

ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДБИВНІЙ ПЕЧІ ДЛЯ АЛЮМІНІЮ З ЕЛЕКТРОВИХРОВОЮ КАМЕРОЮ

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

На основі розробленої математичної моделі проведено тривимірне чисельне дослідження електромагнітних і гідродинамічних процесів у відбивній плавильній печі з електровихровою камерою у вигляді циліндричної камери з дуговим індуктором, яка виконує дві функції: переміщує розплавлений метал у ванні печі та занурює в розплав подрібнений металевий брукт з подальшим транспортуванням його в плавильну ванну. Досліджено вплив висоти з'єднувальних каналів та кута приєднання до камери натискного каналу на три інтегральні параметри: середню швидкість металу у ванні печі, витрату розплаву через поперечний переріз каналів та середню кутову швидкість металу у вихровій камері. У результаті проведеного моделювання встановлено, що з ростом відносною висоти обох каналів перші два параметри, які характеризують камеру як електромагнітний перемішувач металу у ванні печі, збільшуються, а третій параметр, який визначає її як пристрій для занурювання брукту, зменшується. Що стосується кута приєднання натискного каналу, то тут навпаки – зі збільшенням кута середня швидкість розплаву у ванні печі та його витрата через канали падають, а середня кутова швидкість металу в камері зростає. Зроблено висновок про те, що на практиці необхідно знаходити (підбирати) такі компромісні значення висоти каналів та кута їхнього приєднання, які б забезпечували реалізацію на заданому рівні обох зазначених функцій. Бібл. 8. Рис. 7.

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

Вступ. Проблема плавки вторинного алюмінію в Україні нині набула особливої актуальності через відсутність первинного виробництва цього металу в країні. Вторинний алюміній зазвичай отримують у результаті переплавлення металевих відходів (алюмінієвого брукту). Часто для цього використовують технологію, згідно з якою плавлення відходів здійснюють у роторних печах, а приготування необхідних сплавів (з додаванням легуючих елементів) проводять у відбивних (ревербераційних) печах, які є печами з верхнім поверхневим нагріванням [1]. Відома й інша технологія, яка реалізується, наприклад, 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 брукт (шихта) алюмінію подається в зазначену камеру, в якій завдяки створеній гідродинамічній воронці 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 іноземних джерел вихід придатного для повторного використання алюмінію за такою технологією сягає 97-98 % [4]. Відома робота [5], в якій представлено результати моделювання гідродинамічних процесів в такій системі з врахуванням меніску, тобто деформації вільної поверхні рідкого металу в камері.

Вихровий потік рідкого металу в такій установці створюється занурюваним 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 в такий спосіб 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. Для усунення цього недоліку нами було запропоновано створювати такий рух металу в циліндричній камері індукційним способом за допомогою електромагнітних систем, зокрема дугового індуктора (дугового статора), що охоплює зовні вихрову камеру.

На рис. 1 наведено схему відбивної пелі з циліндричною вихровою (електровихровою) 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 пелі. Вихровий потік, що виникає в камері, розділяється в ній на дві частини, одна з яких надходить у ванну плавильної пелі, транспортуючи так подрібнену шихту, перемішує в ній розплав і подає нагрітий метал у вихрову камеру, а інша замикається безпосередньо в самій камері, створюючи в ній вихрову воронку.

У роботі [6] шляхом двовимірного математичного (комп'ютерного) моделювання проведено дослідження електромагнітних і гідродинамічних процесів у відбивній плавильній пелі з такою камерою. Визначено вплив кута приєднання всмоктувального і натискного каналів до бокової циліндричної поверхні вихрової камери на робочі параметри системи, якими виступали середня швидкість рідкого металу у ванні пелі, витрата розплаву через поперечні перерізи з'єднувальних каналів та середня кутова швидкість металу у вихровій камері. За кут приєднання α прийнято кут між віссю каналу і дотичною до циліндричної поверхні камери в точці перетину осі каналу з цією поверхнею (рис. 2). За прийнятих у цій роботі розмірів елементів установки кут α кожного каналу може набувати значень від 33° (тангенційне приєднання) до 90° .

