

УДК 621.74:537.84

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДБИВНІЙ ПЛАВИЛЬНІЙ ПЕЧІ З ВИХРОВОЮ КАМЕРОЮ

Пеньковий Т.О.^{1,3}, Халатов А.А.^{1,2}, академік НАН України, Гориславець Ю.М.³, докт. техн. наук

¹- Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

²- Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2А, Київ, 03057, Україна

³- Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.10>

Наведено результати тривимірного моделювання гідродинамічних та теплових процесів у відбивній плавильній печі з камерою вихрового руху рідкого металу, який створено дуговим індуктором. Результати у вигляді розподілу швидкості і температури рідкого металу отримані для двох варіантів (кутів) приєднання натискного каналу до вихрової камери печі. Показано, з точки зору перемішування рідкого металу у ванні печі кращим є тангенціальне приєднання натискного каналу, а з точки зору функціонування вихрової камери більш ефективно приєднання під кутом 45° .

The paper presents the results of three-dimensional modeling of electromagnetic, hydrodynamic, and thermal processes in a reverberatory furnace with liquid metal vortex flow chamber attached to it. The metal flow in the vortex chamber was induced by means of the arc inductor. From the comparison of two designs, it was concluded that at the tangential connection of the pressure channel, the temperature uniformity in the furnace volume was obtained, while at $\theta = 45^\circ$, the velocity and temperature distribution in the vortex flow chamber was better.

Бібл.8, рис. 6.

Ключові слова: відбивна плавильна піч, вихрова камера, дуговий індуктор, рідкий метал, гідродинаміка та теплообмін, вихровий рух, комп'ютерне моделювання.

J – густина електричного струму;

B – індукція магнітного поля;

f – питома електромагнітна сила;

u – швидкість;

ρ – густина рідкого металу;

P – статичний тиск;

η – коефіцієнт динамічної в'язкості;

C_p – питома теплоємність;

T – температура;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

q – внутрішні джерела теплоти;

t – час;

θ – кут приєднання натискного каналу.

Індекси:

eff – ефективний параметр;

av – середній;

t – турбулентний.

Вступ.

Проблема переплавлення алюмінію в Україні є особливо актуальною через відсутність первинного виробництва цієї сировини в країні. 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 левовагові 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].

Відоме цікаве рішення, яке дозволяє зменшити такі втрати при плавленні 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 [2]. Подрібнена шихта затягується у воронку вихрового потоку, занурюється в розплав і подається далі в плавильну ванну печі.

Вихровий потік рідкого металу в такій системі створюється відцентровим електромеханічним насосом. Цей насос окрім створення вихрової воронки забезпечує

також циркуляцію металу в печі, тобто здійснює перемішування розплаву у ванні і 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) у 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 камерою, в якій за допомогою такого індуктора створюється вихровий (обертальний) потік рідкого металу. Циліндрична камера за допомогою двох каналів (натискного і всмоктувального) з'єднана з основною камерою (ванною) печі. Змінюючи кут, під яким ці канали стикаються з циліндричною поверхнею бокової стінки вихрової камери, можна за потребою 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 [3] для такої установки на основі моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів проведена попередня оцінка гідродинамічної ефективності представленої електромагнітної системи в залежності від кута, під яким натискний канал приєднується до бокової стінки вихрової камери. В ній показано, що переміщуючи циліндричну камеру відносно цього каналу, можна регулювати співвідношення між витратою металу, що надходить з камери до ванни печі, та витратою металу, який циркулює у вихровій камері.

Оскільки вихрова камера з таким індуктором служить і для перемішування розплаву у ванні печі, то оцінити ефективність такої системи можна також не тільки за швидкістю (витратою) розплаву у ванні, але і за розподілом температури рідкого металу в ній. На наш погляд така оцінка є більш достовірною. При цьому вважається, що чим вища гомогенність (однорідність) розплаву у ванні печі по температурі, тим ефективнішою є електромагнітна система. Така оцінка звісно ж потребує вирішення теплової задачі.

Мета цієї роботи – на основі тривимірного моделювання гідродинамічних і теплових процесів у відбивній печі з вихровою камерою та дуговим індуктором виз-

начити тепловий стан печі, зокрема дослідити розподіл температури рідкого металу у ванні печі та вихровій камері при двох приєднаннях натискного каналу

Математична модель

Для вирішення поставленої задачі була сформульована математична модель для чисельного дослідження фізичних процесів у такій установці. Модель складається із трьох частин – систем диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні, гідродинамічні і теплові процеси. Вона побудована по аналогії з розробленою раніше моделлю для дослідження фізичних процесів, що протікають у відбивній плавильній печі з електромагнітним перемішувачем рідкого металу, виконаного у вигляді лінійного індуктора біжучого і пульсуючого магнітних полів. Такий індуктор приєднується до бокової стінки або дна плавильної ванни печі. Всі три частини цієї моделі описані в роботах [4-6].

