

МОДЕЛЮВАННЯ ВІДБИВНОЇ ПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ, ОСНАЩЕНОЇ ВИХРОВОЮ КАМЕРОЮ З ДУГОВИМ ІНДУКТОРОМ

Ю.М. Гориславець*¹, докт. техн. наук, Т.О. Пеньковий^{1,2}

1 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

2 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна

e-mail: ugoris@ied.org.ua

Представлено схему відбивної печі для плавлення алюмінієвих відходів у вихровому потоці розплаву, створеного дуговим індуктором в окремій циліндричній камері. Вихрова камера, з'єднана з плавильною ванною печі за допомогою двох каналів, виконує у цій печі дві функції: переміщує розплавлений метал у ванні та створює вихрову воронку, куди подається подрібнена шихта. Сформульовано математичну модель для чисельного дослідження електромагнітних і гідродинамічних процесів у такій системі. Визначено вплив кута приєднання всмоктувального й натискного каналів до бокової циліндричної поверхні вихрової камери на її параметри, якими виступали середня швидкість рідкого металу у ванні печі, витрата розплаву через поперечні перерізи в з'єднувальних каналах та середня кутова швидкість металу в камері. Установлено, що кут приєднання всмоктувального каналу мало впливає на роботу камери на відміну від кута напірного каналу, який для досягнення максимальної ефективності перемішування металу у ванні повинен приймати мінімальні значення, а для створення максимальної вихрової воронки – бути більше 50°. Наведено міркування щодо компромісних значень цього кута, які можуть забезпечити необхідне функціонування камери як з погляду перемішувача рідкого металу у ванні печі, так і обертального пристрою металу в камері. Бібл. 8, рис. 5.

Ключові слова: відбивна плавильна піч, вихрова камера, дуговий індуктор, рідкий метал, моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів, з'єднувальні канали, кут приєднання каналів до вихрової камери.

Вступ. Як відомо, відбивні печі, які бувають електричними (печі електроопору) та паливними (паливними, газовими), широко використовуються для плавлення металевих відходів (брухту) із метою повторного залучення металу у виробництво. Особливо актуально це для алюмінію, оскільки отримання первинного алюмінію спричинює великі енергетичні витрати та значні викиди шкідливих речовин в атмосферу. З огляду на суттєво менші витрати та вплив на довкілля виробництво вторинного алюмінію в усьому світі постійно зростає.

Функціонально відбивна плавильна піч – це піч з верхнім поверхневим нагріванням. Унаслідок відсутності дієвих механізмів передачі тепла (оскільки в разі такого нагрівання теплопередача здійснюється тільки завдяки теплопровідності) метал у верхній частині ванни печі перегрівається, в той же час внизу він залишається відносно холодним. Ось чому для гомогенізації розплаву за температурою такі печі потребують вимушеного перемішування рідкого металу. Існує декілька способів такого перемішування, проте загальновизнано, що найбільш ефективним є електромагнітний спосіб, який реалізується за допомогою різноманітних електромагнітних систем (індукторів). Для цього здебільшого використовуються лінійні індуктори з біжучим магнітним полем [1]. Проведені в Інституті електродинаміки НАН України наукові дослідження показали, що окрім таких індукторів, у цих печах доцільно використовувати також індуктори пульсуючого магнітного поля, особливо так звані універсальні індуктори з почерговою дією на метал пульсуючого і біжучого магнітних полів [2, 3]. Вони дають змогу суттєво підвищити ефективність електромагнітного перемішування рідкого металу у ванні відбивної печі.

Інша проблема виникає в таких печах у випадку, коли плавленню підлягає так звана легковагова шихта (металева стружка, алюмінієві банки з-під напоїв тощо). Незважаючи на те, що такі відходи попередньо перед плавленням компактують (брикетують), внаслідок відносно малої маси такі брикети після завантаження в піч практично повністю знаходяться

(плавають) на поверхні розплавленого металу, де, піддаючись верхньому нагріванню, значна частина металу в них окислюється та згорає.

Відомо цікаве рішення, яке дає змогу зменшити такі втрати під час плавлення алюмінієвих відходів. Воно полягає в тому, що зазначені відходи перед плавленням не брикетують а, навпаки, подрібнюють, а потім подають у вихровий потік рідкого металу («vortex flow»), створений в окремій, приєднаній до печі циліндричній камері [4, 5]. Подрібнена шихта затягується у воронку вихрового потоку, занурюється в розплав і подається далі в плавильну ванну печі. За даними вищенаведених іноземних джерел вихід придатного для повторного використання металу за такою технологією сягає 97–98 %.