Установлено, що оскільки кут приєднання всмоктувального каналу незначною мірою впливає на роботу камери, то його значення можуть бути будь-якими (від 33° до 90°). А кут приєднання натискного каналу по-різному впливає на ефективність роботи камери. Для отримання максимального перемішування металу у ванні пелі 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 оптимальному рівні неможливо, на практиці рекомендовано приймати компромісне рішення, яке дозволить з одного боку ефективне функціонування вихрової камери як перемішувача, що забезпечує необ-

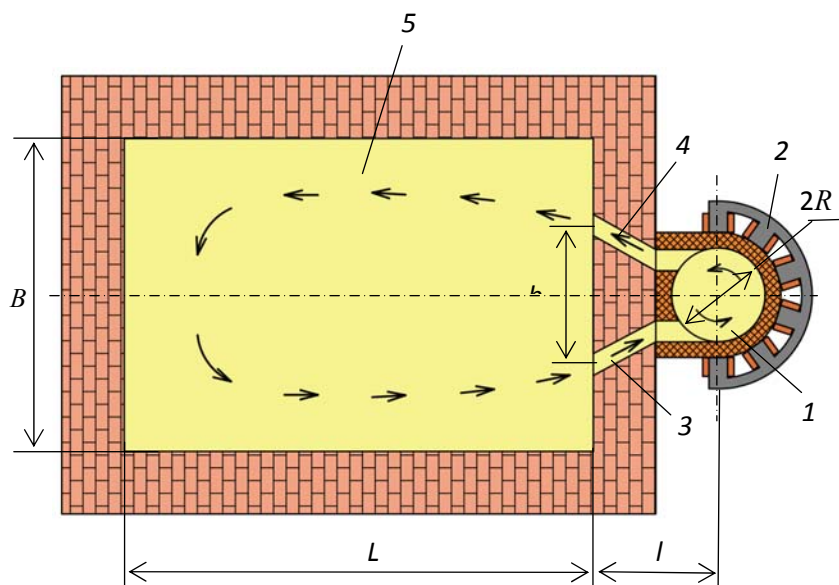


Рис. 1. Схема відбивної пелі з електровихровою камерою

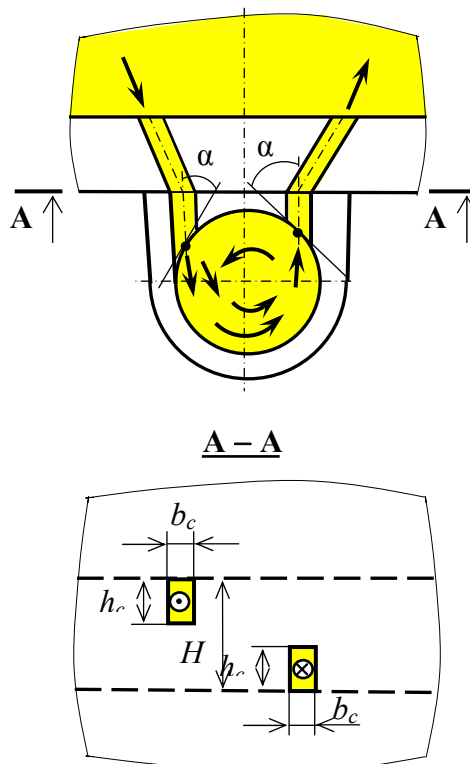


Рис. 2. Позначення кутів приєднання та висоти з'єднувальних каналів

хідну гомогенізацію металу у ванні печі за температурою, а з іншого – як обертового пристрою для створення вихрової воронки заданої інтенсивності. Як один із можливих варіантів, який досліджувався в роботі [4], може бути варіант, за яким кут приєднання натискного каналу знаходиться на рівні 40° , а всмоктувального – 33° (тангенційне приєднання).

