

## Комплексна математична модель процесу плавлення шихти у дугових сталеплавильних печах

ЯЛОВА К.М.

Дніпродзержинський державний технічний університет

Запропоновано комплексну математичну модель процесів тепломасообміну, що мають місце під час плавлення металошихти в дугових сталеплавильних печах. Представлена математична модель враховує особливості і механізми теплопередачі для кожного етапу теплової роботи печі. Наведено спосіб чисельного розв'язання задач тепломасообміну в тривимірній постановці.

Ключові слова: математична модель, електродугова піч, теплообмін.

Предложена комплексная математическая модель процессов тепломассообмена, которые имеют место во время плавления металлошихты в дуговых сталеплавильных печах. Представленная математическая модель учитывает особенности и механизмы теплопередачи для каждого этапа тепловой работы печи. Приведен способ числового решения задач тепломассообмена в трехмерной постановке.

Ключевые слова: математическая модель, электродуговая печь, теплообмен.

The complex mathematical model of the processes of heat-mass transfer taking place during melting of metal-charge in the arc steel-making furnaces is proposed. The represented mathematical model takes into account the features and the mechanisms of heat transfer for each stage of the thermal work of furnace. The method of the numerical solution of the problems of heat-mass transfer in the three-dimensional setting is given.

Keywords: the mathematical model, electric arc furnace, heat exchange.

**Постановка проблеми.** В світовому виробництві сталі спостерігається невинний ріст долі електросталеплавильного виробництва, що зумовлено тим, що воно відрізняється більш низькими показниками енергоємності, викидів в навколишнє середовище, а також гнучкістю використання різних видів шихтових матеріалів. В цілому, прогнозується, що до 2015 року світове виробництво електросталі складе приблизно 35-40 % від загального об'єму виробленої сталі, а в Україні це значення складе 8-10 %. Зростаючий дефіцит енергоресурсів і зростання їх вартості викликає необхідність пошуку нових технологічних рішень при створенні нових і модернізації діючих дугових сталеплавильних печей, використання альтернативних джерел теплоти, удосконалення існуючих технологічних процесів для зниження питомих витрат енергоносіїв. Оптимізація технологічних процесів в дугових печах з метою скорочення енергоспоживання і скорочення тривалості плавлення є важливою і актуальною задачею при проведенні експериментальних і теоретичних досліджень. Очевидно, що проведення і аналіз промислових експериментів потребує суттєвих капіталовкладень, альтернативою цьому може бути створення математичних моделей та проведення чисельних експериментів.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Описанню теплофізичних процесів плавлення в дугових печах при використанні математичних моделей присвячено досить обмежений ряд наукових робіт. Необхідно зауважити, що жодна з існуючих математичних моделей та фізичних описів теплової роботи печей не враховує всі існуючі механізми і способи передачі теплоти під час теплової роботи дугових печей. Зокрема, не знайшли належного відображення такі теплофізичні особливості, як: конвективний теплообмін між технологічними газами, що виділяються в результаті екзотермічних реакцій та поверхнею кускового матеріалу шихти; конвективний теплообмін між розплавленим металом, що стікає через шихту та обмін теплотою при цьому; не береться до уваги радіаційний теплообмін між шихтою і електродами, що відбувається в колодах; недостатньо врахований той факт, що плавлення металевго брухту відбувається в інтервалі

ліквідус-солідус; не береться до уваги ситуація, яка має місце в системі теплообміну „шихта – вогнетривка футеровка – металевий каркас – навколишня атмосфера”; не завжди враховується залежність теплофізичних властивостей матеріалів шихти та вогнетривкої футеровки; не встановлено вплив використання додаткових джерел теплоти, зокрема, паливнокисневих пальників для плавлення в периферійних зонах печі.

