 1 представлены в виде изменения температуры металла по длине шахты в центральном ее сечении в зависимости от времени нагрева от 100 до 5000 с при перпендикулярном расположении кусков к оси шахты (рисунок 5).

Схема решения задачи при параллельном и перпендикулярном расположении кусков к оси шахты представлена на рисунке 6.

Результаты решения задачи по схеме 2 (рисунок 7) представлены в виде изменения температуры металла по длине шахты в центральном ее сечении в зависимости от времени нагрева от 100 до 5000 с при параллельном и перпендикулярном расположении кусков к оси шахты.

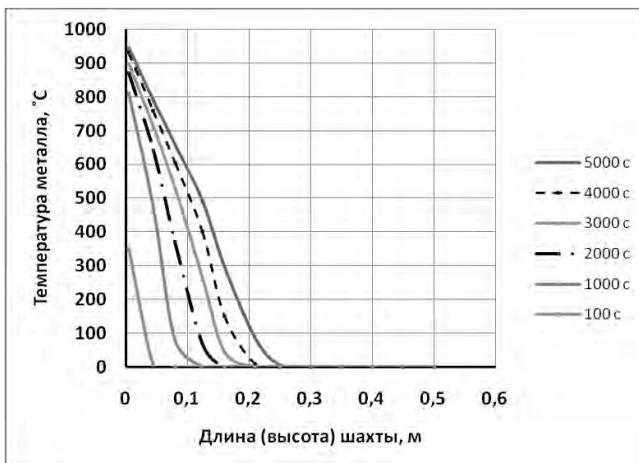


Рисунок 5 – Изменение температуры металла по длине шахты в центральном ее сечении в зависимости от времени нагрева от 100 до 5000 с при перпендикулярном расположении кусков к оси шахты

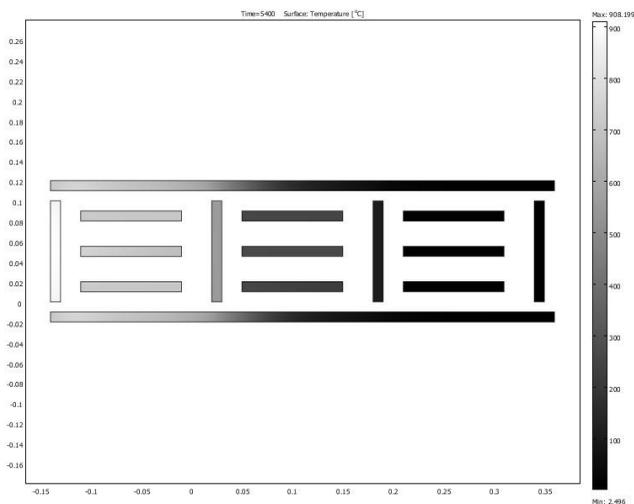


Рисунок 6 – Схема решения задачи радиационного нагрева металла при параллельном и перпендикулярном расположении кусков к оси шахты

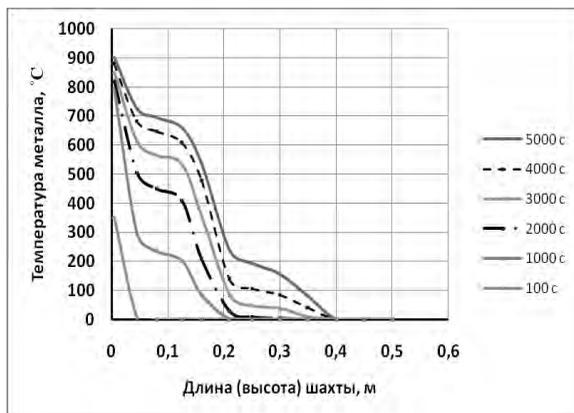


Рисунок 7 – Изменение температуры металла по длине шахты в центральном ее сечении в зависимости от времени нагрева от 100 до 5000 с при параллельном и перпендикулярном расположении кусков к оси шахты

Также были рассмотрены случаи лучистого теплообмена в шахте с водоохлаждаемыми стенками, при этом в качестве граничных условий на внешней поверхности была задана постоянная температура стенки, равная средней температуре охлаждающей воды.

Результаты расчета нагрева металла в шахте с водоохлаждаемыми стенками при параллельном и перпендикулярном расположении кусков к оси шахты представлены на рисунке 8.