Видається доцільним окрім кута приєднання дослідити також вплив висоти з'єднувальних каналів та місця їхнього приєднання до вихрової камери за висотою. Якщо всмоктувальний канал під'єднати до бокової поверхні камери у верхній частині, а натискний – у нижній, ефективність вихрової камери з погляду створення в ній вихрової воронки повинна збільшитись. Розплавлений метал із ванни печі у цьому випадку надходить в камеру зверху, де він розкручується, і залишає її у нижній частині.

Мета цієї роботи – на основі тривимірного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів у відбивній печі з циліндричною вихровою камерою та дуговим індуктором визначити спільний вплив на ефективність роботи такої печі висоти поперечного перерізу з'єднувальних каналів та кута приєднання натискного каналу до бокової поверхні камери.

Для вирішення поставленої задачі була використана математична модель для чисельного дослідження фізичних процесів у такій установці, яка представлена в роботі [6]. Модель складається із двох частин – систем диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні і гідродинамічні процеси. Електромагнітна частина моделі описана диференціальними рівняннями відносно комплексних амплітуд векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів. Рівняння представлені у безіндукційному наближенні, тобто без урахування поля, що виникає внаслідок руху рідкого металу в магнітному полі. За результатами розрахунку (отриманими розподілами цих потенціалів) знаходяться значення диференціальних параметрів електромагнітного поля (напруженості і 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.

Гідродинамічний процес в моделі представлено усередненою за Рейнольдсом системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для турбулентної течії в'язкої рідини. Для замикання цих рівнянь використовувалась k - ϵ модель турбулентності [7]. Гранична умова для цієї задачі задавалась на стінках, що контактують з рідким металом, у вигляді логарифмічного профілю швидкості для приграничного шару.

Представлена математична модель сформульована без урахування деформації вільної поверхні розплаву. У тривимірній постановці вона реалізована в пакеті програмного середовища COMSOL Multiphysics [8].

Постановка задачі. У цій роботі розглядається відбивна піч для плавлення алюмінію з електровихровою камерою у вигляді циліндричної камери з дуговим індуктором (дуговим статором), схему якої з позначеннями основних розмірів наведено на рис. 1. Довжина і ширина плавильної ванни печі $L = 3$ м і $B = 2$ м, висота металу у ванні і в камері – $H = 0,5$ 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. Дуговий індуктор охоплює зовні половину циліндричної вихрової камери. Його внутрішній діаметр складає $0,8$ м, а висота (по магнітопроводу) – $0,2$ м. Індуктор розташований посередині висоти металу у ванні печі. Моделювання електромагнітного поля, яке він створює, проводилося на частоті 50 Гц. при 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 і викликає обертальний вихровий рух рідкого металу.

Дослідження проводилося для різного положення місця приєднання двох однакових в поперечному перерізі з'єднувальних каналів до камери за висотою, яке мінялося через зміни висоти h_c поперечного перерізу обох каналів при фіксованому положенні верхньої стінки

всмоктувального каналу і нижньої стінки натискного каналу, як це показано на рис. 2, та різних кутів приєднання натискного каналу. Оскільки, як було показано в роботі [6], кут приєднання всмоктувального каналу незначною мірою впливає на роботу вихрової камери, дослідження проводилось при фіксованому тангенційному приєднанні цього каналу.

Оцінка ефективності вихрової камери, так як і в роботі [6], проводилася за допомогою середньої швидкості рідкого металу у ванні відбивної печі $u_{av} = (1/V_b) \int_{V_b} |\mathbf{u}| dV$, де $V_b = L B$

H – об'єм металу у ванні печі, об'ємної витрати металу G через поперечний переріз з'єднувальних каналів та середньої кутової швидкості металу у вихровій камері $\Omega = (1/V_{ch}) \int_{V_{ch}} (u_\varphi / r) dr d\varphi dz$, де $V_{ch} = \pi R^2 H$ – об'єм металу у вихровій камері; r , φ і z –

циліндричні координати камери. Перші два параметри характеризують роботу камери як електромагнітного перемішувача рідкого металу у ванні печі, а третій – як пристрою для занурювання подрібненої шихти в розплав і подачі її в плавильну ванну.

