

- са Шевченка. — К. : ВІКНУ, 2010. — Вип. 25. С. 95—101.
4. Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Чуйко А. С. Алгоритм оптимізації композиційних планів експерименту методом послідовного наближення // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. — 2012. — №6(82). — С. 249—254.
 5. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B*. — 1996. — №26. — С. 1—13.
 6. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique // *IRIDIA — Technical Report Series*. — 2006. — №23. — С. 3—14.
 7. Dorigo M., Gambardella L. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. — 1997. — №1. — С. 12—36.
 8. Rezazadeh G., Kouravand S., Mehrban M. MEMS Capacitive Thermal Sensor Sensitivity Investigation Using Full Factorial Design Method // *Sensors & Transducers*. — 2006. — №10(72). — С. 754—760.

пост.15.04.13

Математичне моделювання початкової стадії теплової роботи багатовантажних дугових сталеплавильних печей

М. І. ЯЛОВИЙ, К. М. ЯЛОВА

Дніпродзержинський державний технічний університет

Запропоновано математичну модель початкової стадії теплової роботи багатовантажної дугової сталеплавильної печі, що враховує особливості теплообміну при використанні технології завантаження шихти на залишок розплаву від попередньої плавки. Шляхом чисельного розрахунку встановлена залежність тривалості плавлення і витрати електроенергії від первинних мас залишкового розплаву.

Предложена математическая модель начальной стадии тепловой работы большегрузной дуговой сталеплавильной печи, которая учитывает особенности теплообмена при использовании технологии загрузки шихты на остаток расплава от предыдущей плавки. Путем численного расчета установлена зависимость длительности плавления и расхода электроэнергии от начальных масс расплава.

The mathematical model of an initial stage of thermal operation of the heavy-load arc steel-making furnace which considers features of heat exchange when using technology of loading of furnace charge for the fusion rest from the previous melting is proposed. By numerical calculation dependence of duration of melting and an electric power expense on the initial mass of fusion is established.

Вступ. Плавлення металошихти в багатовантажних дугових сталеплавильних печах (ДСП) потребує значної витрати електроенергії, і в умовах постійного підвищення цін на енергоресурси питання зменшення промислових витрат стає дедалі актуальнішою, а задача пошуку енергоефективних режимів роботи теплотехнологічного обладнання не минає жодне виробництво. Ведення плавки із завантаженням шихти на залишок розплаву від попередньої плавки („болото”) призводить до підвищення продуктивності дугових печей та зменшення загальної тривалості плавки і широко використовуються при роботі багатовантажних ДСП.

Найбільш енергоємним етапом роботи сучасної ДСП є стадія розплавлення шихти, під час якої витрачається до 80% від загальної кількості витраченої на плавку енергії [1]. Використання апарату математичного моделювання та проведення чисельних розрахунків із використанням ЕОМ стає доцільною альтернативою дорогим промисловим експериментам та опитам.

Аналіз досліджень і публікацій. Не зважаючи на невинне зростання долі електросталеплавильного виробництва у виготовленні сталі аналізу теплофізичних процесів, що відбуваються в робочому просторі дугових печей, присвячено велими обмежений перелік робіт. В роботах Єгорова А.В., Нікольського Л.Е., Моржина А.Ф., Ігнатова І.І. [1-3] наведені загальні відомос-

ті про способи і технології, що використовуються для інтенсифікації процесу плавлення металошихти. При цьому не встановлено взаємний вплив використовуваних технологій на тепловий баланс і тривалість плавки. А процес плавлення не розглядається достатнім чином з точки зору теорії тепломасообміну з врахуванням законів і механізмів передачі теплоти на кожній окремій стадії теплової роботи печі і в процесі плавки в цілому, а основною метою математичного моделювання у згаданих працях є визначення тривалості розплавлення металошихти в залежності від електричного режиму роботи печі. Не приділяється достатньо уваги відмінності теплових процесів, що мають місце на початкових стадіях роботи печі в залежності від способу завантаження шихти з використанням завалки на суху, очищену від попередньої плавки подину і з використанням залишку від попередньої плавки, що фактично виступає додатковим джерелом теплоти. Не встановлена залежність часу розплавлення шихти та витрат електроенергії від початкової маси „болота”. Теплообмін між твердою шихтою та розплавом описується як конвективний теплообмін, ігноруючи той факт, що рух рідкого металу є стисненим, тобто цілком доцільно розглядати в даному випадку співіснування двох шарів з непорушними середовищами. Крім того, не береться до уваги ситуація, яка має місце в системі теплообміну „шихта – вогнетривка