**Формулювання мети роботи.** Визначення температурного поля та кінетики плавлення шихти, розташованої у робочому просторі печі, представляє собою завдання класу нелінійних задач тепломасообміну. Перш за все, нелінійність у цьому випадку полягає в тому, що розглядуваний об'єкт по суті є гетерофазною системою з рухомою границею розділу фаз. При наявності випускних жолобів, еркерів або завалочних отворів використання двовимірної математичної моделі вносить похибку в розрахунки. Доцільність проведення розрахунків процесу розплавлення металошихти в дугових печах в тривимірній постановці виникає при необхідності врахування можливих додаткових конструктивних і технологічних особливостей печей, що можуть суттєво впливати на точність результатів обчислення для багатовантажних печей. Метою роботи є створення комплексної тривимірної математичної моделі процесу плавлення металошихти, алгоритму чисельного розв'язання задач тепломасообміну і програми для ЕОМ для моделювання теплової роботи дугових сталеплавильних печей.

**Результати роботи.** Умовно період плавлення можна поділити на чотири етапи [1]: запалення дуг, проплавлення колодязів, етап закритого горіння дуг і етап доплавлення відкритими дугами. Існує два способи завантаження металошихти в піч: так звана завалка „на суху” і завалки з використання залишку рідкого металу попередньої плавки. В залежності від способу завалки шихти змінюється механізм і схема теплопередачі в робочому просторі дугової печі на початкових етапах її теплової роботи. Основне тепловиділення формується за рахунок дуг електродів у шихті [2]. Це тепловиділення, в основному, призначене для нагріву, розплавлення та доведення металу до заданого складу і температури.

Розподілення температури в об'ємі шихти, „болота” та футеровки на всіх стадіях теплової роботи печі описується відповідно рівняннями теплопровідності (1-3).

$$c_{uw}\rho_{uw}\frac{\partial T_{uw}}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\lambda_{uw}r\frac{\partial T_{uw}}{\partial r}) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}(\lambda_{uw}\frac{\partial T_{uw}}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{uw}\frac{\partial T_{uw}}{\partial z});$$

$$Z_{\phi} < z \leq Z_{uw}; 0 \leq r \leq R_{uw}; \quad (1)$$

$$c_{\phi}\rho_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\lambda_{\phi}r\frac{\partial T_{\phi}}{\partial r}) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}(\lambda_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial z});$$

$$Z_{\phi} < z \leq Z_{\phi}; 0 \leq r \leq R_{uw}; \quad (2)$$

$$c_{\phi}\rho_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\lambda_{\phi}r\frac{\partial T_{\phi}}{\partial r}) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}(\lambda_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial z});$$

$$0 \leq z \leq Z_{\phi}; R_{uw} < r \leq R_n. \quad (3)$$

Рівняння (1)–(3) доповнюються відповідними для кожного етапу роботи печі крайовими умовами.

На етапі запалення дуг вогнетривка кладка футеровки печі має деяку кількість теплоти, акумульованої від попередньої плавки. Внаслідок чого мається певний розподіл температури по перерізу футеровки у початковий момент часу  $\tau = \tau_0$  при завалці наступної порції холодної металеві шихти. Склепіння печі отримує енергію в результаті променевого теплообміну. Верхня поверхня шихти, склепіння печі, незакрита шихтою поверхня футеровки стін та випромінювальна поверхня електроду отримують енергію в результаті променевого теплообміну з дугою. Теплота в об'ємі шихти і „болота” розповсюджується в результаті теплопровідності. Між футеровкою бокових стін, подиною печі та шихтою діє контактний теплообмін. При веденні плавки з використанням початкового „болота”, на границі „болота” і твердої шихти та „болота” і футеровки подини реалізується умова контактного теплообміну. Рухливих границь в об'ємі шихти і „болота” на етапі, що розглядається, немає.

Початковими умовами для етапу розпалення дуг є:

$$\tau_0 \leq \tau \leq \tau_1; T_{uw}(\tau = 0) = T_{uw}^0; T_{\phi}(\tau = 0) = T_{\phi}^0;$$

$$T_{\phi\phi}(\tau = 0, r) = T_1 - \Delta T_1 \left( \frac{R_{uw} - r}{R_n - R_{uw}} \right), R_{uw} \leq r \leq R_n;$$

$$T_{\phi\phi}(\tau = 0, z) = T_3 - \Delta T_2 \left( \frac{Z_{\phi} - z}{Z_{\phi}} \right), 0 \leq z \leq Z_{\phi}. \quad (4)$$