Вихровий потік рідкого металу в такій системі створюється занурювальним відцентровим електромеханічним насосом. Цей насос, окрім формування вихрової воронки, забезпечує також циркуляцію металу в печі, тобто здійснює перемішування розплаву у ванні й подачу нагрітого в ній металу до вихрової камери, забезпечуючи таким чином ефективне плавлення алюмінієвої шихти. Проте наявність механічного насоса знижує надійність і довговічність такого конструктивного рішення через знаходження його ротора (лопатей) в агресивному середовищі рідкого металу.

В Інституті електродинаміки НАН України задля подолання цієї проблеми запропоновано замість електромеханічного насоса використати індукційну електромагнітну систему у вигляді дугового індуктора (дугового статора), що охоплює зовні циліндричну вихрову камеру. На рис. 1 наведено схему відбивної плавильної печі з циліндричною вихровою камерою 1, в якій за допомогою дугового індуктора 2 створюється вихровий (обертальний) потік рідкого металу. Циліндрична камера двома каналами (всмоктувальним 3 і натискним 4) з'єднана з плавильною ванною 5 печі. Вихровий потік, що виникає в камері,

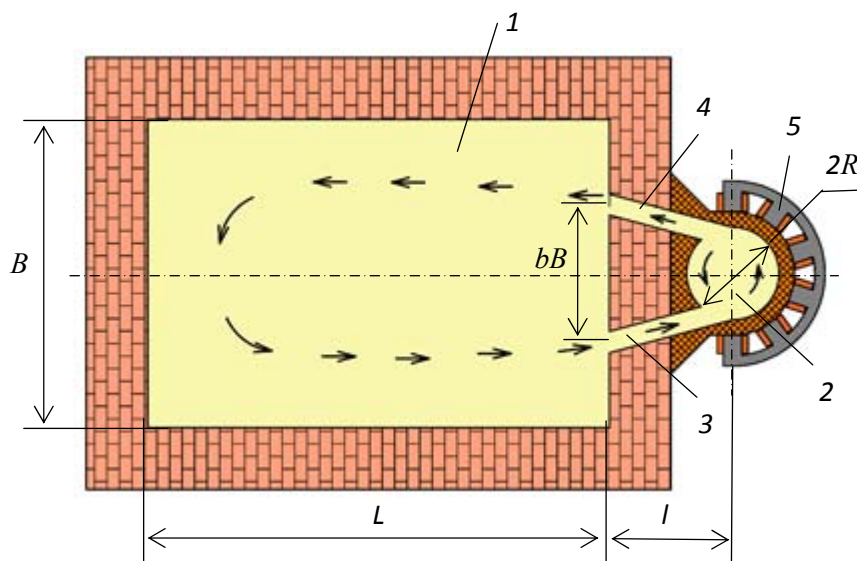


Рис. 1

розділяється в ній на дві частини, одна з яких надходить у ванну плавильної печі, де вона перемішує розплав і подає нагрітий метал у вихрову камеру, а інша замикається безпосередньо в самій камері, створюючи в ній вихрову воронку. Схема руху металу на цьому рисунку показана умовно для випадку, коли біжуче магнітне поле, створене індуктором, рухається в камері проти годинникової стрілки. У разі зміни напрямку руху (реверс)

магнітного поля з'єднувальні канали міняються місцями – всмоктувальний канал стає напірним, а напірний – всмоктувальним. Змінюючи кут, під яким з'єднувальні канали стикаються з циліндричною поверхнею бокової стінки вихрової камери, можна в разі потреби змінювати співвідношення між витратою рідкого металу, що поступає з камери у ванну печі, і витратою металу, котрий циркулює (обертається) у вихровій камері, створюючи таким чином необхідну воронку.

У роботі [6] шляхом математичного моделювання проведено дослідження гідродинамічних і теплових процесів у відбивній плавильній печі з такою камерою для двох значень кута приєднання натискного каналу до бокової поверхні камери. Показано, що в разі тангенційного приєднання цього каналу досягається максимальна ефективність перемішування металу у ванні печі, а приєднання його під кутом 45° забезпечує більший ніж

у першому випадку вихровий потік у вихровій камері.

