

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДБИВНІЙ ПЕЧІ ДЛЯ АЛЮМІНІЮ З ЕЛЕКТРОВИХРОВОЮ КАМЕРОЮ ІЗ УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЇ ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ РІДКОГО МЕТАЛУ

О.І. Бондар*, канд. техн. наук, **Ю.М. Гориславцев****, докт. техн. наук, **Т.О. Пеньковий*****
Інститут електрогідродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: yugoris@ukr.net.

Представлено схему відбивної печі для плавки алюмінієвих відходів з циліндричною електровихровою камерою, в якій за допомогою дугового індуктора створено вихровий (обертальний) потік рідкого металу. Зазначена камера двома каналами з'єднана з плавильною ванною печі і виконує дві функції: перемішує розплавлений метал у ванні печі та занурює в розплав подрібнений металевий брухт для захисту металу від окислення з подальшим транспортуванням його в плавильну ванну. Для такої системи сформульовано математичну модель задля дослідження електромагнітних і гідродинамічних процесів в ній з урахуванням деформації вільної поверхні (меніску) рідкого металу. Модель складається із двох частин – систем диференціальних рівнянь, що описують зазначені процеси. Деформація вільної поверхні визначалася методом рухомої сітки. Дослідження проводилося для різних значень висоти металу у ванні печі, яке змінювалося від початкового значення 0,2 м до повної висоти ванни 0,5 м, що моделювало процес наплавлення металу в печі в процесі роботи. Розглянуто два варіанти розташування індуктора по висоті вихрової камери: один – у нижній її частині, а другий – по середині відносно висоти металу повністю наплавленої ванни печі. У результаті проведеного моделювання отримано розподіли швидкості рідкого металу у ванні печі та вихровій камері, визначено деформацію верхньої вільної поверхні металу в камері та середній рівень металу в ній відносно рівня металу в плавильній ванні. Для різного наповнення ванни печі визначено траєкторії руху рідкого металу в електровихровій камері. Бібл. 10, рис. 8.

Ключові слова: відбивна піч, електровихрова камера, рідкий метал, математичне моделювання, гідродинамічні процеси, деформація вільної поверхні.

Вступ. Проблема переплавлення алюмінію є особливо актуальною за відсутності первинного виробництва цієї сировини. Для отримання алюмінію та його сплавів у таких випадках залучають вторинний алюміній, який отримують у результаті переплавки металевих відходів (брухту). Часто для цього використовують відбивні печі, тобто печі з верхнім поверхневим нагріванням, які можуть бути електричними (печі електроопору) або полум'яними (паливними, газовими). Металеві відходи, особливо легковагові відходи (металева стружка тощо), перед завантаженням у такі печі попередньо компактуються (брикетуються). Але внаслідок відносно малої маси такі брикети практично повністю знаходяться (плавають) на поверхні розплавленого металу, де, піддаючись верхньому нагріванню, значна частина металу в них окислюється та згорає [1].

Відома технологія, що реалізується системою Metaullics LOTUSS (LOW TURbulence Scrap Submergence) [2, 3], за якою плавлення алюмінієвих відходів здійснюють у відбивних печах, оснащених вихровою камерою, в якій створюється вихровий (обертальний) рух рідкого металу. Для цього попередньо подрібнений брухт алюмінію (шихта) подається в зазначену камеру, в якій створеною гідродинамічною воронкою вихрового потоку він затягується (занурюється) в розплав, і далі подається в плавильну ванну печі. Така технологія дає змогу суттєво зменшити окислення та безповоротні втрати металу. За даними [4] та інших джерел вихід придатного для повторного використання алюмінію за такою технологією сягає 97-98 %. Вихровий потік рідкого металу в такій установці створюється

© Бондар О.І., Гориславцев Ю.М., Пеньковий Т.О., 2026

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-1678-8862>; ** <https://orcid.org/0000-0003-1668-4972>;

*** <https://orcid.org/0009-0007-8294-760X>

© Видавець ВД «Академперіодика», НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

зануреним відцентровим електромеханічним насосом. Цей насос окрім формування вихрової воронки в камері забезпечує також циркуляцію металу в печі, тобто здійснює перемішування розплаву у ванні, подачу нагрітого в ній металу до вихрової камери та транспортування подрібнених відходів до плавильної ванни печі, забезпечуючи таким чином ефективне плавлення алюмінієвої шихти. Проте наявність механічного насоса знижує надійність і довговічність такого конструктивного рішення через знаходження його ротора (лопатеї) в агресивному середовищі рідкого металу. Задля усунення цього недоліку авторами запропоновано створювати такий рух металу в циліндричній камері індукційним способом за допомогою електромагнітних систем, зокрема дугового індуктора (дугового статора), що охоплює зовні вихрову камеру [5].