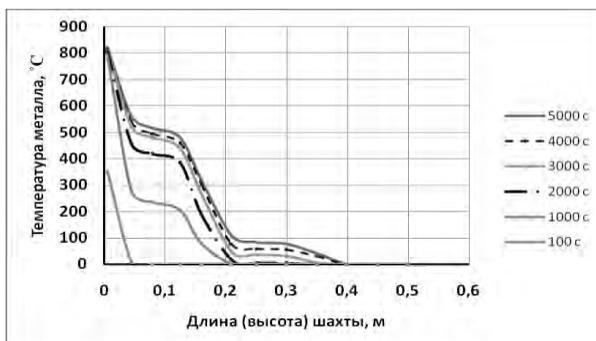


Рисунок 8 – Изменение температуры металла по длине шахты в центральном ее сечении в зависимости от времени нагрева от 100 до 5000 с при параллельном и перпендикулярном расположении кусков к оси шахты при холодных стенах камеры

Из представленных результатов следует, что на среднемассовую температуру оказывает влияние как способ расположения металлошихты и ее структура, так и конструктивные особенности камеры.

Как следует из полученных результатов, при решении задачи распространения теплоты и нагрева металла переизлучением тепловой энергии внутри слоя для получения подобных результатов при использовании эффективных коэффициентов теплопроводности они должны существенно увеличиваться при высоких температурах металлошихты, что согласуется с данными, полученными при моделировании переноса теплоты в металлической шихте.

Рассмотрим также лучистый теплообмен при пропускании через металлошихту газов и необходимость его учета при расчетах. Степень черноты газов в зависимости от температуры можно определить из графиков Тимофеева–Карасиной [5]. Среднюю температуру газов за весь период плавки принимаем равной 1500 °С. Для дальнейших расчетов принимаем следующий средний состав отходящих газов за всю плавку: CO = 14 %; CO₂ = 18 %; O₂ = 13 %; N₂ = 55 %.

В связи с тем, что из всех газов эффективно излучает лишь CO₂, а излучение водяных паров пренебрежимо мало, степень черноты будем определять исходя из среднего содержания CO₂ за плавку, равного 18 %.

Принимая формулу пор цилиндрической, запишем эффективную длину луча равной $S_{\text{эф}} = 0,9d$. Для максимальных размеров пор $d = 0,5$ м определяем произведение парциального давления и эффективной длины луча $P_{\text{CO}_2} S_{\text{эф}} = 0,18 \cdot 10^5 \cdot 0,45 = 8,1$ кН/м и степень черноты газа при температуре 1500 °С, $\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,077$. Полученное значение степени черноты газов свидетельствует о том, что теплообмен излучением необходимо учитывать при высоких температурах газов совместно с конвективным, особенно при наличии значительного количества пыли и продуктов горения углеводородов (масел) в шихте. При предварительном разбавлении печных газов большим количеством холодного воздуха снижается как температура газов, так и их степень черноты, поэтому в этом случае лучистым теплообменом можно пренебречь.

Заключение. Рассмотрены различные подходы анализа теплопереноса в слое пористого материала в виде металлошихты. Показано, что при высокой температуре, большой пористости металлошихты и длительном времени нагрева происходит некоторое выравнивание температуры за счет внутреннего теплопереноса в слое, что необходимо учитывать при моделировании процессов подогрева металлошихты.

Литература

1. **Теплотехнология** металлургических мини-заводов / В.И. Тимошпольский [и др.]. – Минск: Навука и тэхніка, 1992. – 158 с.
2. **Болотов, В.Ю.** Трехмерная математическая модель тепловой работы ДСП по технологии высшего уровня / В.Ю. Болотов // Энергетика. – 2002. – № 1. – С. 33–37.
3. **Павлюкевич, Н.В.** Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах / Н.В. Павлюкевич. – Минск: ИТМО НАНБ, 2002. – 140 с
4. **Казанцев, Е.И.** Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
5. **Металлургические печи.** Теория и расчеты: Учебник. В 2 т. Т.1 / В.И. Губинский [и др.]; под общ. ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. – Минск: Беларус. наука, 2007. – 596 с.

УДК 621.783:519

С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук (БНТУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАХТНОГО ПОДОГРЕВА МЕТАЛЛОШИХТЫ*

В зависимости от производственных условий схемы подогрева металлошихты можно разделить на несколько случаев: