

УДК 621.717:669.046

**Ялова К.М.** – ас., Дніпродзержинський державний технічний університет

## **ДОСЛІДЖЕННЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ, ЩО МАЄ МІСЦЕ ПІД ЧАС ПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛОШИХТИ В ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПЕЧАХ**

*Визначено вплив конвективного теплообміну між пічними газами та шихтою, тепловіддачі від стікаючого рідкого металу та конвективно-радіаційного теплообміну футеровки печі з навколишнім середовищем, що показує доцільність врахування конвективної складової при математичному моделюванні теплової роботи дугових печей. Шляхом чисельних експериментів визначена величина розрахункової похибки, що виникає при відсутності складових частин конвективного теплообміну.*

*Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, теплообмін, конвективний теплообмін, математична модель.*

### **Постановка проблеми**

Виписка сталі в дугових електричних печах є однією з найбільш енергозберігаючих технологій виробництва сталі. Рівень енергозбереження безпосередньо залежить від способу ведення плавки і динаміки тепломасообмінних процесів, що протікають у робочому просторі печі. На основі аналізу предметної області було встановлено, що пошук і розробка ефективних режимів плавки шляхом виробничого експерименту неможливі без суттєвих витрат та капіталовкладень. Альтернативою цьому є створення математичної моделі теплової роботи печей, що дозволить проводити чисельні експерименти поза піччю. Розроблена математична модель теплової роботи печі, алгоритм та програма розрахунку на СОМ дозволять вивчати будь-які ситуації з різними чисельними значеннями фізичних величин і отримати найбільш ефективні рішення при створенні енергозберігаючих технологій для діючих та майбутніх дугових печей.

### **Аналіз досліджень і публікацій**

Математичному моделюванню теплофізичних процесів, що відбуваються в дугових сталеплавильних печах присвячено ряд наукових робіт. Основною метою математичного моделювання у таких авторів, як Єгоров А.В., Ігнатов І.І., Тимошпольський В.І., Моржин А.Ф. [1 – 3] є визначення тривалості розплавлення металошихти в залежності від

енергетичного режиму ведення плавки. Беручи до уваги питання стосовно математичного моделювання тепломасообмінних процесів у сталеплавильних печах, треба зазначити низку проблем, які не знайшли належного відображення у роботах вказаних авторів, або мають суперечливий характер. Зокрема, це стосується конвективного теплообміну, що має місце під час плавлення металошихти і його складових частин: теплообмін між пічними газами, що утворюються в результаті екзотермічних реакцій, та поверхнею кускового матеріалу шихти, конвективний теплообмін між шихтою та розплавленим металом, що стікає на подину, та теплообмін від зовнішньої поверхні стін.

### **Формулювання мети роботи**

Метою даної роботи є визначення доцільності врахування складових частин конвективного теплообміну при математичному моделюванні процесу плавлення металошихти. Це завдання вирішується визначенням величини похибки розрахунку тривалості плавлення металошихти, що виникає при нехтуванні описаних видів теплообміну шляхом чисельного експерименту на основі розробленої математичної моделі теплової роботи дугових сталеплавильних печей [4].

### **Результати роботи**

При математичному моделюванні теплової роботи дугових сталеплавильних печей умовно виділяють чотири етапи: запалення електричних дуг, проплавлення колодязів, плавлення закритими дугами та доплавлення металошихти відкритими дугами. При створенні математичної моделі кінетики плавлення шихти враховуються особливості протікання теплофізичних процесів на кожному етапі теплової роботи печі. Кожний з етапів характеризується температурою футеровки стін, подини, склепіння, шихти і «болота», кількістю пічних газів в атмосфері печі, інтенсивністю протікання екзотермічних реакцій, швидкістю конвективного нагріву шихти.

Для проведення чисельного моделювання процесу плавлення металошихти робочій простір печі розбивався рівномірною сіткою на основі методу кінцевих різниць, а диференційні рівняння замінялися кінцево-різницевиими відношеннями на основі методу контрольного об'єму [5].