футеровка – металевий каркас – навколишня атмосфера”.

Формулювання мети роботи. Метою даної роботи є розробка математичної моделі стосовно початкового етапу теплової роботи ДСП, проведення чисельного моделювання процесу плавлення металошихти при використанні „болота” з метою визначення його впливу на тривалість процесу плавлення металошихти в робочому просторі багатовантажних дугових сталеплавильних печей. Внесення уточнення стосовно особливостей теплообміну на початкових етапах роботи ДСП із використанням технології завалки на „болото”.

Визначення температурного поля та кінетики плавлення шихти, розташованої у робочому просторі печі, представляє собою завдання класу тепломасообміну в пористому об’єкті з рухомою поверхнею розділу фаз при дії внутрішніх теплових джерел та нелінійними крайовими умовами.

Результати роботи. В процесі створення математичної моделі теплової роботи ДСП постає питання про те, як розглядати шихту плавильної печі, яка має суттєву пористу структуру, зважаючи на те, що сучасна теорія теплопровідності ігнорує цей факт і вважає тверді тіла суцільними. Оскільки, зробити аналіз явища теплопровідності між усіма окремими кусками шихти не представляється можливим одним із способом вийти із цього становища є представлення пористої шихти як суцільної структури з деяким віртуальним коефіцієнтом теплопровідності. Зокрема використовуючи формулу:

$$\lambda_{ш} = \lambda \frac{1-f}{1+\frac{f}{2}},$$

де $\lambda_{ш}$ – віртуальний коефіцієнт теплопровідності шихти, λ – дійсний коефіцієнт теплопровідності металічних кусків шихти, f – порозність шихти.

Теплообмін при проведенні плавки в багатовантажних печах із використанням „болота” суттєво відрізняється від технології завантаження на суху подину лише на початкових стадіях роботи печі. Перший період плавлення в ДСП – запалення дуг починається із завалки підготовлених до розплавлення шихтових матеріалів. Схематично етап запалення дуг із використанням завалення твердої шихти на «болото» – наведено на рис. 1.

У цьому випадку, на протязі періоду запалення дуг, джерелом теплоти є енергія електричної дуги (q_1), що поглинається верхніми шарами шихти, теплота «болота» (q_9), теплота футеровки стін та склепіння печі (q_2 , q_3), при наявності рухливої границі Z_6 – верхньої границі «болота» і $Z_{ш}$ – верхньої границі шихти.

В ситуації теплопередачі між «болотом» і футеровкою подини (q_7), розплав на протязі всієї роботи печі прогріває її. У цьому випадку на початку періоду футеровка має по перерізу деякий розподіл температури у межах нижня поверхня «болота» – нижня зовнішня поверхня футеровки.

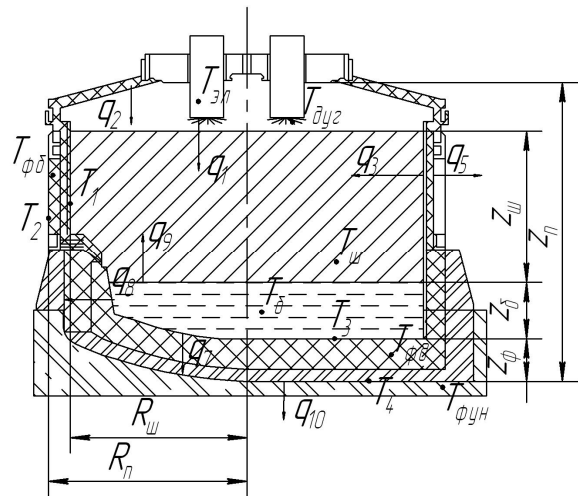


Рис. 1. Схема завалки шихти з використанням «болота»

Шихта має початкову температуру, при котрій вона була засипана в простір печі. Футеровка стін печі, що екранована шихтою, не отримує променисту енергію дуг (q_1), а зміна температури відбувається за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем (q_5), шихтою (q_3) або «болотом» (q_7 - q_8).