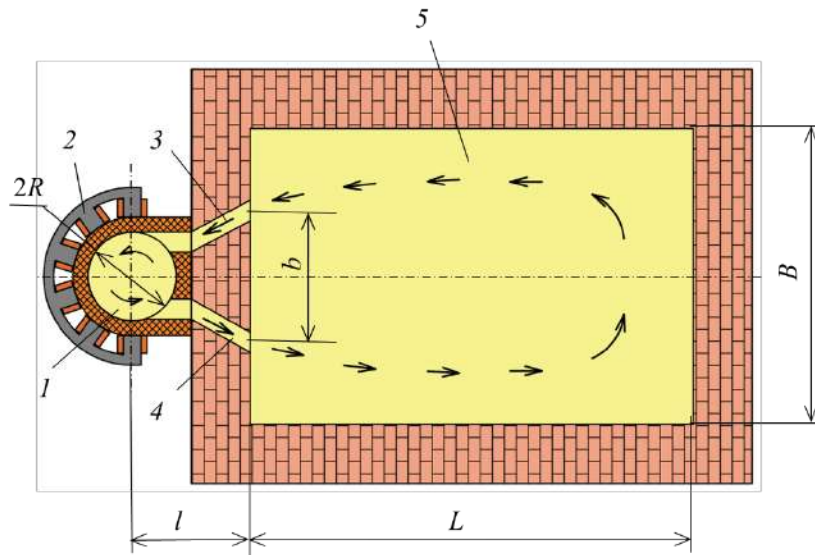


Рис. 1

На рис. 1 наведено схему відбивно-плавильної печі з приєднаною до неї вихровою (електровихровою) камерою. На відміну від системи LOTUSS, яка включає в себе дві з'єднані між собою камери, в одній із яких поміщається відцентровий механічний насос, а в іншій створюється вихрова гідродинамічна воронка, ця система має у своєму складі одну циліндричну камеру 1, в якій за допомогою дугового індуктора 2 створюється вихровий (обертальний) потік рідкого металу. Зазначена камера двома каналами (всмоктувальним 3 і натискним 4) з'єднана з плавильною ванною 5 печі. Подрібнена металева шихта,

яка безперервно подається в камеру, через натискний канал поступає у ванну печі, де вона плавиться. Вихровий потік, що виникає в камері, умовно можна розділити на дві частини, одна з яких надходить у ванну плавильної печі, транспортуючи таким чином подрібнену шихту, перемішує в ній розплав і подає нагрітий метал у вихрову камеру, а інша замикається безпосередньо в самій камері, створюючи в ній обертальний потік рідкого металу для занурення подрібненої шихти. Таким чином, вихрова камера в такій системі одночасно виконує дві функції: функцію електромагнітного перемішувача рідкого металу в плавильній печі та системи для занурення шихти в рідкий метал задля захисту від окислення і подачі її у ванну печі.

В роботі [5] шляхом тривимірного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів проведено дослідження такої установки. Моделювалася система, в якій натискний канал був приєднаний до камери у нижній її частині по висоті, а всмоктувальний – у верхній. У результаті було встановлено, що ефективність електровихрової камери відбивно-плавильної печі залежить від відносної висоти з'єднувальних каналів та кута приєднання натискного каналу до циліндричної поверхні вихрової камери. Зазначені дослідження проводилися без врахування меніску, тобто деформації вільної поверхні рідкого металу. Така постановка дає змогу оцінити ефективність електровихрової камери як електромагнітного перемішувача, проте вона не дає можливості достовірно отримати уявлення про роботу камери як занурювача металевої шихти, оскільки в цьому випадку не моделюється гідродинамічна воронка. Представлення про спроможність такої камери занурювати шихту може надати постановка і розв'язання гідродинамічної задачі з урахуванням деформації вільної (верхньої) поверхні рідкого металу в ній.

Відома робота [6], в якій наведено результати моделювання гідродинамічних процесів у вихровій камері з урахуванням меніску для системи Metaullics LOTUSS. В роботі зазначено, що розроблена авторами обчислювальна модель забезпечує достовірне представлення про потік всередині вихрової камери та є корисним інструментом для візуалізації циркуляції металу в ній. За допомогою індикаторних (трасерних) частинок, розміщених на поверхні вихору, показана можливість оцінки занурення подрібненої шихти без проведення складних термодинамічних розрахунків.

Видається доцільним проведення аналогічних досліджень для плавильної печі з електровихровою камерою, конструктивну схему якої представлено на рис. 1. А тому **мета цієї роботи** – на основі розробленої математичної моделі шляхом виконання комп'ютерного моделювання електрогідродинамічних процесів у відбивній печі, оснащений електровихровою камерою, з урахуванням деформації вільної поверхні (меніску) рідкого металу оцінити функціональну можливість електровихрової камери одночасно перемішувати рідкий метал у ванні печі та занурювати алюмінієвий брут в товщу розплаву, дослідити закономірності електромагнітного впливу на рідкий метал на різних етапах наплавлення ванни печі.