При створенні математичної моделі теплової роботи печі для всіх стадій теплової роботи печі враховувався конвективно-радіаційний теплообмін між зовнішньою поверхнею печі та навколишнім середовищем. Коефіцієнт тепловіддачі від навколишнього середовища  $\alpha_{\Sigma}$  є сумарним коефіцієнтом конвективної та радіаційної складових теплообміну. Коефіцієнт тепловіддачі для конвективної складової визначається з урахуванням залежності для ламінарного потоку ( $Gr Pr > 10^9$ ):

$$Nu = 0,50(Gr \cdot Pr)^{0,25} \left( \frac{Pr_2}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (1)$$

де  $Nu$  – критерій Нуссельта;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності пічних газів,  $Вт/(мК)$ ;  $d$  – середній гідравлічний діаметр кусків шихти,  $м$ ;  $Gr = \frac{g\beta T_2 d^3}{\nu^2}$  – критерій Грасгофа;  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $м/с^2$ ;  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення,  $1/К$ ;  $T_2$  – температура пічних газів,  $К$ ;  $Pr_2$ ,  $Pr_{cm}$  – критерій Прандтля відповідно для температури газу і стінки.

Коефіцієнт тепловіддачі для радіаційної складової визначається як  $\alpha_p = \frac{q}{\Delta t}$ , де  $q$  – тепловий потік випромінюванням між зовнішньою поверхнею печі та навколишнім середовищем;  $\Delta t$  – різниця температур зовнішньої поверхні футеровки і повітря.

Для врахування конвективно-радіаційного теплообміну між навколишнім середовищем і футеровкою печі в математичну модель [4] додавалися відповідні граничні умови: на границі футеровка бокових стін – навколишнє середовище задається гранична умова третього роду:

$$-\lambda_\phi \left. \frac{\partial T_\phi}{\partial r} \right|_{r=R_n} = \alpha_\Sigma (T_\phi(r=R_n) - T_c), \quad (2)$$

де  $T_c$  – температура навколишнього середовища,  $К$ .

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

$$-\lambda_\phi \left. \frac{\partial T_\phi}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha_\Sigma (T_\phi(z=0) - T_c). \quad (3)$$

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

$$\begin{cases} \lambda_\phi \left. \frac{\partial T_\phi}{\partial z} \right|_{z=0} = \lambda_{\phi_{ун}} \left. \frac{\partial T_{\phi_{ун}}}{\partial z} \right|_{z=0}, \\ T_\phi|_{z=0} = T_{\phi_{ун}}|_{z=0} \end{cases}, \quad (4)$$

де  $\lambda_{\text{фун}}$ ,  $T_{\text{фун}}$  – відповідно коефіцієнт теплопровідності та температура фундаменту печі,  $\text{Вт}/(\text{мК})$ ,  $\text{К}$ .

Шляхом чисельного експерименту було визначено вплив врахування конвективно-радіаційного теплообміну на точність чисельних розрахунків загального часу процесу плавлення.

Дані, наведені на рис. 1, дають змогу оцінити вагу конвективно-радіаційного теплообміну з навколишнім середовищем при плавленні металошихти.

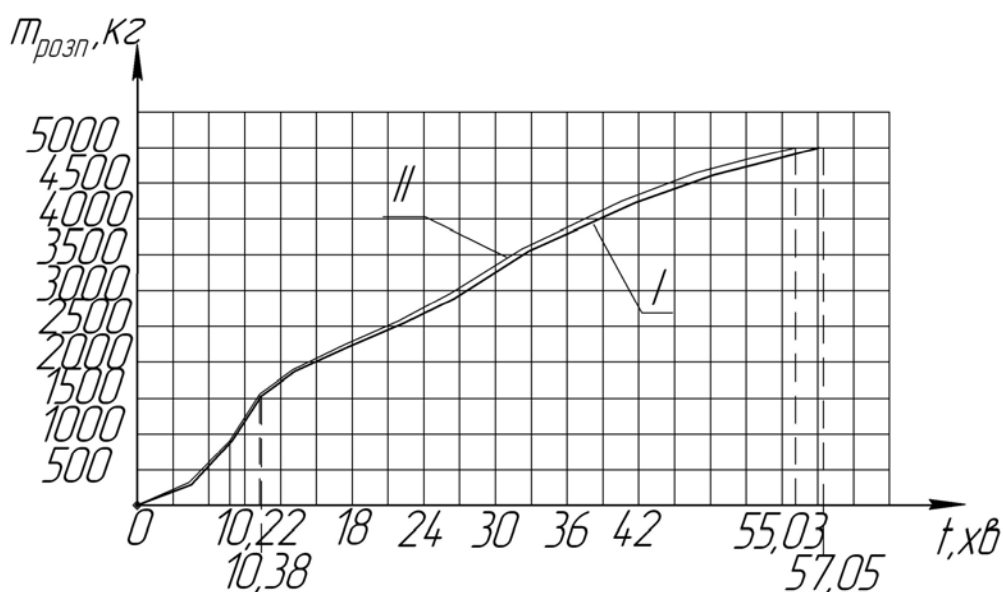


Рис. 1. Залежність маси розплаву від загального часу процесу плавлення для завалки  $m_0 = 5000$  кг:

I – з урахуванням теплообміну з навколишнім середовищем;  
II – без урахування

Різниця розрахункового часу при врахуванні і нехтуванні теплообміном з навколишнім середовищем для різних мас завантаження в середньому складає 4 %. Різниця в 4 % знаходиться в межах допустимої похибки для теплофізичних розрахунків в металургії, але необхідно зауважити, що піч не є ізолюваним від навколишнього середовища агрегатом і врахування цього виду теплообміну дає змогу більш коректно описати механізми передачі теплоти, процес теплообміну в цілому і визначити витраті енергії.

На етапі проплавлення колодязів розплавлений метал стікає вниз під дією сили тяжіння. При цьому він передає свою теплоту розташованим нижче шарам шихти (рис. 2) шляхом конвективного теплообміну. Рухливими границями в період, який розглядається, є верхня границя «болота»  $Z_{\text{б}}(\tau)$ , що переміщується в результаті стікання в нього рідкого металу та границі областей колодязів  $Z_{\text{ік}}(\tau)$ .

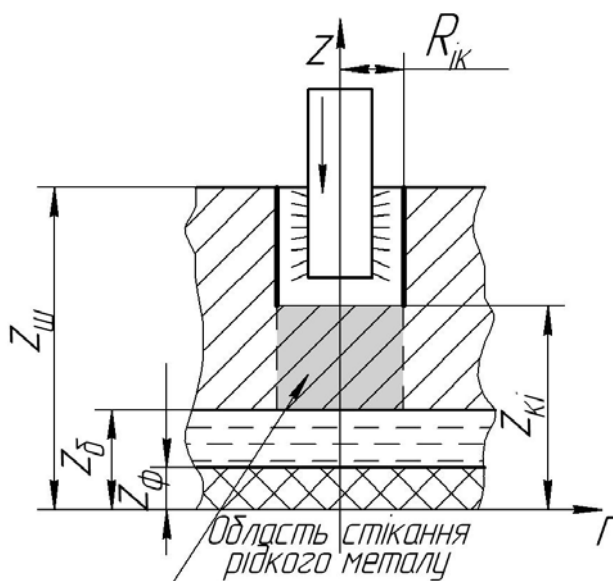


Рис. 2. Схема теплообміну в колодязях

Стікаючий розплав створює додаткове джерело теплоти, яке забезпечує прогрівання шарів шихти, що знаходяться в області дії електродів. Для врахування конвективного теплообміну з рідким металом в області руху електродів, задавалась гранична умова третього роду:

$$\lambda_{ш} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{(z=F_{ш})} = \alpha_{Vpp} (T_{pm} - T_{ш}); \quad (5)$$

$$\lambda_{ш} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{(r=R_{ik})} = \alpha_{Vpp} (T_{pm} - T_{ш}), \quad (6)$$

де  $\alpha_{Vpp}$  – об’ємний коефіцієнт тепловіддачі рідкого металу,  $Bm/(m^2K)$ ;  $T_{pm}$  – температура рідкого стікаючого металу,  $K$ ;  $R_{ik}$  – радіус  $i$ -того колодязя,  $m$ . Бокова поверхня колодязя приймається нерухливою границею, а величина  $R_{ik}$  визначається як подвійний діаметр електродів.

Для оцінки необхідності врахування цього виду теплообміну при моделюванні роботи дугової печі були проведені розрахунки, результати яких для первинної завалки  $m_0 = 5000$  кг наведені на рис. 3. При проведенні розрахунків вхідні дані щодо геометрії печі і теплофізичних властивостей завалочних матеріалів та умови теплообміну були однакові за винятком наявності або відсутності теплообміну з рідким металом.