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. Робочий простір печі ще не заповнений пічними газами (оскільки значне їх виділення починається при прогріві шихти до температури 500-700 °С), тобто атмосфера печі є прозорою та проникним середовищем.

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 (q_9) та «болота» і футеровки подини реалізується умова контактного теплообміну, оскільки рух „болота” відсутній. Рухливих границь в об’ємі шихти і «болота» на етапі, що розглядається, немає.

За умови використання технології плавлення металошихти на «болото» розподілення температури в об’ємі шихти, «болота», футеровки стін та поду на першій стадії $\tau_0 \leq \tau \leq \tau_1$ описується системою рівнянь теплопровідності в циліндричних координатах:

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

$$Z_6 < z < Z_{ш}, 0 < r < R_{ш}; \quad (1)$$

$$c_6 \rho_6 \frac{\partial T_6}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda_6 r \frac{\partial T_6}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial z})$$

$$Z_\phi < z < Z_6, 0 < r < R_{ш}; \quad (2)$$

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

$$0 < z < Z_{\phi}, \quad 0 < r < R_{u}; \quad (3)$$

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

$$0 < z < Z_n, \quad R_u < r < R_n, \quad (4)$$

де тут і далі $T_{u\delta} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура шихти; $c_{u\delta} = f(T_{u\delta})$, $\lambda_{u\delta} = f(T_{u\delta})$, $\rho_{u\delta} = f(T_{u\delta})$ – масова теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, щільність шихти відповідно; r, φ, z – координати в циліндричній системі координат, $0 \leq r \leq R_n$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $0 \leq z \leq Z_{u\delta}$, R_n – радіус печі, $Z_{u\delta}$, Z_{ϕ} , Z_{δ} – відповідно висота завалки, висота первинного «болота» та висота футеровки подини; $c_{\phi\delta} = f(T_{\phi\delta})$, $\lambda_{\phi\delta} = f(T_{\phi\delta})$, $\rho_{\phi\delta} = f(T_{\phi\delta})$, $T_{\phi\delta} = f(r, \varphi, z, \tau)$, $c_{\delta} = f(T_{\delta})$, $\lambda_{\delta} = f(T_{\delta})$, $\rho_{\delta} = f(T_{\delta})$, $T_{\delta} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – відповідно масова теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, щільність, температура футеровки днища та стін; $T_{\phi} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура «болота»; $c_{\phi} = f(T_{\phi})$, $\lambda_{\phi} = f(T_{\phi})$, $\rho_{\phi} = f(T_{\phi})$ – відповідно масова теплоємність, коефіцієнт теплопровідності і щільність «болота».

Для врахування фазового переходу від твердого до рідкого стану завалочних матеріалів, зміни їх властивостей і виділення теплоти фазового переходу в інтервалі температур солідус (T_S) – ліквідус (T_L), використовується припущення:

$$c_{\delta} = \begin{cases} c_{u\delta}(T), T < T_S; \\ c_{u\delta}(T) - \frac{Q}{T_L - T_S}, T_S \leq T \leq T_L; \\ c_{\phi\delta}(T), T \geq T_L. \end{cases} \quad (5)$$

$$\rho_{\delta} = \begin{cases} \rho_{u\delta}(T), T < T_S; \\ \frac{\rho_{u\delta} + \rho_{\phi\delta}}{2}, T_S \leq T \leq T_L; \\ \rho_{\phi\delta}(T), T \geq T_L. \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda_{\delta} = \begin{cases} \lambda_{u\delta}(T), T < T_S; \\ \frac{\lambda_{u\delta} + \lambda_{\phi\delta}}{2}, T_S \leq T \leq T_L; \\ \lambda_{\phi\delta}(T), T \geq T_L. \end{cases} \quad (7)$$

де Q – теплота фазового переходу в інтервалі температур солідусу і ліквідусу.