Електромагнітна частина моделі у цій роботі так як і в попередніх працях 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 (напруженостей і індукцій 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

$$\mathbf{f} = 0,5 \operatorname{Re} \left(\mathbf{J} \times \mathbf{B}^* \right), \quad (1)$$

де $\mathbf{J}$ – комплекс густини електричного струму в рідкому металі, $\mathbf{B}^*$ – спряжений комплекс індукції магнітного поля.

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

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \nabla p + \nabla \cdot (\eta_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (3)$$

Тут $\eta_{\text{eff}} = \eta + \eta_t$, 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 (1). Для замикання рівнянь використовувалась к-ε модель турбулентності [2].

Для опису теплових процесів в моделі використано нестационарне рівняння теплопровідності з урахуванням теплопереносу за рахунок руху розплаву:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) + \nabla \cdot (-\lambda_{\text{eff}} \cdot \nabla T) = q. \quad (4)$$

Тут $\lambda_{\text{eff}} = \lambda + \lambda_t$, де λ – коефіцієнт молекулярної теплопровідності, λ_t – коефіцієнт турбулентної теплопровідності, обумовленої турбулентними пульсаціями швидкості. Локальні значення λ_t визначаються відповідно до виразу

$$\lambda_t = \eta_t \frac{C_p}{Pr_t} \quad (5)$$

де Pr_t – турбулентне число Прандтля, розподіл якого визначається відповідно до відомих моделей, або задається константною. Значення турбулентного числа Прандтля для рідких металів приблизно складає $Pr_t = 1,0$.

Представлена математична модель реалізована в програмному середовищі COMSOL Multiphysics [7].

Постановка задачі

Розглядалася відбивна піч для плавлення алюмінію з вихровою камерою та дуговим індуктором, схема якої з позначеннями основних розмірів наведена на рис. 1. Довжина і ширина плавильної ванни печі – $L = 3$ м, $B = 2$ м; висота металу у ванні 0,5 м. Внутрішній діаметр вихрової камери – $2R = 0,6$ м, розмір $l = 0,8$ м, відстань між каналами у ванні $b = 1$ м, ширина каналів 0,15 м. Висота металу в камері і в каналах така як і в плавильній ванні, тобто складає 0,5 м.

Шестиполіусний індуктор охоплює зовні половину циліндричної вихрової камери. Моделювання електромагнітного поля, яке він створює, проводилося на частоті 50 Гц при заданих ампер-витках в котушках, амплітудні значення яких в кожній із них складали по 20 кА. Фазовий кут між струмами сусідніх котушок прийнято рівним 60 ел. град. При такому живленні індуктор створює в камері біжуче (обертове) магнітне поле, яке і визиває обертальний вихровий рух рідкого металу.

При моделюванні гідродинамічного процесу не враховувалася деформація вільної поверхні (меніск) рідкого металу, тобто ця поверхня задавалася плоскою.

Для оцінки теплового стану такої установки моделювалася наступна ситуація. Нагрівання рідкого металу зазначеного об'єму відбувалося у ванні печі. Розплавлений метал нагрівався тепловим потоком загальною потужністю 600 кВт, що надходив рівномірно через верхню поверхню ("дзеркало") металу.

Інтенсивність нагрівання на поверхні при цьому складала 100 кВт/м². За початкову температуру розпла-