Математична модель. Заля вирішення поставленої задачі сформульовано математичну модель для чисельного (комп'ютерного) дослідження зазначених процесів у такій установці. Модель складається із двох частин – систем диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні і гідродинамічні процеси.

Електромагнітна частина моделі представлена диференціальним рівнянням відносно комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу $\dot{\mathbf{A}}$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r) \dot{\mathbf{A}} - \sigma \mathbf{u} \times (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \dot{\mathbf{J}}_e, \quad (1)$$

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. Граничною умовою для цих рівнянь є умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях розрахункової області ($\dot{\mathbf{A}} = 0$). Складова електромагнітного поля, зумовлена рухом рідкого металу, не враховувалася, тобто вважалося, що в рівнянні (1) $\mathbf{u} = 0$.

За результатами моделювання (отриманим розподілом магнітного потенціалу) знаходяться значення диференціальних параметрів електромагнітного поля (напруженості та індукції магнітного і електричних полів, густини електричного струму тощо) та інтегральних параметрів електромагнітної системи, таких як напруга, струм, активна, реактивна і повна потужності, потужність тепловиділення в рідкому металі та ін., а також значення електромагнітних сил, що виникають у рідкому металі

$$\mathbf{f} = 0,5 \operatorname{Re}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}), \quad (2)$$

де $\mathbf{J}$ – густина струму провідності; $\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times \dot{\mathbf{A}}$, $\mathbf{B}$ – спряжений комплекс індукції магнітного поля.

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

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \nabla p + \nabla \cdot (\eta_{eff} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (4)$$

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 виразу (2). Для замикання рівнянь використовувалась k - ϵ модель турбулентності [7]. Розрахункова область гідродинамічної задачі обмежувалася лише об'ємом рідкого металу у ванні печі, каналах та вихровій камері. Розглядалися два види границь для досліджуваної області – непроникні стінки та вільна поверхня. Граничні умови для швидкості, турбулентної кінетичної енергії та її дисипації на непроникних стінках з врахуванням логарифмічного профілю швидкості для приграничного шару застосовувалися у відповідності з математичною моделлю, запропонованою в роботі [8]. Тиск навколишнього середовища на вільній поверхні описувався співвідношенням

$$\left(-p\mathbf{I} + \eta_{eff} \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right) \cdot \mathbf{n} = -p_{atm} \cdot \mathbf{n}, \quad (5)$$

де $p_{atm} = 101325$ Па. Деформація вільної поверхні рідкого металу визначалася методом рухомої сітки, при цьому нормальна складова швидкості руху вузлів сітки вільної поверхні задавалася наступним чином [9]:

$$\mathbf{u}_{mesh} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}, \quad (6)$$

де $\mathbf{u}_{mesh}$ – швидкість руху вузлів сітки.

Сформульовану таким чином математичну модель реалізовано в пакеті програмного середовища COMSOL Multiphysics [10].

Постановка задачі. Розглядалася відбивна піч для плавлення алюмінію з електровихровою камерою у вигляді циліндричної камери з дуговим індуктором, схему якої з позначеннями основних розмірів наведено на рис. 1. Довжина і ширина внутрішньої частини плавильної ванни печі $L = 3$ м і $B = 2$ м. Внутрішній діаметр вихрової камери $2R = 0,6$ м, розмір $l = 0,8$ м, відстань між каналами у ванні печі $b = 0,8$ м, ширина каналів $b_c = 0,1$ м. Шестиполіусний дуговий індуктор охоплює зовні половину циліндричної вихрової камери. Його внутрішній діаметр складає $0,8$ м, а висота (по магнітопроводу) – $0,2$ м. Розглядалося два варіанти розташування індуктора по висоті вихрової камери: один – в нижній її частині як показано на рис. 2, на якому представлено загальний вигляд фрагмента установки з електровихровою камерою, та другий – коли індуктор розташований по

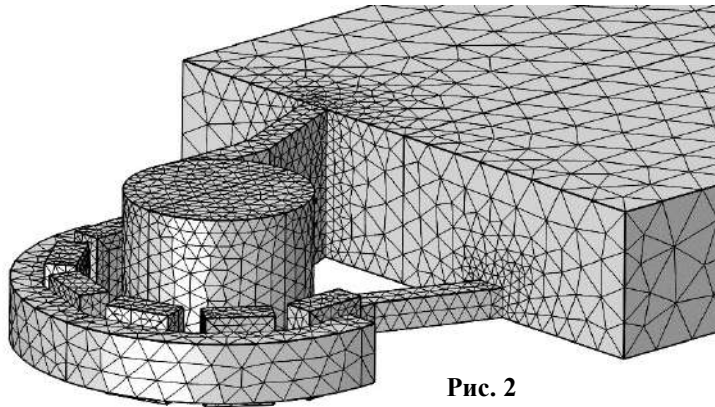


Рис. 2

середині відносно висоти металу повністю наплавленої ванни печі, яка прийнята рівною $H = 0,5$ м. Моделювання електромагнітного поля, яке створює індуктор, проводилося на частоті 50 Гц за заданих ампер-витках в 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 (обертове) магнітне поле, яке й визиває обертальний

вихровий рух рідкого металу.