Мета цієї роботи полягає у вивченні особливостей вихрової камери у складі відбивної печі як специфічного електромагнітного пристрою, що одночасно виконує дві функції: перемішує рідкий метал у ванні печі та створює вихрову гідродинамічну воронку в камері, куди завантажуються металева шихта для плавлення.

Дослідження проводилися шляхом математичного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів у відбивній печі з вихровою камерою та дуговим індуктором, схемі якої подано на рис. 1.

Математична модель. Для вирішення поставленої задачі сформульовано математичну модель для чисельного (комп'ютерного) дослідження зазначених процесів у такій установці. Модель складається з двох частин – систем диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні й гідродинамічні процеси. Вона побудована аналогічно розробленій раніше моделі для дослідження фізичних процесів, що протікають у відбивній плавильній печі з електромагнітним перемішувачем рідкого металу, виконаного у вигляді лінійного індуктора біжучого й пульсуючого магнітних полів [2, 3].

Електромагнітна частина моделі представлена диференціальними рівняннями відносно комплексних амплітуд векторного магнітного $\dot{\mathbf{A}}$ та скалярного електричного ϕ потенціалів:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \dot{\mathbf{A}} - \sigma \mathbf{u} \times (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r) \nabla \phi = \dot{\mathbf{J}}_e; \quad (1)$$

$$\nabla \dot{\mathbf{J}} = 0; \quad \nabla \dot{\mathbf{A}} = 0, \quad (2, 3)$$

де μ_0 і ε_0 – магнітна і діелектрична проникності вакууму, μ_r і ε_r – відносні магнітна і діелектрична проникності, σ – питома електропровідність, $\mathbf{u}$ – швидкість руху, ω – кутова частота, $\dot{\mathbf{J}}_e$ – комплексна амплітуда зовнішньої густини струму, $\dot{\mathbf{J}}$ – комплексна амплітуда густини струму провідності. Граничною умовою для цих рівнянь є умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях розрахункової області ($\dot{\mathbf{A}} = 0$).

За результатами моделювання (отриманими розподілами потенціалів) знаходяться значення диференціальних параметрів електромагнітного поля (напруженостей і індукцій магнітного і електричних полів, густини електричного струму тощо) та інтегральних параметрів електромагнітної системи, таких як напруга, струм, активна, реактивна й повна потужності, потужність тепловиділення в рідкому металі та ін., а також значення електромагнітних сил, що виникають у рідкому металі:

$$\mathbf{f} = 0,5 \operatorname{Re}(\dot{\mathbf{J}} \times \dot{\mathbf{B}}^*), \quad (4)$$

де $\dot{\mathbf{J}} = \sigma(-\nabla \phi - j\omega \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{u} \times \dot{\mathbf{B}})$ – густина струму провідності в рідкому металі, $\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times \dot{\mathbf{A}}$, $\dot{\mathbf{B}}^*$ – спряжений комплекс індукції магнітного поля.

Гідродинамічний процес в моделі представлено усередненою за Рейнольдсом системою нелінійних диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для турбулентної течії в'язкої рідини:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \nabla p + \nabla \cdot (\eta_{eff} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (6)$$

Тут ρ – густина рідкого металу; p – тиск; $\eta_{eff} = \eta + \eta_t$, – коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості, де η – коефіцієнт молекулярної динамічної в'язкості, η_t – коефіцієнт турбулентної в'язкості, розрахований відповідно до прийнятої моделі турбулентності; $\mathbf{f}$ – питома електромагнітна сила в рідкому металі, обчислена згідно з виразом (4). Для замикання рівнянь використовувалась k-ε модель турбулентності [7]. Гранична умова для цієї задачі задавалась на стінках, що контактують із рідким металом, у вигляді логарифмічного профілю швидкості для приграничного шару.

Представлену математичну модель сформульовано без урахування деформації вільної поверхні розплаву. У двовимірній постановці вона реалізована в пакеті програмного середовища COMSOL Multiphysics [8].

Постановка задачі. Розглядалася відбивна піч для плавлення алюмінію з вихровою камерою та дуговим індуктором, схему якої з позначеннями основних розмірів наведено на рис. 1. Довжина і ширина плавильної ванни печі – $L = 3$ м, $B = 2$ м. Внутрішній діаметр вихрової камери – $2R = 0,6$ м, розмір $l = 0,8$ м, відстань між каналами у ванні $b = 0,8$ м, ширина каналів – $0,1$ м.