До диференціальних рівнянь (1-4) треба додати наступні початкові умови

$$T_{u\delta}(\tau = 0) = T_{u\delta}^0; \quad T_{\delta}(\tau = 0) = T_{\delta}^0;$$

$$T_{\phi\delta}(\tau = 0, r) = T_2 - \Delta T_1 \left(\frac{R_u - r}{R_n - R_u} \right), \quad R_u \leq r \leq R_n; \quad (8)$$

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

де τ – час, $T_{u\delta}^0$, T_{δ}^0 – відповідно початкова температура шихти і «болота», $T_{\phi\delta}(\tau = 0, r)$ – функція розподілу температури по перерізу бокової вогнетривкої стінки у момент часу $\tau = 0$, $T_{\phi\delta}(\tau = 0, z)$ – функція розподілу температури по перерізу футеровки подини у момент часу $\tau = 0$, T_1 – початкова температура внутрішньої поверхні бокової стінки, T_2 – початкова температура зовнішньої поверхні бокової стінки, $\Delta T_1 = T_1 - T_2$ – різниця температури між внутрішньою і зовнішньою поверхнею бокової стінки печі, T_3 , T_4 – відповідно початкова температура внутрішньої та зовнішньої поверхні футеровки подини, $\Delta T_2 = T_3 - T_4$ – різниця температури між цими поверхнями.

До початкових треба додати граничні умови: так на вісі симетрії печі для шихти та «болота» задана умова симетрії

$$\left. \frac{\partial T_{u\delta}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial T_{\delta}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (9)$$

На границі шихта – футеровка бокових стін задана гранична умова IV роду

$$\begin{cases} \lambda_{u\delta} \frac{\partial T_{u\delta}}{\partial r} \Big|_{r=R_u} = \lambda_{\phi\delta} \frac{\partial T_{\phi\delta}}{\partial r} \Big|_{r=R_u} \\ T_{u\delta} \Big|_{r=R_u} = T_{\phi\delta} \Big|_{r=R_u} \end{cases} \quad (10)$$

На границі футеровка бокових стін – навколишнє середовище задана гранична умова третього роду

$$-\lambda_{\phi\delta} \frac{\partial T_{\phi\delta}}{\partial r} \Big|_{r=R_n} = \alpha_{\Sigma} (T_{\phi\delta}(r=R_n) - T_c), \quad (11)$$

де α_{Σ} – сумарний коефіцієнт тепловіддачі від футеровки бокової поверхні печі до навколишнього середовища при конвективно-радіаційному теплообміні, T_c – температура навколишнього середовища.

На границі «болото» – шихта ($z = Z_{\phi}$) задана гранична умова IV роду

$$\begin{cases} \lambda_{u\delta} \frac{\partial T_{u\delta}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{\phi}} = \lambda_{\phi\delta} \frac{\partial T_{\phi\delta}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{\phi}} \\ T_{u\delta} \Big|_{z=Z_{\phi}} = T_{\phi\delta} \Big|_{z=Z_{\phi}} \end{cases} \quad (12)$$

На границі «болото» – поверхня футеровки подини та на границі «болото» – футеровка бокової поверхні печі задаються граничні умови IV роду

$$\begin{cases} \lambda_{\phi\delta} \frac{\partial T_{\phi\delta}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{\phi}} = \lambda_{\phi\delta} \frac{\partial T_{\phi\delta}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{\phi}} \\ T_{\phi\delta} \Big|_{z=Z_{\phi}} = T_{\phi\delta} \Big|_{z=Z_{\phi}} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial z} \Big|_{r=R_{uu}} = \lambda_{\phi\delta} \frac{\partial T_{\phi\delta}}{\partial z} \Big|_{r=R_{uu}} \\ T_{\phi} \Big|_{r=R_{uu}} = T_{\phi\delta} \Big|_{r=R_{uu}} \end{cases} \quad (14)$$

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

$$-\lambda_{\phi\delta} \frac{\partial T_{\phi\delta}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{\Sigma} (T_{\phi\delta}(z=0) - T_c), \quad (15)$$

де α_{Σ} – сумарний коефіцієнт тепловіддачі від поверхні подини до навколишнього середовища.