Дослідження проводилося для різних значень висоти металу H у ванні печі, яке змінювалося від початкового значення $H = 0,2$ м до повної висоти ванни $H = 0,5$ м, що моделювало процес наплавлення металу в печі, тобто збільшення розплаву у ванні в процесі роботи печі. Особливість конструктивного виконання цієї системи полягає в тому, що її напірний канал приєднано до нижньої частини камери, а всмоктувальний канал виконано зверху відкритим (у вигляді лотка). Висота поперечного перерізу напірного каналу становить $0,1$ м. Обидва канали приєднано до бокової циліндричної поверхні камери тангенційно (див. рис. 2).

Результати моделювання та їх аналіз. На рис. 2 показана розрахункова сітка для системи з повністю наповненою ванною печі ($H = 0,5$ м) з нижнім розміщенням дугового індуктора, а на рис. 3 для такої ванни представлено розподіли швидкості рідкого металу в електровихровій камері (стрілками та в кольорі) для двох положень індуктора. Рис. 3, а відноситься до нижнього розташування індуктора, рис. 3, б – до середнього. Розподіли швидкості на цих рисунках показано в

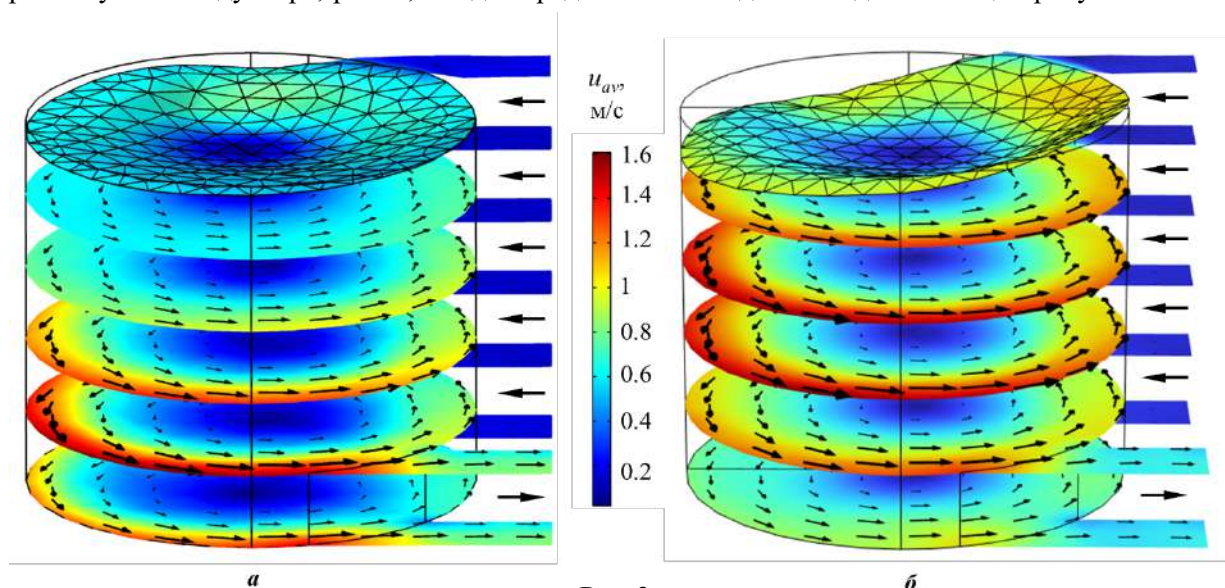


Рис. 3

горизонтальних перерізах камери, побудованих з кроком 0,1 м по висоті, а також на верхній (деформованій) поверхні металу, на якій замість стрілок швидкості умовно показана розрахункова сітка, яка дає змогу скласти уявлення про отриманий меніск, тобто форму вільної поверхні рідкого металу. Порівнюючи між собою ці два рисунки, можна відзначити, що, як і слід було очікувати, максимальні значення швидкості металу у першому випадку досягають у нижній частині електровихрової камери, а у другому – в середній. Що стосується величини деформації вільної поверхні, яку можна оцінити як $\Delta z = (z_{\max} - z_{\min})$, тобто як різницю між максимальним і мінімальним значеннями координат точок деформованої поверхні по вертикальній осі, то вона виявилася більшою у випадку середнього положення індуктора.

Враховуючи, що, як було показано в [5], натиск вихідного каналу електровихрової камери суттєво перевершує всмоктувальну дію вхідного каналу, рівень рідкого металу в камері буде нижче рівня металу в плавильній ванні печі, що і підтверджується моделюванням. У разі увімкнення індуктора рівень металу в камері зменшується, а у ванні печі він практично залишається незмінним через велику різницю об'ємів металу в камері і у ванні печі. Як видно з рис. 3, для нижнього положення дугового індуктора середній рівень металу в камері виявився вищим у порівнянні з середнім його розташуванням.