Дуговий індуктор охоплює зовні половину циліндричної вихрової камери. Моделювання електромагнітного поля, яке він створює, проводилося на частоті 50 Гц за заданих ампер-витках у котушках, амплітудні значення яких у кожній із них складали по 20 кА. Фазовий кут між струмами сусідніх котушок прийнято рівним 60 ел. град. За такого живлення індуктор створює в камері біжуче магнітне поле, яке й викликає обертальний вихровий рух рідкого металу.

Оскільки вихрова камера в цій установці виконує дві функції, а саме – перемішує розплав у ванні печі й одночасно створює в ній вихрову воронку, в яку подається подрібнена шихта – важливо окремо оцінити кожну цю дію. Розглядаючи насамперед таку камеру як електромагнітний насос, що виступає в ролі електромагнітного перемішувача рідкого металу у ванні печі, варто зазначити, що натиск такого насосу, тобто тиск, який він створює, складатиметься з натисків обох каналів, що з'єднують камеру й плавильну ванну печі. Водночас натиск кожного з них – і всмоктувального (вхідного) і натискного (вихідного) – насамперед залежить від кута приєднання каналу α до бокової циліндричної поверхні вихрової камери. Можна стверджувати, що в разі тангенційного приєднання каналів цей тиск буде максимальним, а за кута приєднання $\alpha = 90^\circ$ теоретично він дорівнює нулю.

На рис. 2 схематично зображено декілька варіантів приєднання кожного каналу. На рис. 2 а показано тангенційне приєднання до камери обох каналів, на рис. 2 б – приєднання під кутом $\alpha = 90^\circ$ всмоктувального каналу за тангенційного приєднання натискного каналу і на рис. 2 в – приєднання під проміжним кутом натискного каналу за тангенційного приєднання всмоктувального каналу. За кут приєднання α у всіх випадках прийнято кут між віссю каналу й дотичною до циліндричної поверхні камери в точці перетину осі каналу з цією поверхнею. За тангенційного, як показано на рисунку, приєднання значення цього кута, яке, до речі, за такого позначення відмінне від нуля, залежить від геометричних розмірів каналу і вихрової камери. За прийнятих вище розмірів цей кут приблизно складає 33° (на відміну від позначення кута приєднання, прийнятого в роботі [6], де тангенційне приєднання відповідає нулю градусів).

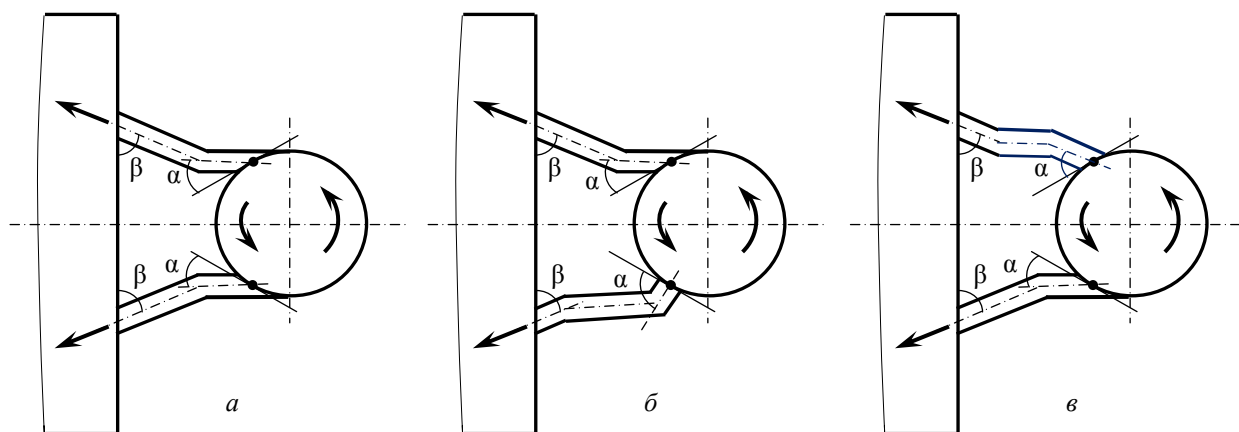


Рис. 2

З'єднувальні канали на рис. 2 зображено у вигляді ламаних ліній (ділянок) таким чином, що їхня ділянка, яка стикується з ванною печі, для всіх значень кута α залишається приєднаною до ванни під одним і тим же кутом β на одній відстані b між ними. Це зроблено навмисно для того, щоб у разі зміни кута α у процесі моделювання кут β і розмір b не змінюва-

лися, що дає змогу підтримувати приблизно однакову структуру (картину) течії металу у ванні печі для всіх розрахункових варіантів.

