

змінюються в залежності від стадії роботи печі і характеризуються: температурою футеровки стін, подини, склепіння, шихти, „болота”, електродів і дуг, кількістю газів в атмосфері печі, інтенсивністю протікання хімічних реакцій і швидкістю конвективного нагрівання шихти. Виходячи з цього, задача математичного моделювання теплової роботи печі зводиться до розв’язання задач теплообміну в пористому об’єкті з рухливою границею розподілу фаз при дії внутрішніх теплових джерел і нелінійних крайових умовах. Математична постановка задачі здійснюється як для кожного окремого періоду роботи печі, так і комплексно для всього процесу розплавлення шихти. Розглянемо докладно стадію проплавлення колодязів.

Джерелом теплоти в даному періоді є енергія електричної дуги, енергія згоряння палива в паливно-кисневих пальниках (при їх наявності), теплота створеного „болота”, теплота футеровки печі. По мірі заглиблення дуги в шихту, її енергія екранується шихтою, завдяки чому променеву енергію дуги отримує тільки поверхня шихти безпосередньо під електродами.

Температура поверхні склепіння печі, її стін і поду приймається постійною на протязі даного періоду. У разі наявності „болота” на початку плавки та на її протязі виникає зіткнення між поверхнею шихти та рідким металом. Беручи до уваги той факт, що має місце омивання твердої поверхні рідиною, можна зробити висновок стосовно наявності конвективного теплообміну, але рух рідкого металу є стисненим, тобто цілком доцільно розглядати у даному випадку співіснування двох шарів з непорушними середовищами. Це ствердження дає змогу віднести цей вид теплообміну до контактного теплообміну між нерухливими тілами. Теплообмін між твердою шихтою і боковою поверхнею футеровки стін та між „болотом” і футеровкою подини також розглядається як контактний теплообмін з граничною умовою теплообміну четвертого роду.

Верхня поверхня шихти, поверхня склепіння та відкрита поверхня футеровки стін складають в даному періоді замкнену систему сірих тіл, між якими відбувається теплообмін випромінюванням. Атмосфера печі в цьому періоді приймається прозорим, проникним середовищем, оскільки пічна атмосфера ще ненасичена газами.

В результаті проплавлення колодязів, розплавлений метал стікає вниз під дією сили тяжіння, передаючи при цьому свою ентальпію нижче лежачим шарам шихти. За цих умов теплообмін між шихтою і стікаючим металом є конвективний з граничною умовою третього роду.

Теплота в об’ємі шихти і „болота” розповсюджується в результаті теплопровідності з граничною умовою четвертого роду. Рухливими границями на стадії, яка розглядається, є верхня границя „болота”, що переміщується із-за стікання до нього розплавленої шихти, а також границі областей колодязів.

Завданням цього періоду теплової роботи дугової печі є: проплавлення колодязів у шихті, призначених для руху електродів; створення ванни рідкого металу, достатньої для підтримки горіння електричних дуг; засипка вапна і формування шлаку.

**Результати роботи.** Для розрахунку розглядуваної стадії тривимірні рівняння теплопровідності для шихти, „болота”, футеровки печі та шлаку з граничною умовою четвертого роду зводяться до системи одновимірних різницевих рівнянь. При побудові різницевих аналогів використовується метод контрольного об’єму. Для розрахунку радіаційного теплообміну в системі тіл

„склепіння – верхня поверхня шихти – неекранова шихтою бокова поверхня печі”, „дуга – поверхня шихти”, „бокова поверхня електродів – бокова поверхня шихти” використовується зональний метод.

Результати чисельного моделювання процесу проплавлення колодязів для завалок масою  $m_0 = 3000$  кг, 4000 кг, 5000 кг для печі ДСП-3 «Сталеливарного заводу» м. Дніпродзержинська представлено на рисунках 1-5. Розрахунок проводився на основі розробленої математичної моделі теплової роботи печі на цій стадії [2].

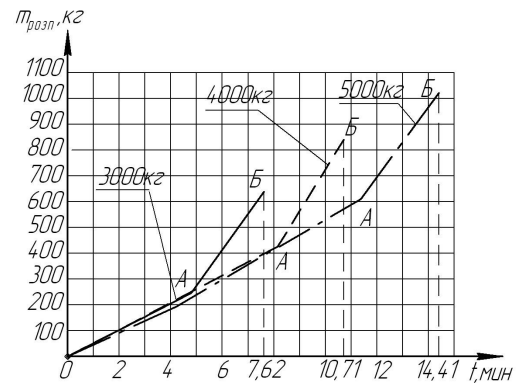


Рис. 1. Залежність маси розплавленого металу  $m_{розп}$  від часу  $t_{xe}$

На рис. 1 наведено графіки зміни маси розплаву металу в часі, в залежності від маси первинної завалки, що дають змогу оцінити динаміку проплавлення колодязів і визначити найбільш раціональну масу первинної завалки. Відрізок А-Б на рис.1 свідчить про те, що нижчі шари шихти вступають в контактний теплообмін з футеровкою подини печі і, потрапляючи під дію електродів, мають температуру вищу за температуру внутрішніх шарів, тому і часу на проплавлення нижнього розрахункового шару потрібно в середньому на 30-35 % менше, ніж для розплавлення попередніх шарів.

Неважко зробити висновок, що, чим більше маса завалки, тим більше часу треба на проплавлення колодязів, тривалість розглядуваного періоду збільшується в середньому на 35-40 % з кожним збільшенням маси завалки на 1000кг. Незважаючи на те, що маса розплаву кінцію періоду проплавлення колодязів тим більше, чим більше маса завалки, швидкість прогрівання шарів шихти в області дії електродів зменшується приблизно на 25-30 % для кожного збільшення маси на 1000 кг (рис. 2).