Розподіл швидкості рідкого металу в плавильній ванні відбивної печі з електровихровою камерою, отриманий у результаті моделювання такої системи, практично нічим не відрізняється від розподілу, наведеного в роботі [5] для аналогічної системи без врахування деформації вільної поверхні, а тому тут не приводиться.

Прослідкувати детально за рухом металу в системі, що розглядається, можна за допомогою розрахункових траєкторій руху потоку. На рис. 4 як приклад показано отримані у результаті моделювання траєкторії руху у вихровій камері для нижнього положення індуктора при $H = 0,5$ м. Як видно з цього рисунку, у разі повної ванни печі рідкий метал, який надходить в камеру із ванни через відкритий зверху всмоктувальний канал, розкручується в ній, рухаючись по складним траєкторіям. Та частина металу, що поступає в камеру через верхню по висоті ділянку поперечного перерізу

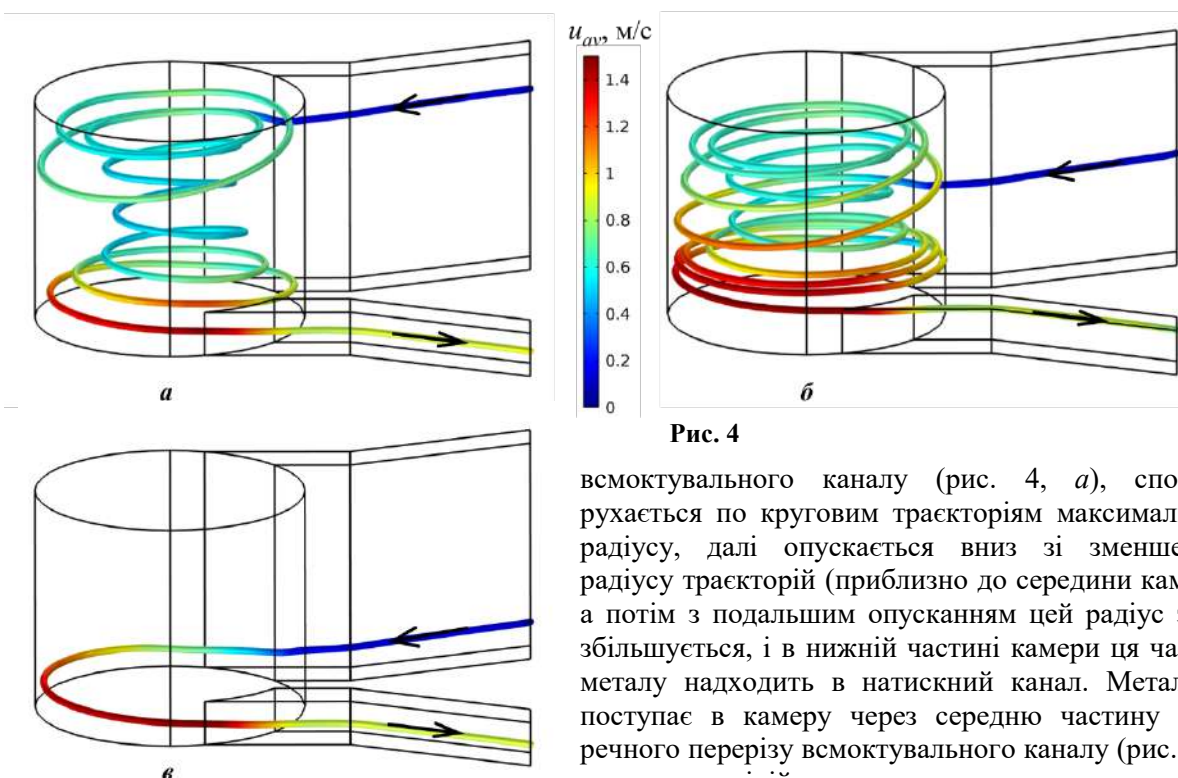


Рис. 4

всмоктувального каналу (рис. 4, а), спочатку рухається по круговим траєкторіям максимального радіусу, далі опускається вниз зі зменшенням радіусу траєкторій (приблизно до середини камери), а потім з подальшим опусканням цей радіус знову збільшується, і в нижній частині камери ця частина металу надходить в натискний канал. Метал, що поступає в камеру через середню частину поперечного перерізу всмоктувального каналу (рис. 4, б), спочатку підіймається вверх по траєкторіям великого радіусу, а потім опускається вниз спочатку зі зменшенням, а потім зі збільшенням радіусу траєкторій аж до попадання його в натискний канал. І, нарешті, та частина металу, що поступає в камеру через нижню ділянку поперечного перерізу всмоктувального каналу (рис. 4, в), прискорюється в камері і зразу ж надходить в натискний канал.