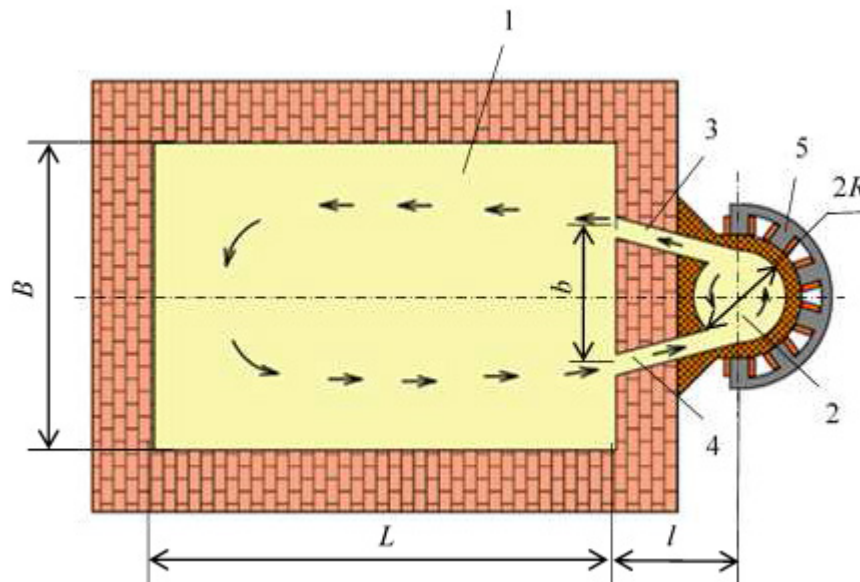


Рис. 1. Відбивна піч з вихровою камерою та дуговим індуктором (1 – ванна печі, 2 – вихрова камера, 3 – натискний канал, 4 – всмоктувальний канал, 5 – дуговий індуктор)

ву приймалася температура плавлення алюмінію, тобто 933 К (660°C). Початковий розподіл температури стінок печі визначався шляхом попереднього розрахунку стаціонарної теплової задачі з заданою температурою внутрішніх поверхонь стінок, що дорівнює початковій температурі розплаву.

На стінках установки були задані втрати тепла від контакту з зовнішнім середовищем при температурі 20°C. Розрахунок як стаціонарної, так і нестационарної теплових задач проводився в лінійній постановці – коефіцієнти рівняння теплопровідності приймалися незалежними від температури.

Алгоритм моделювання прийнято таким. Спочатку розв'язувалася стаціонарна електромагнітна задача, в результаті чого було отримано розподіл електромагнітних сил у рідкому металі установки. Далі після розв'язання стаціонарної теплової задачі спільно вирішувалися нестационарні гідродинамічна і теплова задачі.

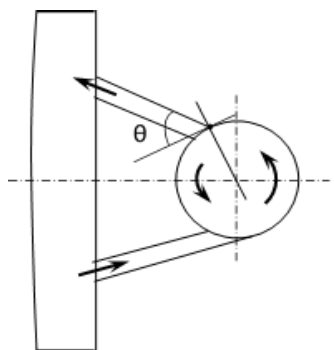


Рис. 2. Вихрова камера відбивної печі

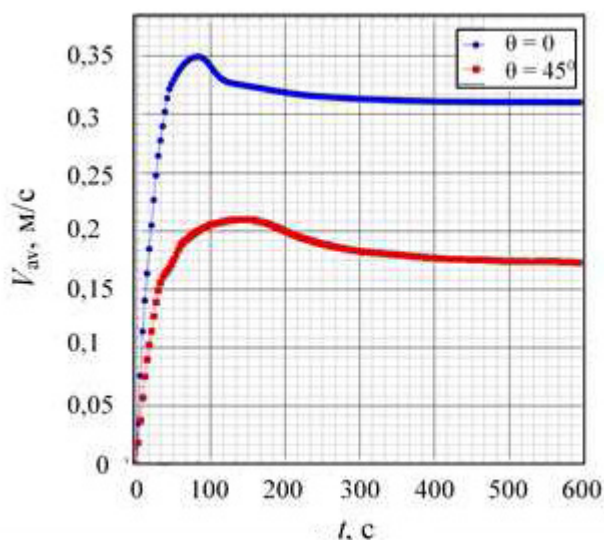


Рис. 3. Середня швидкість розплаву у ванні відбивної печі

Результати моделювання та їх аналіз

У результаті моделювання було отримано розподіли швидкості рідкого металу та температури всередині установки. Для порівняння розглядалися два випадки приєднання натискного каналу до вихрової камери: тангенційне ($\theta = 0$) та під кутом $\theta = 45^\circ$ (позначення кута показано на рис. 2).

На рис. 3 для цих двох варіантів представлено середню (осереднену по об'єму) швидкість металу V_{av} у ванні печі. Розрахунки показали, що електромагнітна система виходить на стаціонарний гідродинамічний режим приблизно за 300-400 с.

Оцінку ефективності запропонованої електромагнітної системи як перемішувача рідкого металу у відбивній печі проводили за допомогою різниці максимальної і середньої температури розплаву ΔT у ванні (рис. 4).