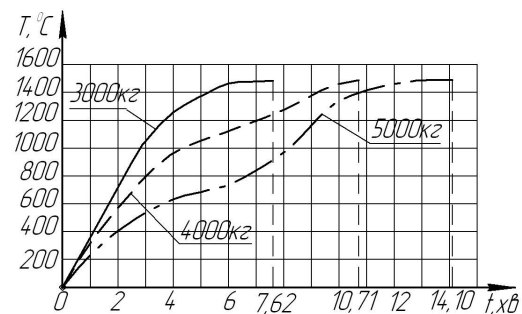


Рис. 2. Залежність середньої температури шихти в області дії електродів  $T$  від часу  $t_{xe}$

Найбільш суттєвим вхідним параметром в умовах сталої геометрії печі, незмінних теплофізичних величин і маси завалочних матеріалів є діаметр електродів, працюючих у печі. На рис. 3 наведено залежність маси розплаву для первинної завалки  $m_0 = 3000$  кг від діаметру ввідних електродів без урахування зміни температури дуги і електродів. Збільшення діаметру електродів призводить до того, що під їхню безпосередню дію потрапляє більша кількість шихти, тому маса розплаву збільшується приблизно на 50 % при кожному збільшенні діаметрів електродів на 0,1 м, але тривалість стадії проплавлення колодязів в цих випадках збільшується в середньому на 15 % для кожного наведеного варіанту. При цьому загальна тривалість процесу розплавлення зменшується, так як після завершення періоду проплавлення колодязів твердої шихти в робочому просторі печі залишається приблизно на 12-15 % менше твердої шихти з кожним збільшенням діаметру електродів.

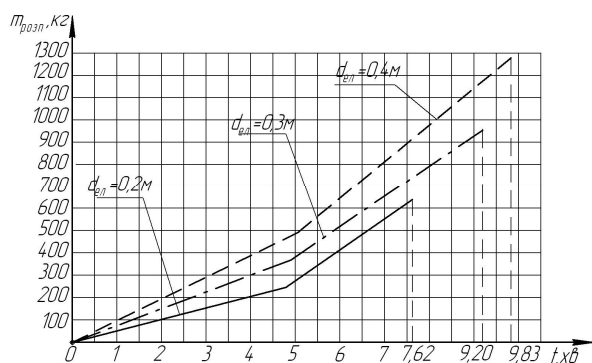


Рис. 3. Залежність маси розплаву  $m_{розп}$  від часу  $t_{хв}$  в залежності від діаметру електродів  $d_{ел}$  без зміни температури дуг і електродів

Проте, необхідно зауважити, що збільшення діаметру електродів призводить до збільшення робочого току та збільшення температури поверхні електродів і випромінювальної поверхні дуг. Збільшення температури цих поверхонь, що вступають в теплообмін з шихтовими матеріалами призводить до інтенсифікації процесу проплавлення колодязів та періоду плавлення в цілому. На рис. 4 наведено залежність маси розплаву металу від діаметрів електродів  $d_{ел} = 0,2; 0,3; 0,4$  м для завалки шихти початкової маси  $m_0 = 3000$  кг.

При цьому враховується залежність увідної сили струму, температури дуги і електродів від діаметрів електродів [3].

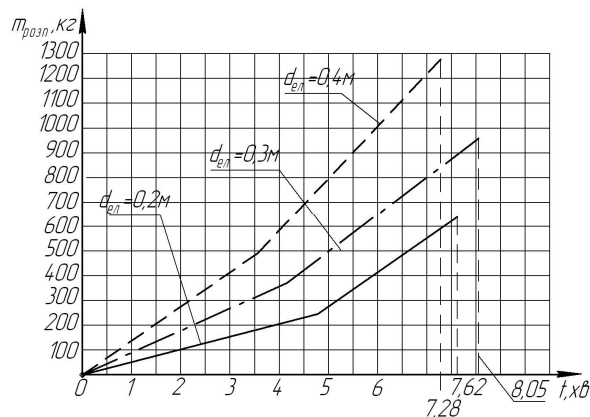


Рис. 4. Залежність маси розплаву  $m_{розп}$  від часу  $t_{хв}$  в залежності від діаметру електродів  $d_{ел}$  враховуючи зміну температури дуг та електродів

Параметрична ідентифікація та оцінка адекватності створеної математичної моделі здійснювалась на основі отриманих даних при приведенні промислових плавок.

Розходження даних, отриманих шляхом математичного моделювання процесу проплавлення колодязів і даних, отриманих опитним шляхом знаходиться в межі точності розрахунків для теплофізичних процесів в металургії і не перевищує 8 %.

**Висновки.** В роботі наведені результати чисельного моделювання періоду проплавлення колодязів на основі створеної комплексної математичної моделі теплової роботи дугових печей, що враховує особливості протікання процесів теплообміну та механізми передачі теплоти на кожній стадії плавлення металошихти. Встановлено можливість зменшення тривалості розглядуваної стадії за рахунок збільшення діаметру ввідних електродів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей М., Metallurgiya, 1981. 320 с.
2. В.Ю. Болотов, Е.Н. Яловая. Разработка математической модели и метода для расчета кинетики плавления металошихти в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи// Математическое моделирование. – 2008. - №1(18). – С. 25-28
3. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: Уч. пособие для вузов. Егоров А.В. М.: МИСИС, 2000, 272 с.