Цікаво прослідити за рухом самого верхнього шару металу, що поступає із всмоктувального каналу на деформовану верхню поверхню камери, адже саме цей шар починає втягувати (занурювати) тверду шихту вглиб рідкого металу. На рис. 5 для $H = 0,5$ м показано траєкторії руху

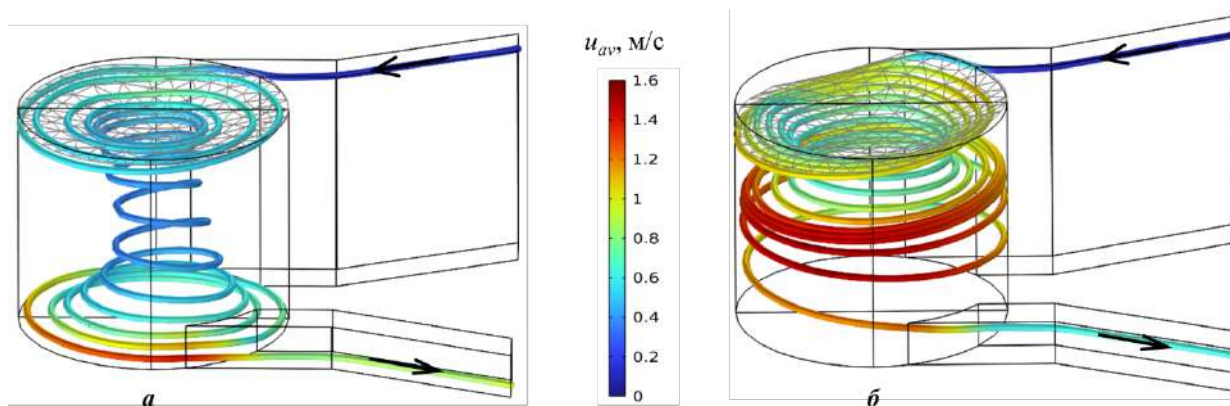


Рис. 5

цієї частини металу для нижнього (рис. 5, а) та середнього (рис. 5, б) розміщення дугового індуктора. В обох випадках цей метал, попадаючи в камеру, рухається в ній на верхній поверхні по круговим траєкторіям, а потім, починаючи з певного радіусу, опускається вниз, продовжуючи рухатися по траєкторіям меншого радіусу. Лінії потоку вказують на те, що індуктор, який створює циркуляцію рідкого металу в камері, викликає сильну вихрову дію, що сприяє примусовому зануренню металевих брукху з вільної поверхні рідкого металу. Враховуючи, що у разі нижнього розміщення індуктора ця частина металу здійснює на верхній поверхні меншу кількість обертів і час знаходження її на цій поверхні майже у два рази менший, можна припустити, що початкова занурювальна дія електровихрової камери за такого розміщення індуктора буде більшою.

На рис. 6–8 представлено отримані у результаті проведеного моделювання інтегральні параметри системи в залежності від висоти металу в плавильній ванні відбивної печі для двох положень дугового індуктора: нижнього (криві червоного кольору) і середнього (криві синього кольору).

На рис. 6 наведено усереднені по об'єму значення швидкості рідкого металу u_{av} у ванні плавильної печі (пунктирні криві) і у вихровій камері (суцільні криві), а також об'ємна витрата металу через з'єднувальні канали G (штрих-пунктирні криві). Як видно з цього рисунку, усереднена швидкість металу у ванні печі та об'ємна витрата його через з'єднувальні канали непогано корелюються між собою та практично не залежать від висоти металу у ванні печі для обох розташувань дугового індуктора. Якщо порівнювати між собою ці розташування, то слід зазначити, що нижнє положення індуктора приводить до дещо більших значень цих двох параметрів. Оскільки, як було показано в [5], ефективність перемішування розплаву у ванні печі залежить від середньої швидкості металу у ванні (чим більша швидкість, тим вища ефективність), то нижнє розташування індуктора з цієї точки зору являється більш доцільним. Враховуючи, що таке розташування