Оскільки, як було зазначено, при куті $\alpha = 90^\circ$ з'єднувальний канал не створює тиск, це дає змогу оцінити внесок кожного каналу в загальний натиск вихрової камери, тобто, задаючи, наприклад, $\alpha = 90^\circ$ для натискного каналу, можна визначити натиск всмоктувального каналу і навпаки. Така оцінка для кожного каналу окремо й для камери в цілому виконувалася за допомогою середньої швидкості рідкого металу у ванні відбивної печі $u_{av} = (1/S_b) \int_{S_b} |u| dS$, де $S_b = L B$, та витрат металу через поперечний переріз каналів.

Аналогічним чином можна розглянути та провести оцінку такої камери як пристрою обертального руху рідкого металу, тобто з позиції створення в ній вихрового (обертального) руху рідкого металу, який формує необхідну воронку. Така оцінка проводилася за допомогою середньої кутової швидкості металу у вихровій камері $\Omega = (1/S_{ch}) \int_{S_{ch}} (u_\phi / r) dr d\phi$, де $S_{ch} = \pi R^2$, r і ϕ – полярні координати відносно осі камери.

Результати моделювання. Моделювання виконувалося в безіндукційному наближенні, тобто без урахування електромагнітного поля, що наводиться в рідкому металі під час руху, тобто при $\mathbf{u} = 0$ у рівнянні (1).

На рис. 3 і 4 наведено результати комп'ютерного моделювання відбивної печі з вихровою камерою, які демонструють вплив кута приєднання з'єднувальних каналів до циліндричної поверхні камери. На рис. 3 наведено значення середньої швидкості металу u_{av} у ванні печі (рис. 3 а) та об'ємної витрати металу G через канали (рис. 3 б), які характеризують роботу камери як електромагнітного перемішувача розплаву у ванні печі залежно від кута приєднання каналів α до камери. Об'ємна витрата металу тут розрахована за умови, що висота металу в системі складає 0,5 м. Рис. 4 характеризує роботу вихрової камери з позиції створення в ній обертального руху металу, тут показано залежності від цього кута середньої кутової швидкості рідкого металу Ω в камері. На цих рисунках криві 1 отримано в разі дії тільки одного всмоктувального каналу, криві 2 – у разі дії натискного каналу, а криві 3 – за спільної дії обох каналів.