Джерелом теплоти в об'ємі шихти на етапі проплавлення колодязів є енергія електричних дуг, енергія згоряння палива в пальниках (при їхньому використанні), теплота „болота”, теплота футеровки печі, акумульованої від попереднього етапу. Колодязі, що утворюються на протязі цього періоду, екранують електричні дуги, завдяки чому променеву енергію дуги отримує тільки поверхня шихти безпосередньо під електродами. Також береться до уваги теплообмін випромінюванням в системі поверхня електродів – бокова поверхня шихти у колодязях. На боковій поверхні шихти, в областях її зіткнення з футеровкою стін та на границі зіткнення „болота” і футеровки подини печі реалізуються умови

контактного теплообміну. Верхня поверхня шихти, поверхня склепіння та відкрита поверхня футеровки стін складають на даному етапі замкнену систему сірих тіл, між якими відбувається теплообмін випромінюванням. В результаті проплавлення колодязів розплавлений метал стікає вниз під дією сили тяжіння, передаючи при цьому свою ентальпію розташованим нижче шарам шихти. При цьому відбувається конвективний теплообмін між шихтою та стікаючим металом. Теплота в об'ємі шихти і „болота” розповсюджується в результаті теплопровідності. На границі „болота” і шихти реалізується умова безпосереднього теплового контакту з рухливою границею розділу фаз. При досягненні електричною дугою поверхні „болота” на поверхню рідкого метала усередині колодязів вноситься вапно для наведення шлаку, і частина теплоти „болота” витрачається на його розплавлення. Рухливими границями в період проплавлення колодязів є верхня границя „болота”  $Z_{\phi}(\tau)$ , що переміщується із-за стікання в нього рідкого металу, границі областей колодязів  $Z_{ik}(\tau)$ , а також границя бокової поверхні шихти в зоні дії газокисневих пальників (за умови роботи вказаних пальників). Теплота внутрішньої поверхні футеровки стін передається теплопровідністю до зовнішньої поверхні, яка в свою чергу вступає в конвективно-радіаційний теплообмін з навколишнім середовищем.

Для етапу проплавлення колодязів початковими умовами є:

$$\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2; T_{uw}(\tau = \tau_1) = T_{uw1}; T_{\phi}(\tau = \tau_1) = T_{\phi1};$$

$$T_{\phi\phi}(\tau = \tau_1) = T_{\phi\phi1}; T_{\phi\phi}(\tau = \tau_1) = T_{\phi\phi1} \quad (5)$$

Джерелом теплоти в період закритого плавлення є електричні дуги, теплота пальників (при їх наявності), теплота „болота”, теплота екзотермічних реакцій, теплота відхідних пічних газів. На боковій поверхні шихти в областях її зіткнення з футеровкою стін, та в області зіткнення „болота” з подом і боковою стіною печі реалізується умова контактного теплообміну. Об'єми шихти, що розташовані в зоні безпосередньої дії газокисневих пальників, отримують енергію згоряння палива. В період продувки киснем шихті передається енергія від протікання окислювальних реакцій. Верхня поверхня шихти отримує енергію в результаті поглинання променевої енергії, що випромінюється футеровкою склепіння та відкритою поверхнею стін печі. Теплота в об'ємі шихти, „болота”, рідкого шлаку і футеровки печі поширюється в результаті теплопровідності. Теплота в об'ємі шихти розповсюджується також в результаті конвективного теплообміну з відхідними пічними газами. Рухливими границями на цьому етапі є границя „болота”, границя колодязів, верхня границя шихти. До рівнянь теплопровідності (1-3) для етапу закритого горіння дуг додається рівняння теплопровідності для шлакового прошарку і наступні початкові умови:

$$c_{uw}\rho_{uw}\frac{\partial T_{uw}}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\lambda_{uw}r\frac{\partial T_{uw}}{\partial r}) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}(\lambda_{uw}\frac{\partial T_{uw}}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{uw}\frac{\partial T_{uw}}{\partial z});$$