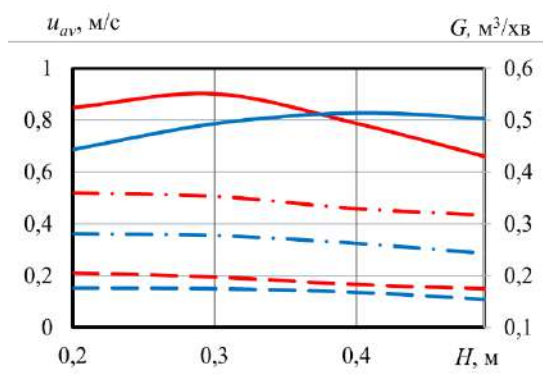


Рис. 6

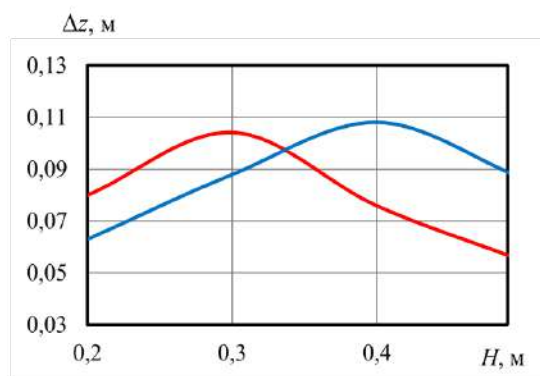


Рис. 7

призводить до більшої витрати металу через з'єднувальні канали, а отже і до більшої усередненої вертикальної (спрямованої вниз) компоненти швидкості металу в камері, з врахуванням траєкторій потоку, представлених на рис. 5, можна очікувати, що занурювальна здатність електровихрової камери у цьому випадку теж буде більшою. Що стосується середньої швидкості металу у вихровій камері, то вона по-різному залежить від висоти наплавленого металу у ванні. Максимальні значення цієї швидкості для нижнього положення індуктора виникають за малого та середнього наповнень металу у ванні, а у випадку середнього розміщення – за середніх і великих значеннях висоти металу у ванні печі.

Залежності величини деформації Δz вільної поверхні рідкого металу (глибина меніску) в

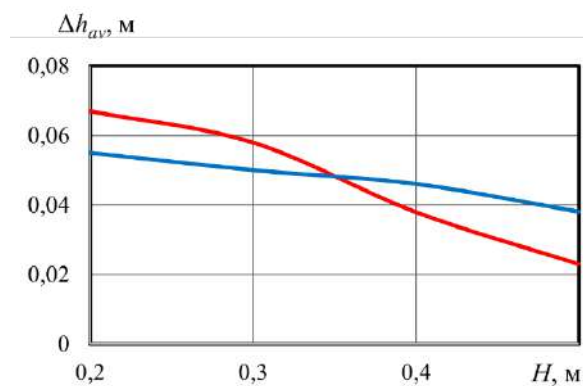


Рис. 8

електровихровій камері для двох положень індуктора представлено на рис. 7. Як впливає з цього рисунку, зазначені залежності непогано корелюються із середньою швидкістю металу в камері, які представлено на рис. 6.

Рис. 8 демонструє на скільки понижується середній рівень металу в камері у процесі роботи відбивної печі. Для обох варіантів розташування індуктора зі збільшенням висоти металу у ванні печі (в процесі наплавлення) різниця рівнів металу у печі та камері Δh_{av} зменшується. Для малих значень висоти H ця різниця більша у випадку нижнього положення індуктора, а для великих – у разі середнього його розташування.

Висновки. Сформульовано математичну модель для дослідження електрогідродинамічних процесів з урахуванням деформації вільної поверхні (меніску) рідкого металу для відбивної плавильної печі, оснащеної електровихровою камерою з дуговим індуктором.

У результаті проведеного комп'ютерного моделювання показано, що електровихрова камера такої печі одночасно виконує дві технологічні функції – перемішує розплавлений метал у ванні печі та занурює в розплав подрібнений металевий брукхт задля захисту його від окислення з подальшим транспортуванням у плавильну ванну. Обидві функції така камера здійснює ефективніше у разі нижнього розташування на ній дугового індуктора.

Встановлено, що рівень металу в електровихровій камері відбивної печі розглянутого конструктивного виконання і компоновки нижче рівня металу у її ванні. Різниця цих рівнів залежить від наповнення ванни металом, яке змінюється в процесі плавки, та розташування індуктора по висоті камери.

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. Гнатуш В.А. Світові тенденції ринку вторинної переробки відходів та брукхту алюмінієвих сплавів. *Процеси лиття*. 2020. №3 (141). С. 56-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2020.03.056>.
2. Pyrotek. Foundry and Die Casting/LOTUSS Systems. URL: <https://www.pyrotek.com/products/foundry/show/ProductLine/lotuss-systems> (дата доступу 01.10.2025).
3. Starczewski R. Developments in scrap submergence technology for light gauge scrap and alloy charging (LOTUSS technology). 20th International Recycled Aluminium Conference, Salzburg, Austria, 19-21 November 2012.
4. Wider success for LOTUSS remelt system. *Foundry Insight*. February 2009. Vol. 3. Issue 1.
5. Пеньковий Т.О., Бондар О.І., Гориславець Ю.М. Тривимірне моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів у відбивній печі для алюмінію з електровихровою камерою. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2024. Вип. 69. С. 12-18. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.012>.
6. Bright M., Ilinca F., Hetu J.-F., Ajersch F., Saliba C., Vild C. Fluid modeling of the flow and free surface parameters in the metaullics lotuss system. *Light Metals 2009: Proceedings of the technical sessions presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2009 Annual Meeting & Exhibition*. San Francisco, California, USA, February 15-19, 2009. Pp. 621-626.
7. Ilinca F., Pelletier D. Positivity preservation and adaptive solution of the k-ε model of turbulence. *AIAA Journal*. 1998. Vol. 36(1). Pp. 44-50. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.350>.

