

*problems and optimizing export and import processes are proposed. The basic problems of creating and importing three-dimensional models into Unity software were also studied and described. At the end of the work, conclusions are drawn about the work done and ways to further develop the project are identified.*

**Keywords:** *augmented reality technologies, 3D modeling, 3D Max, Blender, mobile application, innovative technologies.*

Рецензент: П'ятикоп О.Є., к.т.н., доцент каф. КН

Стаття надійшла 14.11.2019 р.

УДК 669.162.22

Черевко О.О., Щербаков С.В., Єрмілін А.І., Тітку В.В.

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ МЕТОДИЧНОЇ ПЕЧІ

*Розвиток сучасного металургійного виробництва супроводжується вдосконаленням технологічних процесів, реконструкцією методичних печей з використанням новітніх методів і засобів управління, що дозволяє більш ефективно використовувати енергоносії.*

*Впровадження автоматизованих систем на підприємствах чорної металургії, зокрема в листопрокатному виробництві, чинить істотний вплив на підвищення продуктивності, зниження питомих витрат електроенергії, поліпшення якості продукції. Кінцевою метою розробок є створення комплексної системи управління режимом нагріву металу в методичній печі, що забезпечує нормальну роботу листопрокатного цеху при мінімальній собівартості продукції.*

*Головним критерієм управління нагрівальними печами є мінімізація питомих витрат на здійснення нагріву з обмеженнями за якісними показниками процесу, якими є температура поверхні металу і перепад температур по перетину заготовки. Це досягається мінімізацією витрат палива і втрат металу в окалину.*

*Основними параметрами системи, що впливають на хід технологічного процесу, є: температура в печі, витрати енергоносіїв, тиск під сводом печі, теплофізичні властивості металу і пічних газів (теплоємність, теплопровідність, щільність, геометричні розміри злитків, калорійність палива та ін.), а також безперебійність процесів нагріву в печі, що значно покращує ТЕП. Змінними параметрами є щільність теплового потоку в зонах, витрати палива і повітря на зони, тиск в печі.*

*В роботі розглянуті основні підходи до створення автоматизованої системи управління тепловою роботою методичної печі. Виконано аналіз математичних методів опису теплофізичних процесів нагріву металу в методичній печі, розроблений алгоритм розрахунку основних технологічних параметрів з програмною реалізацією на ЕОМ.*

**Ключові слова:** *автоматизація, методична піч, нагрів металу, внутрішній та зовнішній теплообмін, комп'ютерне моделювання.*

**Постановка проблеми.** Головним завданням досліджень є розробка алгоритму управління безпосереднім нагрівом металу в печі, тобто управління тепловою потужністю печі.

Належне управління тепловою роботою печі обумовлює роботу всього агрегату в цілому і дозволяє в широких межах змінювати параметри температурного режиму по зонах, впливаючи як на якість нагріву і продуктивність, так і на техніко-економічні показники ділянки печей.

Це завдання займає домінуюче значення, тому що від правильного вибору режиму роботи печі залежить процес нагріву металу, більш того, за умов зміни сортаменту продукції і перебоями з подачею енергоносіїв, завдання управління тепловою потужністю печі доцільно розглядати як задачу оптимізації.

Критерієм управління при цьому є техніко-економічний критерій – мінімізація питомих витрат на здійснення нагріву з обмеженнями за якісними показниками цього процесу, якими є: температура поверхні металу  $t_{II}$  і перепад температур по перетину заготовки  $\Delta t$ . Це досягається тільки в тому випадку, якщо буде мінімізована сума витрат палива і втрат металу в окалину. Цільова функція є комплексною, а відповідні вагові коефіцієнти точно дорівнюють вартості палива і металу, що нагрівається.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Внутрішній і зовнішній теплообмін протікають по певним фізичним законам, вони тісно пов'язані між собою, взаємно впливають один на одного та утворюють єдиний процес, який в свою чергу залежить від умов горіння палива та руху газів, а отже, від конструкції печі та умов експлуатації.

В основі теорії нагріву лежить математична теорія теплопровідності при різних початкових і поверхневих умовах.