Після виходу установки на стаціонарний гідродинамічний режим різниця температури ΔT для варіанту з тангенційним приєднанням оказалась меншою, ніж під кутом $\theta = 45^\circ$, що дозволяє стверджувати, що таке приєднання натискного каналу забезпечує вищу ефективність електромагнітного перемішування рідкого металу у ванні печі.

На рис. 5 показано поле температури рідкого металу в середній по висоті металу площині на момент часу нагрівання $t = 400$ с, стрілками зображено рух рідкого металу. Видно, що одноконтурний рух всередині ванни утворює в центрі печі застійну зону з підвищеною температурою розплаву. Для варіанта з кутом $\theta = 45^\circ$ ця тем-

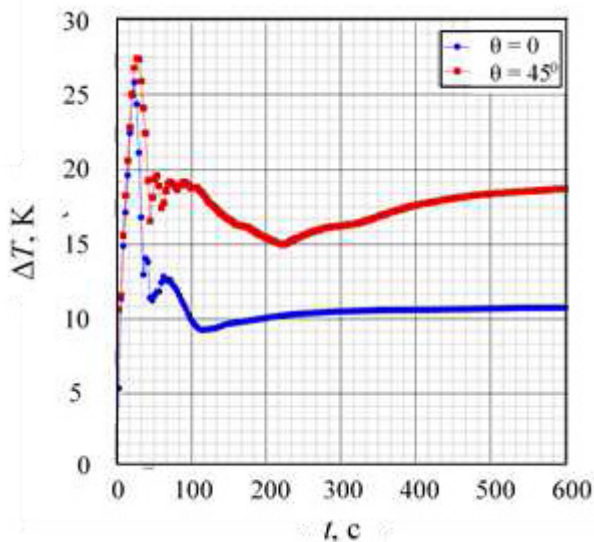


Рис. 4. Різниця максимальної та середньої температури розплаву у ванні відбивної печі

пература є вищою. Окрім того, в цьому випадку у ванні печі біля всмоктувального каналу появляється ще одна зона з підвищеною температурою.

Важливо також для такої установки оцінити розподіл температури у вихровій камері, адже саме в цю камеру подається подрібнена шихта та здійснюється попередній підігрів її перед подачею у плавильну ванну печі [8]. Температурне поле в перерізі вихрової камери між натискним і всмоктувальним каналами, отримане у результаті моделювання, наведено на рис. 6. На периферії біля бокової стінки камери можна помітити «гарячі» зони, що є свідченням того, що підігрів шихти в такому закрученому потоці цілком можливий. Більші значення температури досягаються у другому випадку, тобто при $\theta = 45^\circ$. У верхній частині камери в обох випадках біля поверхні рідкого металу помітне падіння температури, але в даному випадку це може бути результатом спрощеного представлення моделі, оскільки в ній не враховується утворення меніску (воронки) у вихровій камері.

Кутова швидкість руху рідкого металу у вихровій камері після виходу установки на стаціонарний робочий режим склала: 0,63 об/с для тангенційного приєднання натискного каналу та приблизно 1 об/с для кута 45° . Це означає, що у другому випадку висота (глибина) воронки та її всмоктувальна дія будуть більшими.

Таким чином, з точки зору функціонування вихрової камери (для утворення воронки) другий варіант приєднання натискного каналу є більш прийнятним. Остаточна рекомендація в практичному плані по цьому куту може бути прийнята після проведеного моделювання такої установки з врахуванням меніску у вихровій камері. Скоріш за все це буде проміжне значення кута приєднання у межах $0 < \theta < 45^\circ$, котре дозволить забезпечити необхідне для вирівнювання температури переміщення розплаву у ванні відбивної печі, а також ефективне занурювання твердої шихти в рідкий метал у вихровій камері.