За умови стаціонарного розташування печі (рис. 1) нижня поверхня футеровки вступає в контактний теплообмін з фундаментом печі (q_{10}), при цьому задається гранична умова IV роду

$$\begin{cases} \lambda_{\phi\delta} \frac{\partial T_{\phi\delta}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \lambda_{\phi_{ун}} \frac{\partial T_{\phi_{ун}}}{\partial z} \Big|_{z=0} \\ T_{\phi\delta} \Big|_{z=0} = T_{\phi_{ун}} \Big|_{z=0} \end{cases} \quad (16)$$

де $\lambda_{\phi_{ун}}$, $T_{\phi_{ун}}$ – відповідно коефіцієнт теплопровідності та температура фундаменту печі.

Для системи поверхонь: верхня поверхня шихти – поверхня склепіння та бокових нескранованих шихтою стін печі задана умова радіаційного теплообміну

$$\lambda_{uu} \frac{\partial T_{uu}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{uu}} = \varepsilon_{np} \sigma_0 \left((T_{\phi} + 273)^4 - (T_{uu} + 273)^4 \right), \quad (17)$$

де T_{ϕ} та T_{uu} – температури взаємно опромінюваних поверхонь футеровки печі та шихти, ε_{np} – приведена міра чорноти в системі шихта – футеровка печі, що бере участь у променистому теплообміні.

На стадіях запалення дуг і проплавлення колодязів газова атмосфера робочого простору ДСП складається з повітря, тобто являється діатермічною ($\varepsilon_2 = 0$), де ε_2 – міра чорноти пічного газу. У цьому випадку доцільно використовувати наступну формулу для визначення приведеної міри чорноти:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{uu}} + \frac{1}{\varepsilon_{\phi}} - 1} \quad (18)$$

Теплофізичні процеси, що мають місце на стадії рідкої ванни є ідентичними, не зважаючи на спосіб завантаження шихти до печі, а математична модель наведена у роботі [4].

Щоб встановити вплив використання «болота» та визначити найбільш ефективну його первинну масу були прийняті наступні умови:

1) моделювання відбувалось для маси первинного «болота» від $m_{\phi}^0 = 0$ тон (завантаження на суху подину) до $m_{\phi}^0 = 20$ тон, з кроком додавання маси $\Delta m_{\phi}^0 = 5$ тон;

2) в розрахунках приймалась умова, що маса отриманого розплаву повинна бути $m_{\phi} = 100$ тон.

3) додавання маси «болота» Δm_{ϕ}^0 відбувалось за рахунок віднімання відповідної маси від маси першої завалки, маса другої завалки залишалась незмінною.

4) моделювання здійснювалось для наступних схем завантажень: I – маса залишкового «болота» $m_{\phi}^0 = 20$ тон, маса першої завалки $m_{uu1}^0 = 40$ тон, маса другої завалки $m_{uu2}^0 = 40$ тон; II – $m_{\phi}^0 = 15$, $m_{uu1}^0 = 45$ тон, $m_{uu2}^0 = 40$ тон; III – $m_{\phi}^0 = 10$, $m_{uu1}^0 = 50$ тон, $m_{uu2}^0 = 40$ тон; IV – $m_{\phi}^0 = 5$, $m_{uu1}^0 = 55$ тон, $m_{uu2}^0 = 40$ тон; V – $m_{\phi}^0 = 0$, $m_{uu1}^0 = 60$ тон, $m_{uu2}^0 = 40$ тон.