У сучасній теорії нагріву розрізняють дві категорії – нагрів тонких і масивних тіл. В тонких тілах перепад температур, що утворюється в процесі нагріву, настільки незначний, що ним можна знехтувати; в масивних тілах його необхідно враховувати. Кордон тонких і масивних тіл визначається за значенням безрозмірного критерію Біо

$$B_l = \frac{\alpha S}{\lambda} \quad (1)$$

За даними Іванцова Г.П. [1]  $B_l \geq 0,5$  характеризує масивні тіла;  $B_l \leq 0,25$  тонкі тіла; значення  $0,25 < B_l < 0,5$  лежать в перехідній області.

Зовнішній теплообмін в методичних печах здійснюється за радіаційним режимом. Дослідження показують, що роль конвекції в зовнішньому теплообміні невелика і не перевищує 10 % від загальної кількості тепла, переданого металу [1].

Особливістю умов зовнішнього теплообміну в методичній печі є зміна температури газів і металу по довжині печі. У зв'язку з цим в кожному перетині робочого простору сальдо-потоки тепла, тобто теплові потоки, які сприймаються металом, з урахуванням його власного і відбитого випромінювання, будуть різні.

Крім нерівномірності температури газів по довжині печі, в будь-якому поперечному перерізі температурне поле є нерівномірним по висоті та ширині робочого простору.

З урахуванням цих чинників розрахунок теплообміну в методичних печах зустрічає значні теоретичні та практичні труднощі.

Дослідження теплообміну випромінюванням при нерівномірному температурному полі, виконані Іванцовим Г.П. [1], Суриновим Ю.А [2] та ін., показуючи велику практичну важливість і основні шляхи вирішення цієї проблеми, не дають технічних методів розрахунку теплообміну з урахуванням зазначених факторів.

У зв'язку з цим при розрахунку теплообміну приймаються наступні спрощуючі припущення:

- питомий тепловий потік на елементарну по довжині робочого простору печі поверхню металу визначається по температурі газів у вертикальному перетині печі, причому під температурою газів розуміється температура, яка відповідає середній тепломісткості газового потоку в цьому перетині;

- щільність променистих потоків від обмурівки печі і металу приймається рівномірною по всій довжині печі;

- поглинаюча здатність газів, що дорівнює їх ступеню чорноти, приймається

однаковою у всіх напрямках і відноситься до температури газів.

Сляби необхідно нагрівати з максимально допустимою температурою, яка обумовлюється наступними обмеженнями:

- на початку нагріву обмеженням служить умова відсутності термічного руйнування металу;
- неприпустимість підняття температури робочого простору вище дійсної температури горіння палива або температури, допустимої для даного виду печі;
- неприпустимість нагріву металу вище температури, при якій починаються незворотні зміни в структурі металу.

Оскільки немає можливості прямо контролювати деякі основні параметри нагріву, такі як розподіл температур по перетину сляба, оптимізувати процес нагріву можна за допомогою попереднього математичного моделювання. Такий метод дозволяє визначити потрібний розподіл температур по зонах печі та тривалість перебування сляба в кожній зоні.

**Метою даної роботи** є розробка математичної моделі нагріву металу і вибору температурного режиму печі, при якому мінімізуються час нагріву, витрати палива і втрати металу.

**Виклад основного матеріалу.** Процес нагріву в методичній зоні повинен забезпечувати відсутність термічного руйнування металу:

$$T_{нов} - T_{ц} < \Delta T_{дон}, \quad (2)$$

де  $\Delta T_{дон} = \frac{k \cdot \sigma}{\beta \cdot E}$  – перепад температур, при якому відсутнє термічне руйнування;

$T_{нов}$  – температура поверхні сляба;

$T_{ц}$  – температура серцевини сляба;

$\sigma = 367$  МПа – тимчасовий опір розриву;

$\beta = 15.2 \cdot 10^{-6}$  – лінійний коефіцієнт розширення;

$E = 1.86 \cdot 10^{11}$  Па – модуль пружності;

$k$  – коефіцієнт форми для паралелепіпеда.

Такий нагрів потрібно вести до досягнення серцевиною сляба температури пластичного перетворення. Для сталі значення цієї температури приблизно дорівнює 500 °С. Після цього нерівномірність температурного поля по перетину сляба не викличе руйнувань.

Методика розрахунку на цьому етапі наступна:

1. Задати максимальну температуру печі.
2. Вести розрахунок нагріву до порушення умови (2) або до досягнення серцевиною температури в 500 °С;
3. При порушенні умови (2), знизити температуру печі та повернутися до пункту 2.
4. Якщо серцевина прогрілася до 500 °С, то розрахунок закінчено. Результатами розрахунку є час нагріву, температура поверхні сляба і температура печі.