В проведених розрахунках коефіцієнт тепловіддачі від стікаючого металу було встановлено за формулою  $Nu = 4,8 + 0,014Pe^{0,8}$  згідно [5], де  $Pe$  – критерій Пекле, що визначається як  $Pe = \frac{\omega d}{a}$ ,  $a$  – коефіцієнт температуропровідності рідкого металу.

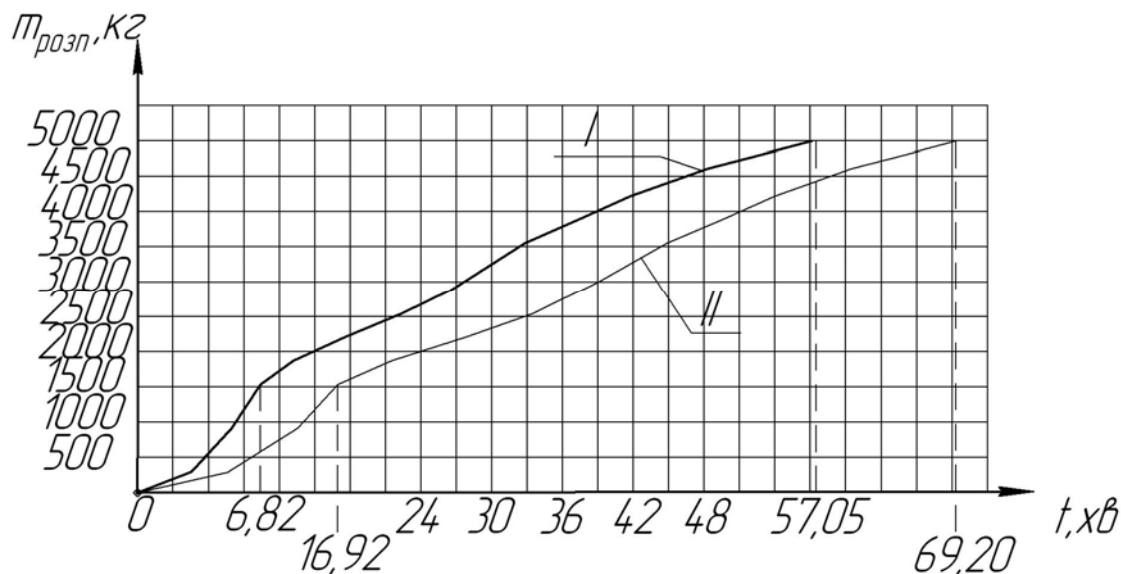


Рис. 3. Залежність маси розплаву від часу для завалки  $m_0 = 5000$  кг:  
 I – з урахуванням теплообміну зі стікаючим металом;  
 II – без урахування

З даних, отриманих при розрахунках, зроблено висновок, що при врахуванні тепловіддачі від стікаючого металу для первинних завалок 3000 – 5000 кг значення загального розрахункового часу плавлення шихти зменшується в середньому на 14 %.

В результаті протікання окислювальних реакцій (особливо при використанні технології введення кисню) атмосфера печі на етапах закритого і відкритого горіння дуг заповнюється пічними газами, що створюють додаткове джерело прогрівання шихти шляхом конвективного теплообміну. Конвективний теплообмін між пічними газами та шихтою врахований у математичній моделі [4], за рахунок введення наступної граничної умови третього роду:

$$\lambda_{ш} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=Z_{ш}} = \alpha_V (T_z - T_{ш}). \quad (7)$$

В роботах деяких авторів вплив конвективного теплообміну між пічними газами і шихтою, що має місце в період закритого і відкритого горіння дуг, не враховується. Для визначення необхідності врахування цього виду теплообміну були проведені чисельні розрахунки. Вплив зневажання цього виду теплообміну на загальну тривалість плавлення для первинної завалки  $m_0 = 5000$  кг наведено на рис. 4.

На основі аналізу отриманих даних, було встановлено, що нехтування цим видом теплообміну призводить до збільшення розрахункового часу етапів закритого і відкритого горіння дуг в середньому на 8 – 9 % для завалок різної маси.