$$Z_{\phi} < z \leq Z_{uw}; \quad (6)$$

$$\tau_2 \leq \tau \leq \tau_3; T_{\phi}(\tau = \tau_1 + \tau_2) = T_{\phi2}, T_{\phi\phi}(\tau = \tau_1 + \tau_2) = T_{\phi\phi2}$$

$$T_{\phi\phi}(\tau = \tau_1 + \tau_2) = T_{\phi\phi2}. \quad (7)$$

Джерелом теплоти в період доплавлення шихти відкритими дугами є енергія електричних дуг, теплота „болота”, теплота футеровки склепіння печі і відкритої поверхні її стін. На боковій поверхні шихти в областях її зіткнення з футеровкою стін та в області «болота» з подиною печі реалізується умова контактного теплообміну. Верхня поверхня шихти і внутрішня поверхня утвореного загального колодязя отримує енергію за рахунок поглинання променевої енергії, яка випромінюється та відбивається футеровкою склепіння печі і відкритою поверхнею стін, а також енергію електричної дуги. Період відкритого горіння дуг завершується тоді, коли розплавляється вся маса твердої шихти. Початковою умовою для рівнянь (1)-(3), (6) для періоду доплавлення відкритими дугами є поле температур для шихти  $T_{uu}(\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = T_{uu3}$ , „болота”  $T_{\phi}(\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = T_{\phi3}$ , футеровки стін  $T_{\phi\phi}(\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = T_{\phi\phi3}$ , футеровки подини  $T_{\phi\phi}(\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = T_{\phi\phi3}$  та шлакового прошарку  $T_{uu\ell}(\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = T_{uu\ell3}$  за умови  $\tau_3 \leq \tau \leq \tau_4$ .

До початкових умов для кожного розглядуваного етапу роботи печі додаються граничні умови. Загальними граничними умовами для всіх етапів плавлення шихти є умови:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T_{uu}}{\partial r} \right|_{r=0} &= 0; \quad \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \\ \lambda_{uu} \left. \frac{\partial T_{uu}}{\partial z} \right|_{z=Z_{uu}} &= \varepsilon_{np} \sigma_0 \left( (T_{\phi} + 273)^4 - (T_{uu} + 273)^4 \right); \\ \left\{ \begin{aligned} \lambda \left. \frac{\partial T_{uu}}{\partial r} \right|_{r=R_{uu}} &= \lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial r} \right|_{r=R_{uu}}; \\ T_{uu}|_{r=R_{uu}} &= T_{\phi}|_{r=R_{uu}} \end{aligned} \right. \\ \left\{ \begin{aligned} \lambda_{uu} \left. \frac{\partial T_{uu}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\phi}} &= \lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\phi}}; \\ T_{uu}|_{z=Z_{\phi}} &= T_{\phi}|_{z=Z_{\phi}} \end{aligned} \right. \\ \left\{ \begin{aligned} \lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \right|_{r=R_{uu}} &= \lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \right|_{r=R_{uu}}; \\ T_{\phi}|_{r=R_{uu}} &= T_{\phi}|_{r=R_{uu}} \end{aligned} \right. \\ -\lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial r} \right|_{r=R_n} &= \alpha_{\Sigma} (T_{\phi}(r=R_n) - T_c). \end{aligned} \quad (8)$$

У випадку, коли злив металу відбувається за рахунок використання механізму нахилу печі для границі між нижньою поверхнею футеровки подини і навколишнім середовищем задається гранична умова для радіаційно-конвективного теплообміну:

$$-\lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha_{\Sigma} (T_{\phi}(z=0) - T_c). \quad (9)$$

За умови стаціонарного розташування печі нижня поверхня футеровки вступає в контактний теплообмін з фундаментом печі, при цьому задається гранична умова IV роду:

$$\begin{cases} \lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \right|_{z=0} = \lambda_{\phi_{ун}} \left. \frac{\partial T_{\phi_{ун}}}{\partial z} \right|_{z=0} \\ T_{\phi}|_{z=0} = T_{\phi_{ун}}|_{z=0} \end{cases} \quad (10)$$