Інтенсивний нагрів у першій та другій зварювальних зонах повинен забезпечити досягнення температурою поверхні сляба заданого значення. Тому методика розрахунку наступна: задавшись максимально можливою температурою печі, визначається час, за який поверхня прогріється до заданої за технологією прокатки температури.

У томильній зоні для запобігання перегріву металу необхідно знизити температуру робочого простору. Проводиться повільний нагрів металу до тих пір, поки різниця температур серцевини і поверхні сляба не стане менше або рівною заданій кінцевій різниці температур ( $\Delta T = 35 \div 45$  °С). При цьому необхідно, щоб температура поверхні металу після закінчення томління не відрізнялася від заданої температури нагріву більш ніж на 5 °С. В іншому випадку, змінюється температура томильної зони і проводиться повторний

розрахунок.

Основним процесом, що протікає в робочому просторі печі, є теплообмін, пов'язаний із спалюванням палива і рухом газів. По відношенню до металу, що нагрівається, процес теплообміну в робочому просторі печі ділиться на зовнішній і внутрішній. При зовнішньому теплообміні тепло передається від продуктів горіння палива і кладки печі до поверхні металу, що нагрівається. У методичних печах зовнішній теплообмін здійснюється головним чином шляхом випромінювання. При внутрішньому теплообміні тепло поширюється всередині металу. Умови зовнішнього і внутрішнього теплообміну визначаються температурним і тепловим режимом печі.

Розглянемо найбільш просту постановку двовимірної задачі теплопровідності, яка виникає при розрахунку симетричного нагріву довгої прямокутної заготовки [3], тому що приблизно такі умови є в методичній штовхальній печі (заготовки лежать цілком щільно один до одного по довжині печі). В цьому випадку можна вважати, що температурне поле змінюється лише в площині, перпендикулярній вісі заготовки. Введемо в цій площині систему координат  $XU$ , де  $X$  – довжина заготовки,  $U$  – товщина. Припускаючи, що теплофізичні властивості металу не залежать від температури, прийнемо середній коефіцієнт теплопровідності металу  $\lambda$ , масову теплоємність  $c$ , щільність сталі  $\rho$ . За допомогою них обчислимо коефіцієнт температуропровідності:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}. \quad (3)$$

Рівняння теплопровідності запишемо в наступному вигляді

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right). \quad (4)$$

З огляду на симетрію температурного поля будемо вважати, що температура верха заготовки дорівнює температурі її низу, а температури бічних граней теж рівні. На кордонах заготовки будемо вважати заданою граничну умову третього роду: температура навколишнього середовища дорівнює  $T_p = T(t)$ , наведений коефіцієнт випромінювання середовища  $C_{\text{пр}}$  і коефіцієнт тепловіддачі конвекцією  $\alpha$ .

Розіб'ємо перетин заготовки по довжині на  $m$  відрізків, а по товщині на  $n$  відрізків. Тепер перетин заготовки перетвориться в решітку з осередками розміром  $dx \times dy$  причому  $d = dx = dy$ , і кожна з них матиме координати  $i=1-n$  по товщині,  $j=1-m$  по довжині. Також розіб'ємо загальний час нагріву  $t$  на кінцеве число точок  $nt$  і додамо до наявних координат ще одну  $k$ , яка буде інформувати про поточний момент часу. Елементарний проміжок часу при цьому будемо вважати рівним

$$dt = \frac{t}{nt}. \quad (5)$$

Таким чином, задача зводиться до того, щоб знати температуру  $T(i, j, k)$  кожного елементарного осередку перетину злитка в будь-який момент часу при  $i=1-n$ ,  $j=1-m$ ,  $k=1-nt$ .

Припускаючи, що в початковий момент часу тіло є рівномірно прогрітим до температури  $T_{\text{поч}}$ , запишемо початкову умову

$$T(i, j, 0) = T_{\text{поч}}. \quad (6)$$

Завдання розрахунку температури перетину злитка буде складатися з двох залежних рішень задач зовнішнього і внутрішнього теплообміну.