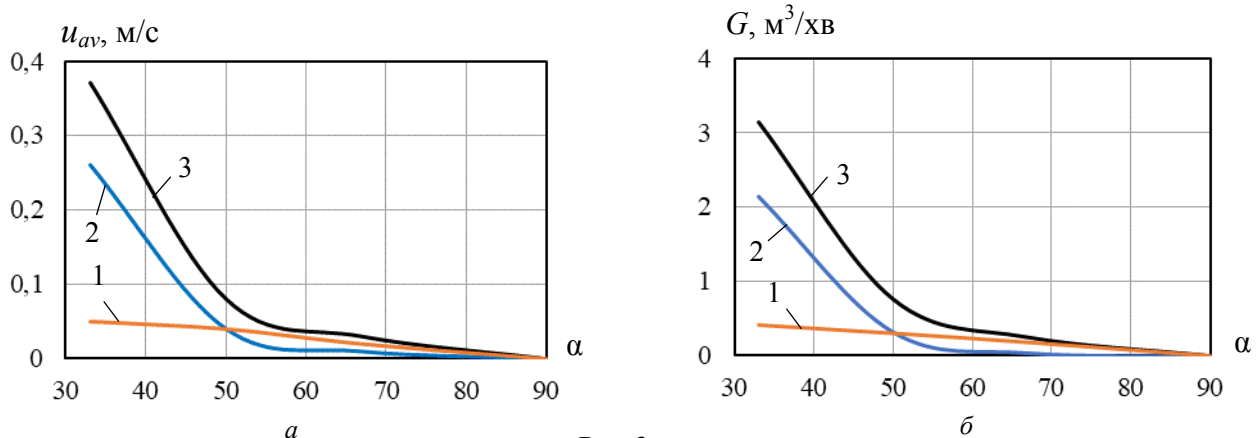


Рис. 3

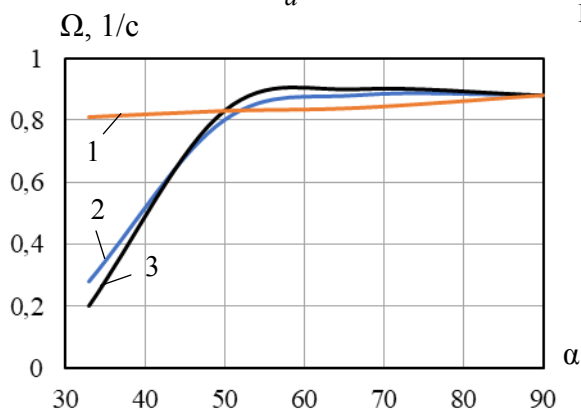


Рис. 4

Аналізуючи дані, наведені на рис. 3, можна відзначити, що в діапазоні значень кута $\alpha = (33 \dots 50)$ град. натискна дія вихідного каналу (криві 2) суттєво перевершує всмоктувальну дію вхідного (криві 1), а спільна дія обох каналів (криві 3) приблизно дорівнює сумі окремих дій кожного каналу. При $\alpha > 50^\circ$ зазначені дії обох каналів стають набагато меншими. Водночас слід зазначити, що обидва рисунки (3 а і б) виявилися ідентичними один одному, що дає

змогу стверджувати, що таку систему з погляду перемішувача рідкого металу у ванні печі можна характеризувати (оцінювати) за допомогою одного параметра: середньої швидкості металу у ванні печі або витрати металу через один із з'єднувальних каналів.

Що стосується вихрової дії камери як пристрою обертального руху металу, дані якої наведено на рис. 4, то виявляється, що вплив кута приєднання всмоктувального каналу на обертальний рух металу в камері, як і в попередньому випадку, практично незначний (крива 1). Вплив же натискного каналу на цей рух суттєво залежить від кута α тільки в діапазоні $33 \dots 50$ град., а при $\alpha > 50^\circ$ він стає мінімальним (крива 2).

Таким чином, виходячи з отриманих результатів, можна зробити такі висновки. Оскільки кут приєднання всмоктувального каналу до циліндричної поверхні вихрової камери незначною мірою впливає на роботу камери, то його значення можуть бути будь-якими (від 33 до 90°). Кут же приєднання натискного каналу по-різному впливає на ефективність роботи камери. Для отримання максимального перемішування металу у ванні печі цей кут повинен бути мінімальним, а для досягнення максимального обертального руху металу в камері його значення повинні бути в межах $\alpha \geq 50^\circ$. Оскільки одночасно задовольнити обидві умови (вимоги) на максимальному рівні неможливо, на практиці слід приймати компромісне рішення, яке з практичного погляду задовольнить роботу вихрової камери з одного боку як перемішувача, що забезпечує необхідну гомогенізацію металу у ванні печі за температурою, а з іншого – як обертового пристрою для створення вихрової воронки необхідної інтенсивності. Як один із можливих варіантів може бути прийнято такий, в якому кут приєднання одного каналу знаходиться, наприклад, на рівні 40° , а іншого – 33° (тангенційне приєднання). У цьому випадку, змінюючи напрям руху біжучого магнітного поля індуктора (з прямого на зворотне і навпаки), можна за потребою окремо підсилювати дію вихрової камери як перемішувача або як обертового пристрою металу.

На рис. 5 для варіанта, в якому верхній (на цьому рисунку) канал приєднано до камери під кутом 40° , а нижній – під кутом 33° , подано результати моделювання гідродинамічної течії у вигляді розподілу швидкості розплаву алюмінію у відбивній печі з дуговим індук-