За умови завантаження металошихти на суху подину задається наступна гранична умова:

$$\begin{cases} \lambda_{uu} \left. \frac{\partial T_{uu}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\phi}} = \lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\phi}} \\ T_{uu}|_{z=Z_{\phi}} = T_{\phi}|_{z=Z_{\phi}} \end{cases} \quad (11)$$

При завантаженні шихти на залишок рідкого металу від попередньої плавки використовується гранична умова:

$$\begin{cases} \lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\phi}} = \lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\phi}} \\ T_{\phi}|_{z=Z_{\phi}} = T_{\phi}|_{z=Z_{\phi}} \end{cases} \quad (12)$$

Для етапу проплавлення колодязів граничні умови (8) доповнюються наступними умовами, що дають змогу врахувати радіаційний теплообмін між дугою, боковою поверхнею електродів та шихтою і конвективний теплообмін з рідким стікаючим металом в зоні роботи дуг.

$$\begin{aligned} -\lambda_{uu} \left. \frac{\partial T_{uu}}{\partial r} \right|_{r=R_{ki}} &= \varepsilon_{np2} \sigma_0 \left( (T_{el} + 273)^4 - (T_{uu}(r=R_{ki}) + 273)^4 \right); \\ -\lambda_{uu} \left. \frac{\partial T_{uu}}{\partial z} \right|_{z=Z_{ki}(\tau)} &= \varepsilon_{np1} \sigma_0 \left( (T_{dugu} + 273)^4 - (T_{uu}(z=Z_{ki}(\tau)) + 273)^4 \right); \\ \lambda_{uu} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{(z=F_{uu})} &= \alpha_{vpp} (T_{pm} - T_{uu}); \\ \lambda_{uu} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{(r=R_{ki})} &= \alpha_{vpp} (T_{pm} - T_{uu}). \end{aligned} \quad (13)$$

До граничних умов (8) для етапу закритого горіння дуг додаються умови, що дають змогу врахувати теплообмін між шлаковим прошарком та „болотом” і конвективний теплообмін з відхідними пічними газами та металошихтою:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T_{uu\ell}}{\partial r} \right|_{r=0} &= 0; \quad \left\{ \begin{aligned} \lambda_{uu\ell} \left. \frac{\partial T_{uu\ell}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\phi}} &= \lambda_{\phi} \left. \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\phi}} \\ T_{uu\ell}|_{z=Z_{\phi}} &= T_{\phi}|_{z=Z_{\phi}} \end{aligned} \right. \\ \lambda_{uu} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=Z_{uu}} &= \alpha_V (T_c - T_{uu}). \end{aligned} \quad (14)$$

На етапах закритого і відкритого горіння дуг має місце додатковий прогрів шихтових матеріалів за рахунок теплоти екзотермічних реакцій і теплоти спалювання природного газу у пальниках, що працюють в об'ємі „болота”. Тепловий ефект від зазначених джерел теплоти враховується введенням до рівняння теплопровідності (1) членів  $Q_{екз}$ ,  $Q_{нал}(r, \varphi, z, \tau)$ .

Для врахування фазового переходу від твердого до рідкого стану завалочних матеріалів, зміни їх властивостей і виділення теплоти фазового переходу в інтер-

валі температур солідус ( $T_S$ ) – ліквідус ( $T_L$ ), використовуються наступні припущення:

$$c_{\sigma} = \begin{cases} c_{ш}(T), T < T_S; \\ c_{ш}(T) - \frac{Q}{T_L - T_S}, T_S \leq T \leq T_L; \\ c_{\sigma}(T), T \geq T_L. \end{cases}$$

$$\rho_{\sigma} = \begin{cases} \rho_{ш}(T), T < T_S; \\ \frac{\rho_{ш} + \rho_{\sigma}}{2}, T_S \leq T \leq T_L; \\ \rho_{\sigma}(T), T \geq T_L. \end{cases} \quad \lambda_{\sigma} = \begin{cases} \lambda_{ш}(T), T < T_S; \\ \frac{\lambda_{ш} + \lambda_{\sigma}}{2}, T_S \leq T \leq T_L; \\ \lambda_{\sigma}(T), T \geq T_L. \end{cases} \quad (15)$$

Рівняння (1)-(3),(6) доповнюються рівняннями залежностей теплофізичних параметрів від температури.