Результати моделювання. Чисельне моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів в представленій системі проводилося в діапазоні відносної висоти каналів $h_c/H = 0,2 \dots 1$ для шістьох значень кута приєднання α натискного каналу: $\alpha_1 = 33^\circ$, $\alpha_2 = 37^\circ$, $\alpha_3 = 40^\circ$, $\alpha_4 = 43^\circ$, $\alpha_5 = 46^\circ$ і $\alpha_6 = 49^\circ$.

На рис. 3 показано розрахункові розподіли швидкості рідкого металу у ванні печі та вихровій камері при тангенційному приєднанні натискного каналу ($\alpha = 33^\circ$) для двох значень відносної висоти каналів $h_c/H = 1$ (рис. 3 а) і $h_c/H = 0,2$ (рис. 3 б). Як видно з цього рисунку, у першому випадку спостерігається більш рівномірний розподіл швидкості металу в плавильній ванні за висотою порівняно з другим випадком, де швидкість металу у верхньому шарі ванни суттєво вища, ніж в інших шарах. Якщо усереднити цю швидкість по всьому об'єму ванни, виявиться, що середня швидкість металу у ванні в першому випадку буде більшою, ніж у другому. Щодо вихрової камери, то в ній навпаки – середня швидкість у другому випадку буде більшою, ніж у першому. Таким чином, зменшення відносної висоти з'єднувальних каналів і розведення за висотою місць їхнього приєднання до бокової стінки камери (всмоктувального каналу зверху, а натискного знизу) призводить до зменшення середньої швидкості рідкого металу в плавильній ванні печі і збільшення швидкості металу у вихровій камері.

Прослідкувати детально за рухом металу в системі можна за допомогою розрахункових траєкторій руху потоку. На рис. 4, як приклад, показано отримані в результаті моделювання такі траєкторії у вихровій камері для $h_c/H = 1$ (рис. 4 а), $h_c/H = 0,6$ (рис. 4 б) і

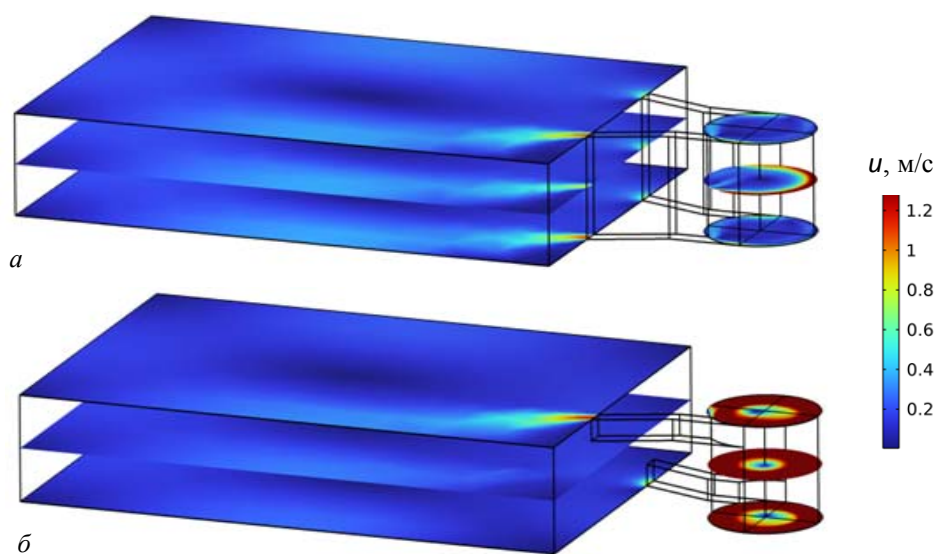


Рис. 3. Розподіли швидкості рідкого металу у ванні та камері печі для відносної висоти каналів $h_c/H = 1$ (а) і $h_c/H = 0,2$ (б)