Рішення завдання зовнішнього теплообміну полягає в знаходженні температури на

поверхні перетину злитка в наступний момент часу  $k+1$  в залежності від попереднього  $k$ -того. Питомі теплові потоки на верхню і на бічну поверхні металу обчислюються за формулами:

$$qV(1, j, k+1) = C_{np} \cdot \left( \left( \frac{T_p(k+1)}{100} \right)^4 - \left( \frac{T(1, j, k)}{100} \right)^4 \right) + \alpha \cdot (T_p(k+1) - T(1, j, k)). \quad (7)$$

$$qB(i, 1, k+1) = C_{np} \cdot \left( \left( \frac{T_p(k+1)}{100} \right)^4 - \left( \frac{T(i, 1, k)}{100} \right)^4 \right) + \alpha \cdot (T_p(k+1) - T(i, 1, k)). \quad (8)$$

Температура у верхніх і бічних граничних точках обчислюється наступним чином:

$$T(1, j, k+1) = T(1, j, k) + k2 \cdot qV + k1 \cdot (T(1, j-1, k) + T(1, j+1, k) + T(2, j, k) - 3 \cdot T(1, j, k)), \quad (9)$$

$$T(i, 1, k+1) = T(i, 1, k) + k2 \cdot qB + k1 \cdot (T(i-1, 1, k) + T(i+1, 1, k) + T(i, 2, k) - 3 \cdot T(i, 1, k)), \quad (10)$$

$$k1 = \frac{\lambda \cdot dt}{c \cdot \rho \cdot d}, \quad k2 = \frac{dt}{c \cdot \rho \cdot d}. \quad (11)$$

Маючи значення температури поверхні металу можна вирішити задачу внутрішнього теплообміну.

Для розрахунку нагріву масивних тіл користуються рішеннями диференціальних рівнянь теплопровідності при різних початкових і поверхневих умовах.

Рішення задачі внутрішнього теплообміну зводиться до знаходження температури кожного елементарного осередку перетину злитка, за винятком граничних, в наступний момент часу  $k+1$  в залежності від попереднього  $k$ -того. При цьому вважаємо, що осередок оточують інші чотири, з якими і відбувається теплообмін. Значення температури обчислюється за формулою:

$$T(i, j, k+1) = T(i, j, k) + a \cdot (T(i-1, j, k) + T(i+1, j, k) + T(i, j-1, k) + T(i, j+1, k) - 4 \cdot T(i, j, k)). \quad (12)$$

В результаті спільного рішення задачі зовнішнього і внутрішнього теплообміну реалізована динамічна модель для знаходження значень температур в кожній точці перетину злитка в будь-який момент часу.

Для апроксимації реальних процесів, що протікають в системі, використані процедури знаходження середніх значень параметрів. При вирішенні задачі моделювання нагріву металу застосована апроксимація диференціальних рівнянь, шляхом приведення їх до різницевої ітераційних схем, зручних для їх чисельної реалізації із застосуванням ЕОМ.

## ВИСНОВКИ

Розроблена математична модель дозволяє виконувати розрахунок нагріву металу в методичній печі з метою визначення параметрів технологічного процесу, за допомогою яких можна робити висновки про якісні показники регулювання процесу нагріву металу і про ТЕП роботи печі. Розроблена модель може бути використана при створенні комплексної системи управління режимом нагріву металу в методичних печах для забезпечення оптимальної роботи листопркатних цехів з досягненням мінімальної собівартості продукції.

*Перелік використаних джерел:*

1. Ключников, А.Д. Теплопередача излучением в огнетехнических установках /

А.Д. Ключников, Г.П. Иванцов. – М.: Энергия, 1970. – 400 с.

2. Суринов, Ю.А. О нестационарных задачах теории лучистого теплообмена / Ю.А. Суринов // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1997. – № 7. – С. 58-66.

3. Бухмиров, В.В. Некоторые аспекты современного состояния математического моделирования тепломассообменных процессов в технике / Бухмиров В.В., Крупенников С.А. // Изв. вузов. Чёрная металлургия. 2005. – № 1. – С. 47-52.

4. Гуковский, В.Л. Современные нагревательные и термические печи / В.Л. Гуковский, М.Г. Ладычичев, А.Б. Усачев. – М.: Машиностроение, 2001. – 656 с.