Для розв'язання тривимірних рівнянь теплопровідності використовується метод кінцевих різниць, що дозволяє представити тривимірні рівняння теплопровідності у вигляді систем одновимірних алгебраїчних рівнянь. При використанні методу кінцевих різниць важливим етапом є розбивка робочого простору печі розрахунковою сіткою. Вибір розрахункової чарунки зумовлено особливостями геометрії печі, що дає змогу більш точно виконувати розрахунки.

В залежності від особливостей теплообміну і механізмів передачі теплоти розрахункові чарунки в розрахунковій області печі об'єднуються в контрольні об'єми, схема яких наведена на рис.1 .

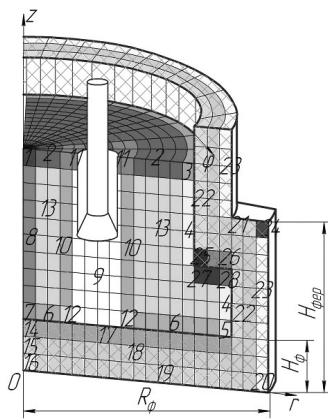


Рис. 1. Схема контрольних об'ємів

Створення алгебраїчних аналогів рівнянь математичної моделі виконується з урахуванням розщеплення теплових погоків по координатам  $r, z, \varphi$  [3]. При розрахунках використовуємо метод інтегральних тотожностей. Результатом використання цього методу є одновимірні різницеві рівняння теплопровідності, розщеплені по осьовому, радіальному і кутовому напрямку.

В результаті виконання розрахунку процесу плавлення шихти отримуємо наступні величини: час плавлення на кожній стадії плавлення шихти, загальну тривалість розплавлення, розподілення температури, величини мас, об'ємів, меж шихти і «болота» на кожному часовому і розрахунковому шарі. Наприклад, розподі-

лення температури в момент завершення етапу проплавлення колодязів представлена на рис. 2.

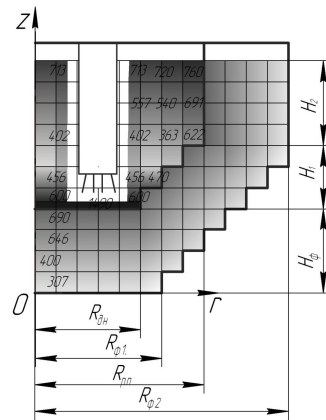


Рис. 2. Розподіл температури в момент завершення етапу проплавлення колодязів

Адекватність створеної математичної моделі доводилась шляхом порівняння розрахункових даних з даними промислових плавок діючих печей. Розрахункова похибка не перевищує 4%, що вказує на достатній рівень відповідності математичної моделі існуючим фізичним процесам.

Створення на основі розробленого алгоритму розрахунку програма для ЕОМ дозволяє розраховувати процес плавлення металошихти у дугових печах. Слід відмітити, що створення такого програмного продукту дає можливість моделювати процес плавлення для будь-яких дугових печей, на основі вихідних даних створювати більш ефективні способи ведення плавки, не витрачаючи при цьому фінансові та матеріальні ресурси для проведення промислової експериментів.

**Висновки**

Представлено розроблену математичну модель теплової роботи дугових печей з урахуванням технологічних і теплофізичних особливостей процесу плавлення металошихти. Створена математична модель, алгоритм і програма розрахунку дозволяє отримати інформацію щодо динаміки протікання теплофізичних процесів в робочому просторі печі, що можуть бути використанні для удосконалення існуючих і створення нових технологічних інструкцій з метою підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей, – М.: Металлургия, 1981. – 320 с.
2. Макаров А.Н Теплообмен в дуговых сталеплавильных печах: Учеб. пособие, – Тверь: ТГТУ, 1998. – 183 с.
3. Самарский А.А. Введение в численные методы: Учебное пособие для студентов вузов, – М.: Наука, 1982. – 271 с.