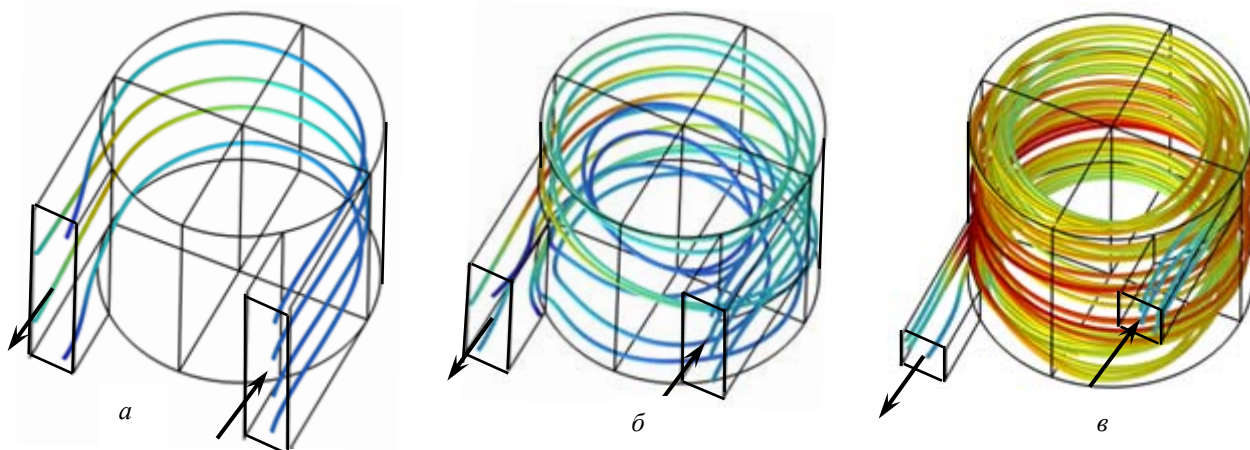


Рис. 4. Траєкторії руху металу у вихровій камері для відносної висоти каналів $h_c/H = 1$ (а), $h_c/H = 0,6$ (б) і $h_c/H = 0,2$ (в)

$h_c/H = 0,2$ (рис. 4 в) при тангенційному приєднанні натискного каналу ($\alpha = 33^\circ$) для чотирьох початкових точок в поперечному перерізі всмоктувального каналу. Очевидно, що зі зменшенням відносної висоти з'єднувальних каналів окрім збільшення швидкості металу в камері збільшується також шлях руху металу в ній. Аналогічні траєкторії потоку отримано і для інших значень кута приєднання натискного каналу.

На рис. 5-7 представлено підсумкові результати чисельного моделювання у вигляді розподілу характерних інтегральних параметрів залежно від відносної висоти з'єднувальних каналів h_c/H для різних значень кута приєднання α натискного каналу. На рис. 5 наведено розподіл середньої швидкості u_{av} рідкого металу у ванні печі, на рис. 6 – об'ємної витрати металу G через з'єднувальні канали, а на рис. 7 представлено розподіл середньої кутової швидкості Ω металу у вихровій камері.

Аналізуючи дані, наведені на цих рисунках, варто зазначити, що всі три параметри, які характеризують ефективність роботи даної системи в цілому, суттєво залежать як від кута приєднання натискного каналу, так і від висоти з'єднувальних каналів. Зі зростанням відносної висоти обох каналів середня швидкість рідкого металу u_{av} у ванні відбивної печі та його витрата G через з'єднувальні канали збільшуються, а середня кутова швидкість металу Ω в камері зменшується. Що стосується кута приєднання натискного каналу, то тут картина зворотна – із збільшенням кута α середня швидкість розплаву у ванні печі та його витрата через канали падають, а середня кутова швидкість металу в камері зростає. Таким чином, оптимальні (максимальні) значення параметрів, які характеризують електровихрову камеру