Технологія виплавки сталі з використанням «болота» передбачає, що при зливанні розплаву в печі залишиться така маса рідкого металу, яка буде використовуватися в якості «болота» для наступної плавки. В залежності від обраної схеми завантаження шихти в піч маса отриманого розплаву (злитого з печі) буде зменшуватися в залежності від збільшення маси «болота». Оскільки маса отриманого розплаву без «болота» буде різною для кожної з обраної схеми завантаження при визначенні оптимальної схеми завантаження, доцільно використовувати наступну умову:

$$\frac{m_p}{\tau} \rightarrow \max, \quad (19)$$

де m_p – маса отриманого розплаву, τ – тривалість процесу розплавлення завантаженої металошихти.

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. Додатковими джерелами теплоти при роботі дугових печей можуть бути паливнокисневі пальники, теплота екзотермічних реакцій, крім того, може використовуватися технологія виплавки сталі з використанням залишку від попередньої плавки – «болота». При наявності випускних жолобів, еркерів або завалочних отворів використання двовимірної математичної моделі вносить похибку в розрахунки.

Розрахунок проводиться при використанні розробленої тривимірної моделі теплової роботи дугової печі з урахуванням особливостей тепломасообміну для кожного етапу розплавлення шихти.

Проаналізувавши отримані дані щодо етапу проплавлення колодязів необхідно зауважити що: поперше, час проплавлення колодязів тим більше, чим більше маса першої завалки, при цьому тривалість етапу проплавлення колодязів збільшується на 10-12% при кожному збільшенні маси першої завалки на 5т або, відповідно, при кожному зменшенні залишкового «болота» на 5 т. По-друге, маса отриманого розплаву в момент завершення етапу проплавлення колодязів для першої завалки приймає своє максимальне значення $m_p^{кол} \approx 9$ т для схеми завантаження V і мінімальне значення $m_p^{кол} \approx 4$ т для схеми завантаження I, тобто

маса отриманого розплаву збільшується в залежності від збільшення маси завантаження.

Початкова маса розплаву для етапів закритого і відкритого горіння дуг є маса розплаву, отримана за період розплавлення колодязів. Маса розплаву в момент завершення етапів закритого і відкритого горіння дуг при розплавленні першої завалки дорівнює масі першого завантаження $m_{ш1}^0 = 60$ і є однаковою для всіх наведених схем завалок. Маса розплаву при розплавленні першої завалки, отриманого за період плавлення закритими і відкритими дугами, розраховується наступним чином:

$$m_p^{1заг} = m_{ш1}^0 - m_p^{кол} - m_{б}^0, \quad (20)$$

де $m_{ш1}^0, m_p^{кол}, m_{б}^0$ – відповідно маса першої завалки, маса розплаву, отриманого в період розплавлення колодязів та маса залишкового «болота». Використовуючи (20), відповідно для I-V схем завантаження, були отримані наступні маси розплаву: 36т, 40т, 43т, 47т, 51т. Оскільки величини тривалості і маси отриманого розплаву є змінними для розглядуваних схем завантаження, то при обґрунтуванні найбільш доцільної маси першої завалки будемо використовувати співвідношення отриманого розплаву до витраченого часу і умови (19). Виходячи з умови (19), найбільш доцільною схемою завантаження є схема I, співвідношення маси розплаву якої до витраченого часу, наближується до значення 1 т/хв. Також було визначено, що схема завантаження V, де плавлення відбувається без використання «болота», є самою невигідною з точки зору швидкості процесу плавлення, яка складає приблизно 0,76 т/хв.

Оскільки за вказаними вхідними умовами маса другої завалки є однаковою для всіх розглядуваних схем завантаження, а маса рідкого розплаву буде достатньою для забезпечення однакового підняття його рівня під вагою завалочних матеріалів, то динаміка, час і маса отриманого розплаву при розплавленні другої завалки буде ідентичною для всіх схем завалок.

Дані чисельного моделювання загального процесу плавлення обох завалок при використанні змінної маси «болота», представлені на рис. 2.