**Черевко Е.А., Щербаков С.В., Ермилин А.И., Титку В.В.**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ**

*Развитие современного металлургического производства сопровождается совершенствованием технологических процессов, реконструкцией методических печей с использованием новейших методов и средств управления, что позволяет более эффективно использовать энергоносители.*

*Внедрение автоматизированных систем на предприятиях черной металлургии, в частности в листопрокатном производстве, оказывает существенное влияние на повышение производительности, снижение удельных расходов электроэнергии, улучшение качества продукции. Конечной целью разработок является создание комплексной системы управления режимом нагрева металла в методической печи, что обеспечивает нормальную работу листопрокатного цеха при минимальной себестоимости продукции.*

*Главным критерием управления нагревательными печами является минимизация удельных затрат на осуществление нагрева с ограничениями по качественным показателям процесса, которыми являются температура поверхности металла и перепад температур по сечению заготовки. Это достигается минимизацией расхода топлива и потерь металла в окалину.*

*Основными параметрами системы, влияющими на ход технологического процесса, являются: температура в печи, расход энергоносителей, давление под сводом печи, теплофизические свойства металла и печных газов (теплоемкость, теплопроводность, плотность, геометрические размеры слитков, калорийность топлива и пр.), а также бесперебойность процессов нагрева в печи, что значительно улучшает ТЭП. Переменными параметрами являются плотность теплового потока в зонах, расход топлива и воздуха на зоны, давление в печи.*

*В работе рассмотрены основные подходы к созданию автоматизированной системы управления тепловой работой методической печи. Выполнен анализ математических методов описания теплофизических процессов нагрева металла в методической печи, разработан алгоритм расчета основных технологических параметров с программной реализацией на ЭВМ.*

**Ключевые слова:** автоматизация, методическая печь, нагрев металла, внутренний и внешний теплообмен, компьютерное моделирование.

**Cherevko E.A., Scherbakov S.V., Yermilin A.I., Titku V.V.****MATHEMATICAL MODELING OF HEAT OPERATION OF A METHODOLOGICAL FURNACE**

*The development of modern metallurgical production is accompanied by the perfection of technological processes, the reconstruction of methodological furnaces using the latest methods and controls, which allows more efficient use of energy.*

*The introduction of automated systems in the iron and steel industry, in particular in sheet-rolling production, has a significant impact on increasing productivity, lowering specific energy consumption, improving product quality. The ultimate goal of the development is the creation of an integrated system for controlling the mode of metal heating in the methodical furnace, which ensures the normal operation of the sheet rolling shop with a minimum cost of production.*

*The main criterion for controlling heating furnaces is to minimize the specific costs of heating, with restrictions on the quality indicators of the process, which are the surface temperature of the metal and the temperature difference over the cross section of the work piece. This is achieved by minimizing fuel consumption and metal loss in scale.*

*The main parameters of the system that affect the course of the technological process are: temperature in the furnace, energy consumption, pressure under the roof of the furnace, thermo-physical properties of metal and furnace gases (heat capacity, thermal conductivity, density, geometric dimensions of ingots, calorific value of fuel, etc.), as well uninterrupted heating processes in the furnace, which significantly improves the technical and economic indicators. Variable parameters are the heat flux density in the zones, fuel and air consumption per zone, and the pressure in the furnace.*

*The work considers the main approaches to the creation of an automated system for controlling the thermal work of a methodical furnace. The analysis of mathematical methods for describing the thermo-physical processes of metal heating in a methodical furnace is carried out, an algorithm for calculating the main technological parameters with a computer software implementation is developed.*

**Keywords:** *automation, methodical furnace, metal heating, internal and external heat transfer, computer simulation.*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. З.Є. Воротнікова

Стаття надійшла

**УДК 681.58**

**Чичкарьов Є.А., Сергієнко А.В., Станішевський Л.М.****ПОБУДОВА ТА НАЛАШТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ  
ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ РУКОПИСНИХ І ДРУКОВАНИХ ЦИФР НА  
ЗОБРАЖЕННЯХ ЧАВУНВОВОЗНИХ КОВШЕЙ**

*В роботі представлені результати побудови та випробування нейронної мережі глибокого навчання для розпізнавання рукописних цифр. Проаналізовані останні публікації з вирішення задач розпізнавання та розбору текстів за їх зображенням, обраний ряд прикладних бібліотек для створення програми для проведення експериментів: Keras, TensorFlow, Pandas, Matplotlib та інші. Побудована інформаційна технологія розпізнавання рукописних номерів чавуновозних ківшів за їхніми фотографіями. Для побудови і навчання моделі була обрана добре відома і досить повна база рукописних цифр MNIST. Модель для розпізнавання цифр*