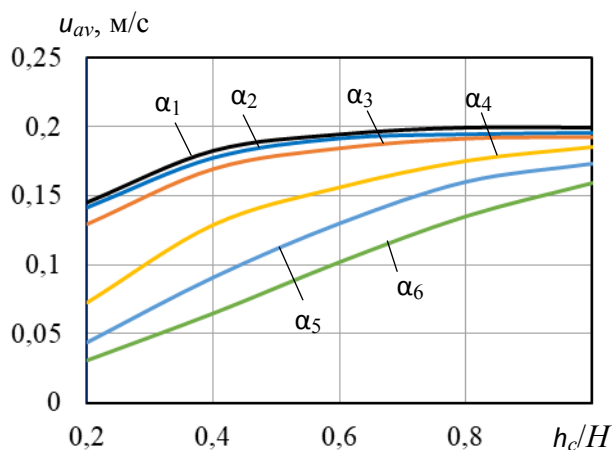


Рис. 5. Середня швидкість рідкого металу у ванні печі в залежності від висоти і кута приєднання натискного каналу

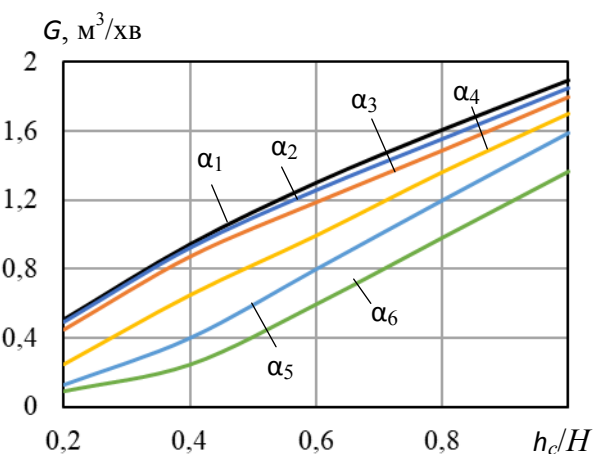


Рис. 6. Витрата металу через канали залежно від висоти і кута приєднання натискного каналу

як електромагнітний перемішувач рідкого металу, досягаються при мінімальному значенні кута приєднання натискного каналу ($\alpha_1 = 33^\circ$) і максимальному значенні відносної висоти обох каналів ($h_c/H = 1$), в той час як оптимальні значення параметра Ω , який характеризує камеру як пристрій для занурювання в метал твердої шихти, досягаються при максимальному куті α і мінімальній висоті каналів.

Ураховуючи такий особливий (полярний) вплив цих параметрів на роботу вихрової камери, для забезпечення ефективного функціонування її в якості як одного, так і другого пристроїв, необхідно у кожному випадку (для кожної плавильної печі) знаходити (приймати) компромісне рішення щодо висоти з'єднувальних каналів та кута приєднання натискного каналу з врахуванням отриманих тут результатів. Знаходження такого рішення може бути полегшено шляхом проведення моделювання теплових процесів у такій системі з урахуванням процесу плавлення твердої шихти в плавильній ванні печі та врахування меніску (деформації вільної поверхні) у вихровій камері, що потребує подальших досліджень у цьому напрямі.

Висновки. У результаті проведеного тривимірного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів встановлено, що ефективність електровихрової камери відбивної плавильної печі, яка одночасно виконує дві функції, а саме перемішує рідкий метал у ванні печі та створює вихровий обертальний рух розплаву в камері для занурювання металевих шихти в розплав, залежить від відносної висоти з'єднувальних каналів та кута приєднання натискного каналу до циліндричної поверхні вихрової камери. Враховуючи полярний (протилежний) вплив цих параметрів на кожну функцію, на практиці слід приймати компромісне рішення, тобто підбирати (виходячи з отриманих тут результатів) такі значення зазначених параметрів, котрі би водночас задовольняли на заданому рівні дію обох функцій.

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.

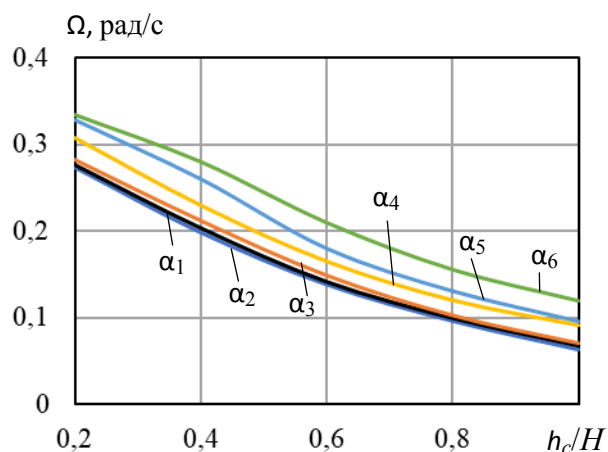


Рис. 7. Середня кутова швидкість металу в камері в залежності від висоти і кута приєднання натискного каналу