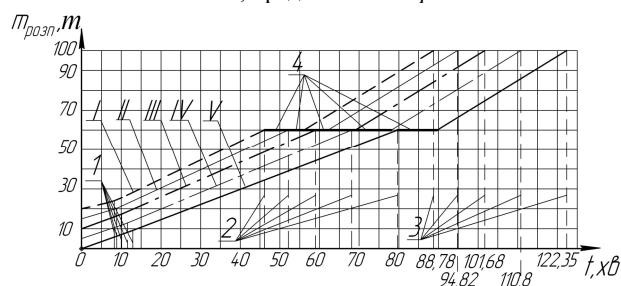


Рис. 2. Залежність тривалості плавлення від початкової маси розплаву:

- 1 – момент завершення етапу проплавлення колодязів;
- 2 – момент часу завершення етапів закритого і відкритого горіння при розплавленні першої завалки;
- 3 – загальна тривалість плавки;
- 4 – час завантаження другої завалки

Хоча маса розплаву в момент завершення стадії плавлення є однаковою для всіх розглядуваних мас

завантажень і дорівнює $m_{б} = 100$ тон, маса розплаву, отриманого при плавленні розраховується як:

$$m_p = m_{б} - m_{б}^0. \quad (21)$$

Значення розплаву, отриманого в процесі плавлення для схем завантаження I-V згідно (20), складає відповідно 80т, 85т, 90т, 95т, 100т. Зі збільшення маси отриманого розплаву, час, який витрачається для його отримання теж збільшується. Змінні величини маси отриманого розплаву і витраченого часу призводять до необхідності використання умови (19) при визначенні найбільш доцільної схеми завантаження. Розрахувавши співвідношення маси отриманого розплаву до витраченого часу та використавши умову (19), було визначено, що плавлення шихти з використанням I схеми завантаження є більш вигідним при порівнянні з іншими схемами завантаження, які розглядалися. Швидкість плавлення для I схеми завантаження складає приблизно 0,9 т/хв. і це значення зменшується до приблизно 0,8 т/хв. для V схеми завантаження.

Витрату електроенергії при розплавленні металошихти з використанням розглядуваних схем завантаження можна визначити по наступній формулі:

$$W = P_{mp} \tau, \quad (22)$$

де P_{mp} – потужність пічного трансформатора, МВт; τ – час плавлення металошихти, год. Потужність пічного трансформатора приймали незмінною при розплавленні вказаних схем завантаження. Витрати електроенергії W при розплавленні шихти відповідно до схем завалок I-V приблизно дорівнюють 59,2 МВт·год, 63,2 МВт·год, 67,8 МВт·год, 77,7 МВт·год та 81,5 МВт·год. При цьому не враховується кількість електроенергії, яка була витрачена для отримання «болота» відповідної маси $m_{б}^0 = 20т, 15т, 10т, 5т, 0т$. Для визначення загальної кількості електроенергії $W_{заг}$, що була витрачена для отримання розплаву $m_{б} = 100$ т будемо враховувати:

$$W_{заг} = W + W_{б}, \quad (23)$$

де $W, W_{б}$ – відповідно питомі витрати електроенергії, що була витрачена для розплавлення твердої шихти і для отримання «болота», МВт·год.

На основі виразів (22) і (23), були отримані наступні значення загальних витрат електроенергії: 76 МВт·год, 76,4 МВт·год, 76,8 МВт·год, 78,2 МВт·год та 81,5 МВт·год. Враховуючи той факт, що маса розплаву є однаковою для різних схем завантаження і дорівнює 100т, значення питомих витрат електроенергії відповідно дорівнюють: 760 кВт/т, 764 кВт/т, 768 кВт/т, 782 кВт/т та 815 кВт/т.

Зменшення витрати електроенергії при збільшенні маси «болота» є непропорційним і приймає своє максимальне значення при плавленні I схеми завантаження, що передбачає плавлення з масою «болота» 20т. З чого можна зробити висновок, що лише за рахунок використання «болота», яке є додатковим джерелом теплоти, можна досягти економії електроенергії 4-7%.