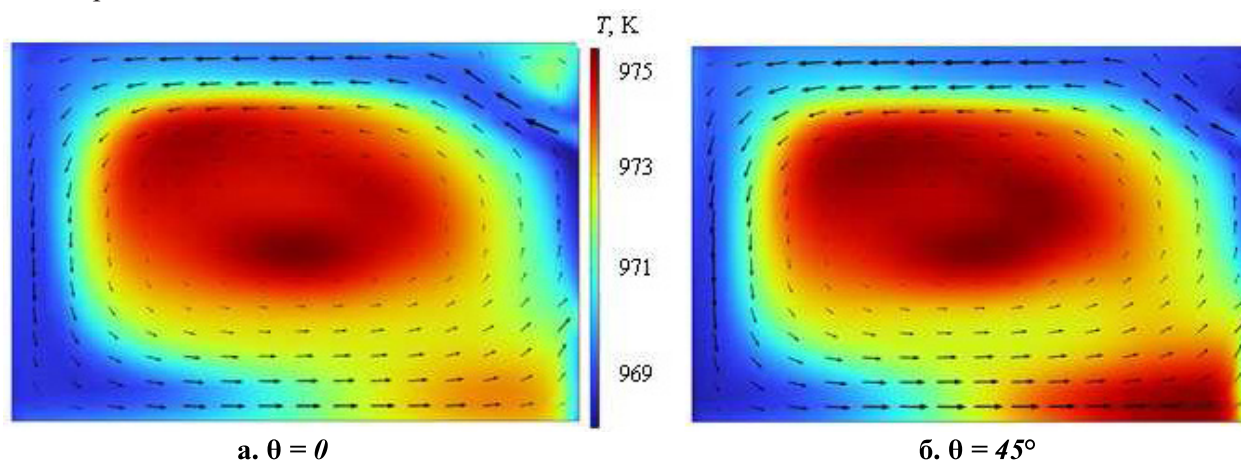


Рис. 5. Розподіл температури розплаву в середньому перерізі по висоті ванни відбивної печі

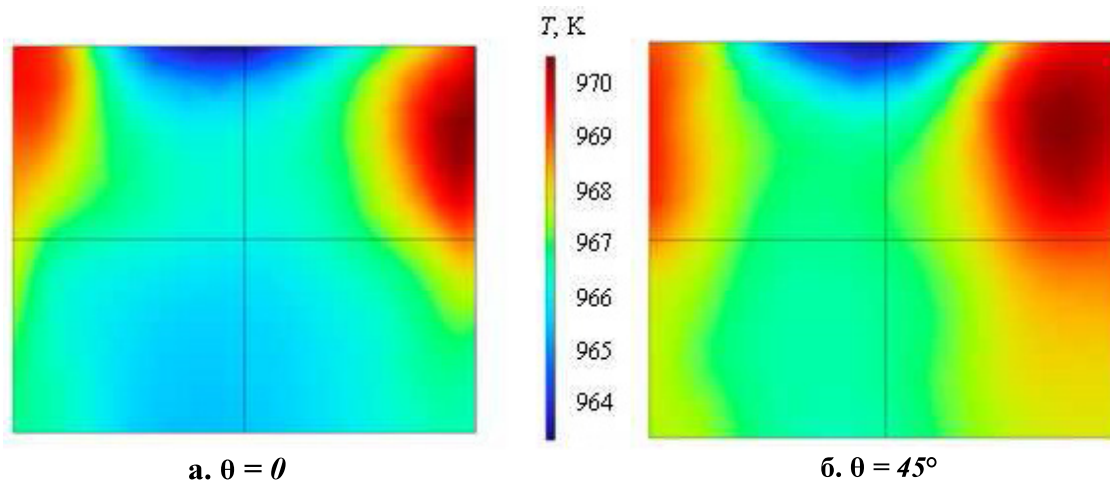


Рис. 6. Розподіл температури розплаву в вертикальному перерізі вихрової камери

Висновки

1. Для відбивної плавильної печі з вихровою камерою та дуговим індуктором побудовано математичну модель мультифізичної задачі в пакеті програмного середовища COMSOL Multiphysics. Проведене комп'ютерне моделювання взаємозалежних фізичних процесів в печі для плавлення алюмінію, що дозволило визначити її основні гідродинамічні і теплові параметри.

2. Визначено вплив кута приєднання натискного каналу до циліндричної вихрової камери на роботу відбивної печі. Установлено, що з точки зору перемішування металу у ванні печі кращим є тангенційне приєднання каналу до бокової стінки камери, а з точки зору функціонування вихрової камери кращим є кут приєднання у 45° . Остаточна рекомендація по цьому куту може бути прийнята після проведеного додаткового моделювання гідродинамічних процесів із урахуванням меніску на вільній поверхні вихрової камери, що складає окрему задачу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Stal R., Hanley P.* Electromagnetic stirring in aluminum ladles. – ABB Value Paper., 2009.
2. *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.
3. *Модельювання електромагнітної системи вихрового обертального руху рідкого металу для відбивної печі / І.М. Єлісєєв, Т.О. Пеньковий, Т.В. Доник, А.А. Халатов // Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 118-121.*
4. *Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Токаревский А.В.* Трехмерное моделирование однофазного электромагнитного перемешивателя жидких металлов. Технічна електродинаміка. 2013. №5. С.77-84.
5. *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. – P. 605-608.
6. *Глухенький О.І., Гориславец Ю.М., Бондар О.І.* Моделювання нагрівання металевого розплаву у відбивній печі при електромагнітному перемішуванні. Технічна електродинаміка. 2015. №6. С. 78-83.
7. *COMSOL Multiphysics.* Simulation Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата доступу 26.04.2022).
8. *Gelfgat Yu, Skopis M., Grabis J.* Electromagnetically driven vortex flow to introduce small solid particles into liquid metal. Magnetohydrodynamics, vol. 41, no. 3, 2005, p. 249-254.