1. Гнатуш В. А. Світові тенденції ринку вторинної переробки відходів та брухту алюмінієвих сплавів. *Процеси лиття*. 2020. №3 (141). С. 56–69.
2. <https://www.yumpu.com/xx/document/view/14174965/-lotuss-pyrotek> (дата доступу 01.06.2024).
3. Starczewski R. Developments in scrap submergence technology for light gauge scrap and alloy charging (LOTUSS technology). *20th International Recycled Aluminium Conference*. 19-21 November 2012. Salzburg, Austria.
4. <https://www.youtube.com/watch?v=EwvhukuQ-HQ> (дата доступу 01.06.2024).
5. Bright M., Ilinca F., Hetu J.-F., Ajersch F., Saliba C., Vild C. Fluid modeling of the flow and free surface parameters in the metallurgical lotuss system. *Proceedings of the TMS Annual Meeting*, 2009.
6. Гориславець Ю.М., Пеньковий Т.О. Моделювання відбивної плавильної печі, оснащеної вихровою камерою з дуговим індуктором. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2023. Вип. 65. С. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.091>
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> (дата доступу 01.06.2024).

HREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN A REVERBERATORY FURNACE FOR ALUMINUM WITH AN ELECTRIC VORTEX CHAMBER

T.O. Penkovyi, O.I. Bondar, Yu.M. Goryslavets

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: yugoris@ukr.net

On the basis of the developed mathematical model, a three-dimensional numerical study of electromagnetic and hydrodynamic processes was carried out in a reverberatory melting furnace with an electric vortex chamber in the form of a cylindrical chamber with a curve inductor, which performs two functions: it stirs the molten metal in the furnace bath and immerses the crushed metal scrap in the melt and then transports it to the melting bath. The influence of the height of the connecting channels and the angle of connection to the chamber of the pressure channel on three integral parameters is investigated: the average velocity of the metal in the furnace bath, the melt flow through the cross section of the channels, and the average angular velocity of the metal in the vortex chamber. As a result of the simulation, it was established that with the growth of the relative height of both channels, the first two parameters that characterize the chamber as an electromagnetic stirrer of metal in the furnace bath increase, and the third parameter that defines it as a device for immersing scrap, decreases. As for the angle of connection of the pressure channel, the opposite is true here - with an increase in the angle, the average velocity of the melt in the furnace bath and its flow through the channels decrease, while the average angular velocity of the metal in the chamber increases. It was concluded that in practice it is necessary to find (choose) such compromise values of the height of the channels and the angle of their connection, which would ensure the implementation of both specified functions at a given level. Ref. 8, fig.7.

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

1. Hnatush V.A. Global market trends of secondary processing of waste and aluminum alloy scrap. *Protsesy Lyttia*. 2020. No.3 (141). Pp. 56–69. (Ukr)
2. <https://www.yumpu.com/xx/document/view/14174965/-lotuss-pyrotek> (access date 06/01/2024).
3. Starczewski R. Developments in scrap submergence technology for light gauge scrap and alloy charging (LO-TUSS technology). *20th International Recycled Aluminium Conference*. 19-21 November 2012. Salzburg, Austria.
4. <https://www.youtube.com/watch?v=EwvhukuQ-HQ> (access date 06/01/2024).
5. 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. *Proceedings of the TMS Annual Meeting*, 2009.
6. Goryslavets Yu.M., Penkovyi T.O. Modelling of a chopper melting furnace equipped with a vortex chamber with a curve inductor. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2023. Issue 65. Pp. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.091>. (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> (access date 06/01/2024).

Надійшла: 14.08.2024

Прийнята: 28.08.2024

Submitted: 14.08.2024

Accepted: 28.08.2024