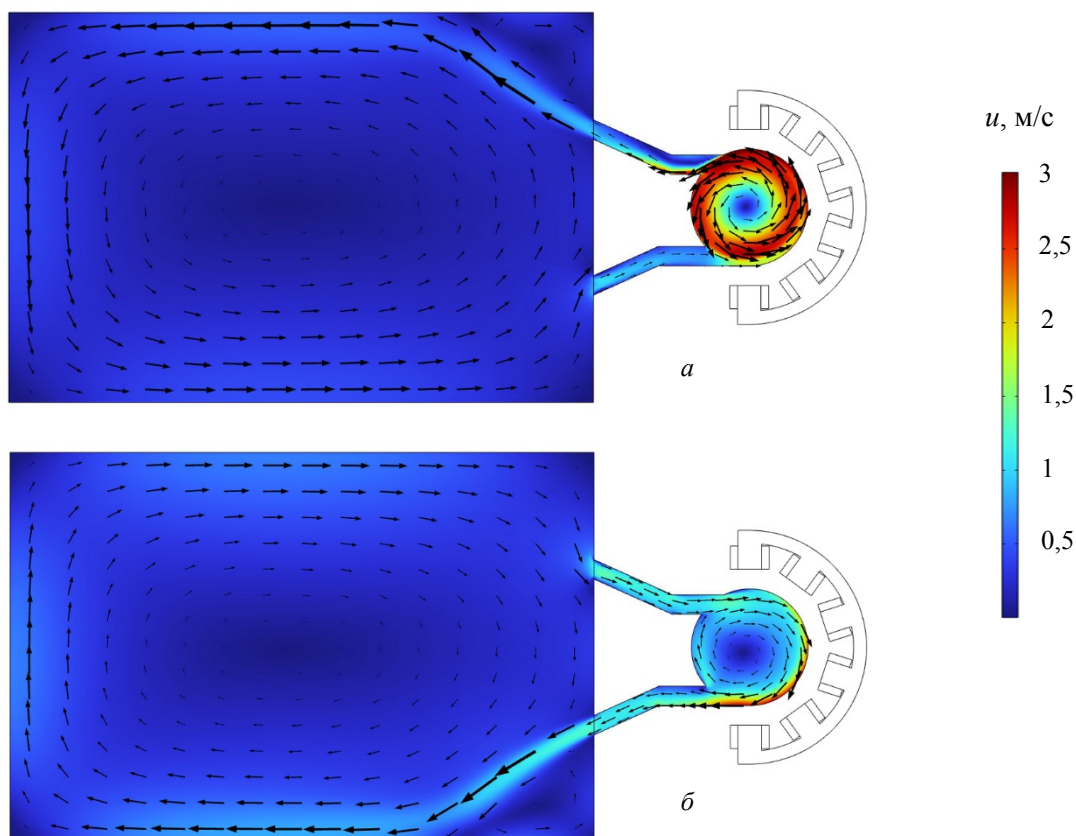


Рис. 5

тором, біжуче магнітне поле якого рухається проти годинникової стрілки (рис. 5 а) і за нею (рис. 5 б). Інтегральні параметри для цього конструктивного рішення в першому випадку склали: середня швидкість металу у ванні печі $u_{av} = 0,24$ м/с, об'ємна витрата розплаву через канали $G = 1,95$ м³/хв та середня кутова швидкість металу у вихровій камері $\Omega = 0,59$ 1/с. У другому випадку: $u_{av} = 0,34$ м/с, $G = 2,55$ м³/хв, $\Omega = 0,26$ 1/с. Таким чином, для збільшення ефективності перемішування рідкого металу у ванні печі біжуче магнітне поле індуктора в камері повинно рухатися за годинниковою стрілкою, а якщо необхідно підвищити дію вихрової воронки, рух магнітного поля потрібно змінити на зворотній.

Висновки. 1. Вихрова камера з дуговим індуктором, якою оснащена відбивна плавильна піч, одночасно виконує дві функції (дії): перемішує рідкий метал у ванні печі та створює вихровий обертальний рух розплаву в камері, куди завантажуються подрібнена металева шихта для плавлення. Ефективність обох функцій залежить від кута приєднання каналів, що з'єднують камеру з ванною печі, до бокової циліндричної стінки вихрової камери.

2. Натискна дія вихідного каналу вихрової камери суттєво перевершує всмоктувальну дію вхідного каналу для значень кута приєднання в межах від тангенційного приєднання до 50° . У діапазоні значень кута приєднання від 50 до 90° для обох каналів його вплив на роботу камери незначний як з погляду електромагнітного перемішування рідкого металу у ванні печі, так і з погляду створення вихрового руху в камері.

3. За різних значень кута приєднання до камери вхідного й вихідного каналів можна окремо керувати інтенсивністю кожної функції вихрової камери шляхом реверсу біжучого магнітного поля дугового індуктора.

Фінансується за кошти держбюджетної теми "Розвиток теорії електротехнологічних процесів та розроблення ефективних електроплавильних і електрозарядних систем з керованим електромагнітним впливом (шифр "Елтех)". Державний реєстраційний номер роботи 0122U000839. КПКВК 6541030.