SIMULATION OF HYDRODYNAMIC AND THERMAL PROCESSES IN A REVERBERATORY FURNACE WITH A VORTEX FLOW CHAMBER

Penkovyi T.O.^{1,3}, Khalatov A.A.^{1,2}, Gorislavets Y.M.³,

¹*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine*

²*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2-A Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine*

³*Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 56 Peremohy Avenue, Kyiv, 03057, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.10>

The problem of aluminum recycling in the Ukraine is particularly important problem due to the lack of primary production of the raw material in the country. Therefore for the aluminum production the reverberatory furnaces are used. The interesting solution, allowing reduce the amount of metal burned on the surface of liquid metal during melting. For this purpose, lightweight metal is grinded and then is melted in the vortex flow of liquid metal.

The disadvantage of existing system with vortex flow of metal is application of the centrifugal mechanical pump, reducing the reliability and service life of existing designs due to the pump blades operation in an aggressive environment of liquid metal.

To overcome this problem, the six-pole arc inductor was proposed to be used in the design. This paper provides a comparative analysis of two structural designs of the reverberatory furnace with an attached chamber of metal vortex. The driving force for a metal flow is created by a six-wave arc inductor.

The design efficiency was evaluated by the temperature difference between the maximum and average temperatures in the main part of the furnace bath. The option that provided the smallest temperature difference was considered as the best one. The angular speed of a liquid metal in the vortex chamber, which ensures the suction of grinded particles into the liquid metal volume, where their melting takes place, was also taken into account.

From the results of two designs comparison, the conclusion was made for tangential connection of the pressure channel ($\theta = 0$), the best temperature uniformity was obtained in the furnace volume while at $\theta = 45^\circ$ the best velocity and temperature distribution in the vortex chamber was occurred.

For a more detailed assessment of two designs simulation taking into account the formation of a meniscus on free surface of the liquid metal should be taken into account.

References 8, pic. 6.

Key words: electromagnetic stirrer, reverberatory furnace, liquid metal, hydrodynamics and heat transfer, vortex flow, computer modeling.

1. *Stal R., Hanley P.* Electromagnetic stirring in aluminum ladles.—ABB Value Paper., 2009.

2. *M. Bright, F. Ilinca, J.-F. Hetu, F. Ajersch, C. Saliba, C. Vild,* Fluid modeling of the flow and free surface parameters in the metallic lotuss system, in: Proceedings of the TMS Annual Meeting, 2009.

3. *I. Yeliseiev, T. Penkovyi, T. Donnyk, A. Khalatov.* Electromagnetic system of vortex circulating flow of liquid metal for reverberatory furnace // Theoretical and applied problems of physics, mathematics and computer science.- Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute- P. 118 – 121.

4. *Glukhenkii A.I., Gorislavets Y.M., Tokarevsky A.V.* Three-dimensional modeling of a single-phases electromagnetic stirrer of liquid metals. Technical electrodynamics. 2013. №5. P. 77-84.

5. *Dubodelov V.I., Gorislavets Y.M., Glukhenkii A.I., Fiksen 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. – P. 605-608

6. *Hluhenkyi O.I., Horislavets Yu.M., Bondar O.I.* Modeling of heating of a metal melt in a blast furnace with electromagnetic stirring. Technical electrodynamics. 2015. №6. P. 78-83.

7. *COMSOL Multiphysics.* Simulation Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата доступу 26.04.2022).

8. *Gelfgat, Yu, Skopis, M., Grabis, J.* Electromagnetically driven vortex flow to introduce small solid particles into liquid metal. // Magnetohydrodynamics, vol. 41, no. 3, - 2005- p. 249-254.

Отримано 16.01.2023

Received 16.01.2023