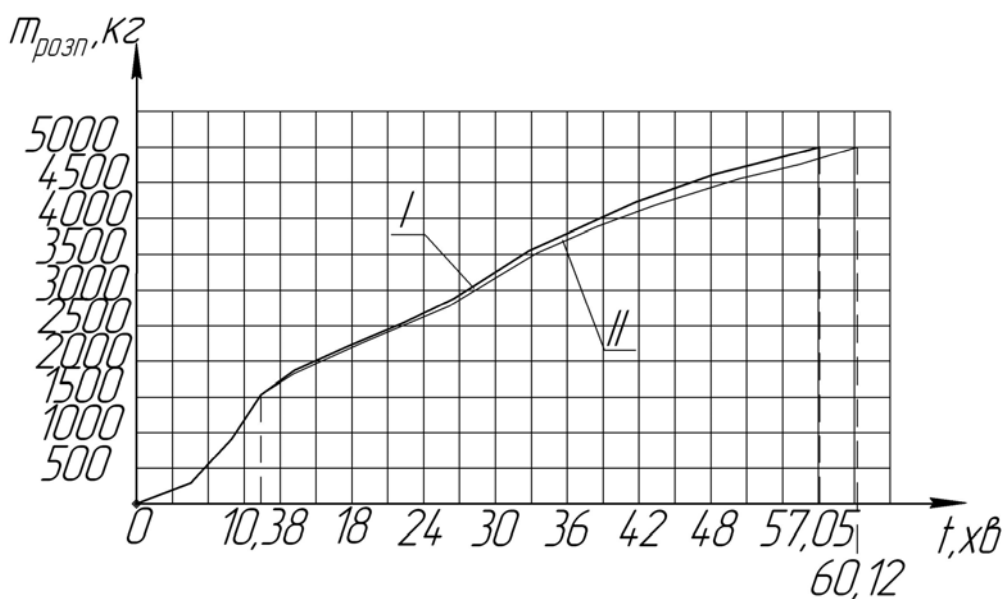


Рис. 4. Залежність маси розплаву від загального часу плавлення:  
 I – з урахуванням конвективного теплообміну шихти з пічними газами;  
 II – без урахування

Результати чисельних випробувань показали доцільність уточнення математичної моделі електродугової печі за рахунок врахування конвективної складової теплообміну. Параметрична ідентифікація та оцінка адекватності уточненої математичної моделі проводилась на основі даних промислових плавок на печі ДСП-3М ОАО «Сталь-завод» м. Дніпродзержинськ, ДСП-4 ООО «Циркон» м. Дніпродзержинськ. Відхилення розрахункових даних від даних промислових плавок не перевищує похибки розрахунків теплофізичних величин в металургії і складає не більше 5 %, що дає змогу вважати отримані дані такими, що відповідають дійсності.

### Висновки

Шляхом чисельних експериментів теоретично обґрунтована необхідність врахування конвективного теплообміну між пічними газами і металошихтою, тепловіддачі від стікаючого металу та конвективно-радіаційного теплообміну з навколишнім середовищем. Доведено, що нехтування у моделі конвективною складовою призводить до похибки розрахунку тривалості плавлення шихти: 4 % – при неврахуванні конвективно-радіаційного теплообміну з навколишнім середовищем, 14 % – при неврахуванні тепловіддачі від стікаючого металу, 8 – 9 % – при неврахуванні теплообміну між пічними газами і металошихтою. Використання уточненої математичної моделі дає змогу

отримати більш коректні, наближені до промислових результати порівняно з експериментальними і розрахунковими даними інших авторів.

### Список літератури

1. Егоров А. В. Электроплавильные печи черной металлургии : [уч. пособие для студентов вузов, обуч. по спец. «Металлургия черных металлов»] . – М. : Металлургия, 1985. – 280 с.
2. Игнатов И. И. Математические модели теплообмена в ДСП // Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей. – М. : ВНИИЭТО, 1983. – С. 17–19.
3. Тимошпольский В. И. Промышленные теплотехнологии: моделирование нелинейных процессов : [учеб. для вузов] / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. П. Несенчук. – Минск : Высшая школа, 2000. – 319 с.
4. Яловая Е. Н, Болотов В. Ю. Разработка математической модели плавления металлошихты в дуговой сталеплавильной печи при исследовании влияния режимов работы энерготехнологического оборудования на продолжительность плавки // Сборник научных трудов ДГТУ. – Днепродзержинск : ДГТУ. – 2007. – № 8. – С. 211–216.
5. Явойский В. Н. Теория продувки сталеплавильной ванны / Явойский В. Н., Дорофеев Г. А., Повх И. Л. – М. : Металлургия, 1974. – 496 с.

*Рукопис надійшов 12.10.2009 р.*