1. Stal R., Hanley P. Electromagnetic stirring in aluminum ladles. ABB Value Paper. 2009.
2. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Токаревский А.В. Трехмерное моделирование однофазного электромагнитного перемешивателя жидких металлов. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 5. С. 77–84.
3. Dubodelov V.I., Gorislavets Y.M., Glukhenkii A.I., Fikssen V.N. Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of traveling and pulsating magnetic fields. *Proc. of the 8-th Inter. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials EPM 2015*. October 12–16, 2015. Cannes, France. Pp. 605–608.
4. <https://www.yumpu.com/xx/document/view/14174965/-lotuss-pyrotek> (дата доступу: 01.05.2023).
5. <https://www.youtube.com/watch?v=EwvhukuQ-HQ> (дата доступу: 01.05.2023).
6. Пенковий Т.О., Халатов А.А., Гориславец Ю.М. Моделирование гидродинамических и тепловых процессов у відбивній плавильній печі з вихровою камерою. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2023. Т. 45. № 1. С. 84–90.
7. Plinca F., Pelletier D. Positivity preservation and adaptive solution of the k-ε model of turbulence. *AIAA Journal*. 1998. 36(1). Pp. 44–50.
8. COMSOL Multiphysics. Simulation Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата доступу: 01.05.2023).

SIMULATION OF A REVERBERATORY MELTING FURNACE EQUIPPED WITH A VORTEX CHAMBER WITH A CURVE INDUCTOR

Yu.M. Gorislavets¹, T.O. Penkovi^{1,2}

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

2 – National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Beresteyskyi ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

e-mail: ugoris@ied.org.ua

A scheme of a reverberatory furnace for melting aluminium waste in a vortex flow of melt created by a curve inductor in a separate cylindrical chamber is presented. The vortex chamber, which is connected to the furnace's melting bath by means of two channels, performs two functions in this furnace: it stirs the molten metal in the bath and creates a vortex funnel into which the pulverized charge is fed. A mathematical model for numerical research of electromagnetic and hydrodynamic processes in such a system is formulated. The influence of the angle of attachment of the suction and pumping channels to the side cylindrical surface of the vortex chamber on its parameters was determined. Such pa-

rameters were the average speed of liquid metal in the furnace bath, the melt flow through the cross sections of the connecting channels and the average angular speed of the metal in the chamber. It was established that the angle of the connection of the suction channel has little effect on the operation of the chamber, in contrast to the angle of the pumping channel, which in order to achieve maximum efficiency of metal stirring in the bath should take minimum values, and to create the maximum vortex funnel should be more than 50° . Considerations are given regarding the compromise values of this angle, which can ensure the necessary operation of the chamber, both from the point of view of the liquid metal stirrer in the furnace bath, and from the point of view of the rotating device of the metal in the chamber. Ref. 8, fig. 5.

Keywords: reverberatory melting furnace, vortex chamber, curve inductor, liquid metal, modelling of electromagnetic and hydrodynamic processes, connecting channels, angle of connection of channels to the vortex chamber.

1. Stal R., Hanley P. Electromagnetic stirring in aluminium ladles. ABB Value Paper. 2009.
2. Glukhenkyi A.I., Gorislavets Yu.M., Tokarevsky A.V. Three-dimensional modelling of a single-phase electromagnetic stirrer of liquid metals. *Tekhnichna electrodynamika*. 2013. No. 5. Pp. 77–84. (Rus)
3. Dubodelov V.I., Gorislavets Y.M., Glukhenkii A.I., Fikssen V.N. Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternating action of traveling and pulsating magnetic fields. *Proc. of the 8th Inter. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials EPM 2015*. October 12–16, 2015. Cannes, France. Pp. 605–608.
4. <https://www.yumpu.com/xx/document/view/14174965/-lotuss-pyrotek> (accessed: 05/01/2023).
5. <https://www.youtube.com/watch?v=EwvhukuQ-HQ> (accessed: 05/01/2023).
6. Penkovyi T.O., Khalatov A.A., Goryslavets Yu.M. Modelling of hydrodynamic and thermal processes in a reverberatory melting furnace with a vortex chamber. *Teplofizyka ta teploenerhetyka*. 2023. Vol. 45. No 1. Pp. 84–90. (Ukr)
7. Ilinca F., Pelletier D. Positivity preservation and adaptive solution of the k- ϵ model of turbulence. *AIAA Journal*. 1998. 36(1). Pp. 44–50.
8. COMSOL Multiphysics. Simulation Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (accessed: 05/01/2023).

Надійшла: 18.05.2023

Прийнята: 02.06.2023

Submitted: 18.05.2023

Accepted: 02.06.2023