8. Kuzmin D., Mierka O., Turek S. On the implementation of the $k-\varepsilon$ turbulence model in incompressible flow solvers based on a finite element discretization. *Int. J. Computing Science and Mathematics*. 2007. Vol. 1. Issue 2-4. Pp. 193-206. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJCSM.2007.016531>.
9. Braess H., Wriggers P. Arbitrary Lagrangian Eulerian finite element analysis of free surface flow. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2000. Pp. 95-109. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00416-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00416-8).
10. COMSOL Multiphysics. Simulation Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата доступу 01.10.2025).

SIMULATION OF ELECTROHYDRODYNAMIC PROCESSES IN A REVERBERATORY FURNACE FOR ALUMINUM WITH AN ELECTROVORTEX CHAMBER TAKING INTO ACCOUNT THE DEFORMATION OF THE FREE SURFACE OF THE LIQUID METAL

O.I. Bondar, Yu.M. Goryslavets, T.O. Penkovyi
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: yugoris@ukr.net .

A scheme of a reverberatory furnace for melting aluminum waste with a cylindrical electrovortex chamber, in which a vortex (rotating) flow of liquid metal is created using a curve inductor, is presented. This chamber is connected to the melting bath of the furnace by two channels and performs two functions: it stirs the molten metal in the furnace bath and immerses crushed metal scrap into the melt to protect the metal from oxidation with its subsequent transportation to the melting bath. For such a system, a mathematical model has been formulated to study electromagnetic and hydrodynamic processes in it, taking into account the deformation of the free surface (meniscus) of the liquid metal. The model consists of two parts - systems of differential equations that describe the specified processes. The deformation of the free surface was determined by the moving grid method. The study was conducted for different values of the height of the metal in the furnace bath, which varied from the initial value of 0.2 m to the full height of the bath of 0.5 m, which simulated the process of metal deposition in the furnace during operation. Two options for the location of the inductor along the height of the vortex chamber were considered: one – in its lower part, and the second – in the middle relative to the height of the metal of the fully deposited furnace bath. As a result of the simulation, the velocity distributions of the liquid metal in the furnace bath and the vortex chamber were obtained, the deformation of the upper free surface of the metal in the chamber and the average level of metal in it relative to the level of metal in the melting bath were determined. For different fillings of the furnace bath, the trajectories of the movement of the liquid metal in the electrovortex chamber were determined. References 10, figures 8.

Keywords: reverberatory furnace, electrovortex chamber, liquid metal, mathematical modeling, hydrodynamic processes, deformation of the free surface.

1. Hnatush V.A. World trends in the secondary recycling market for waste and scrap aluminum alloys. *Protsesyy lyttia*. 2020. No 3 (141). Pp. 56-69. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2020.03.056>.
2. Pyrotek. Foundry and Die Casting/LOTUSS Systems. URL: <https://www.pyrotek.com/products/foundry/show/ProductLine/lotuss-systems> (accessed at 01.10.2025).
3. Starczewski R. Developments in scrap submergence technology for light gauge scrap and alloy charging (LOTUSS technology). 20th International Recycled Aluminium Conference, Salzburg, Austria, 19-21 November 2012.
4. Wider success for LOTUSS remelt system. *Foundry Insight*. February 2009. Vol. 3. Issue 1.
5. Penkovyi T.O., Bondar O.I., Goryslavets Yu.M. Three-dimensional modeling of electromagnetic and hydrodynamic processes in a reverberatory furnace for aluminum with an electrovortex chamber. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2024. Vyp. 69. Pp. 12-18. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.012>. (Ukr)
6. Bright M., Ilinca F., Hetu J.-F., Ajersch F., Saliba C., Vild C. Fluid modeling of the flow and free surface parameters in the metaullics lotuss system. *Light Metals 2009: Proceedings of the technical sessions presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2009 Annual Meeting & Exhibition*, San Francisco, California, USA, February 15-19, 2009. Pp. 621-626.
7. Ilinca F., Pelletier D. Positivity preservation and adaptive solution of the $k-\varepsilon$ model of turbulence. *AIAA Journal*. 1998. 36(1). Pp. 44-50. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.350>.
8. Kuzmin D., Mierka O., Turek S. On the implementation of the $k-\varepsilon$ turbulence model in incompressible flow solvers based on a finite element discretization. *Int. J. Computing Science and Mathematics*. 2007. Vol. 1. Issue 2-4. Pp. 193-206. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJCSM.2007.016531>.
9. Braess H., Wriggers P. Arbitrary Lagrangian Eulerian finite element analysis of free surface flow. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2000. Pp. 95-109. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00416-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00416-8).
10. COMSOL Multiphysics. Simulation Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (accessed at 01.10.2025).

Надійшла 09.10.2025
 Прийнята 30.10.2025