

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ ТА РАФІНУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ

Наведено основні результати досліджень відділу протягом 2009 року в сфері електромагнітної обробки металів у розплавленому стані, спрямованих на розробку і створення нових ефективних електромагнітних систем для перемішування та рафінування металевих розплавів.

Приведены основные результаты исследований отдела в течение 2009 года в области электромагнитной обработки металлов в расплавленном состоянии, направленных на разработку и создание новых эффективных электромагнитных систем для перемешивания и рафинирования металлических расплавов.

Одним із основних наукових напрямків діяльності відділу стабілізації параметрів електромагнітної енергії Інституту електродинаміки НАН України, поряд з іншими, є підвищення ефективності використання електроенергії за рахунок розробки та створення енерго- і ресурсозберігаючих технологій та обладнання для електромагнітної обробки металу в рідкому стані. До електромагнітної обробки металу, як правило, відносять технологічні операції, що виконуються головним чином за рахунок силової дії електромагнітного поля. Використання електромагнітного поля як основного чинника електродинамічного впливу на метал дає змогу, з одного боку, суттєво поліпшити існуючі технології, а з іншого – створити принципово нові технологічні процеси та обладнання, які неможливо отримати звичайним способом.

Дослідження силової дії електромагнітного поля на рідкий метал, що традиційно проводяться у відділі, стосуються різноманітних електротехнологій, зокрема таких, як індукційне плавлення металів, електромагнітне рафінування розплаву, порційне електромагнітне дозування тощо. У 2009 році на виконання науково-дослідних робіт “Аспект” і “Елом-П” виконувались дослідження електромагнітних систем вихрового та обертового рухів рідкого металу, призначених для перемішування та безперервного рафінування металевих розплавів, з метою створення нового ефективного електрообладнання, що реалізує зазначені процеси.

Перемішування металевих розплавів є одним з найбільш дієвих засобів поліпшення якості металу, а також підвищення ефективності енергоємних технологічних процесів та обладнання при плавленні та приготуванні різноманітних сплавів. Перемішування рідкого металу необхідне, в першу чергу, там, де його нагрівання здійснюється через верхню (вільну) поверхню, тобто при так званому поверхневому нагріванні. Такий спосіб нагрівання використовується, наприклад, у відбивних (“отражательных” – рос. мовою) печах і міксерях, які широко використовуються нині для плавлення і приготування металевих сплавів. Плавлення й нагрівання металу в них відбувається або за рахунок згорання природного газу (полум’яні печі), або за рахунок виділення тепла в нагрівальних елементах (електропечі опору). Зрозуміло, що ефективна робота таких печей без перемішування металу принципово неможлива, оскільки при досить слабкому теплообміні (за рахунок однієї тільки теплопровідності) досягти рівномірного нагрівання металу по глибині ванни печі практично неможливо (на поверхні метал надто перегрівається, а внизу він холодний).

Не вдаючись до переліку і детального опису відомих типів перемішувачів рідкого металу, зазначимо, що найбільш ефективними і перспективними вважаються електромагнітні перемішувачі. Вони є досить надійними і дають змогу підвищити продуктивність плавильної печі за рахунок інтенсифікації тепло- і масопереносу, знизити витрати енергії на плавлення та приготування розплаву, забезпечити високу однорідність розплаву за хімічним складом і температурою в усьому об’ємі ванни печі, знизити перегрівання і пов’язані з цим втрати металу, зменшити витрати легуючих добавок, необхідних для приготування сплавів, поліпшити структуру металевих виливків. Нині для цього в основному використовуються електромагнітні перемішувачі біжучого магнітного поля, що монтуються біля однієї з бічних стінок печі. Недолі-

ком таких перемішувачів вважається те, що вони створюють одноконтурну вихрову течію металу в ванні печі. При цьому біля стінки печі швидкість руху металу може перевищувати допустиме значення, а в центрі ванни рух практично відсутній. У зв'язку з цим значний об'єм металу залишається без перемішування (особливо при великій площі поверхні ванни). У багатьох випадках це є не зовсім прийнятним, адже саме рух металу в центральній зоні печі визначає інтенсивність масообмінних процесів з компонентами, що вводяться в розплав.

Авторами запропоновано здійснювати перемішування розплаву в таких печах за допомогою електромагнітних перемішувачів на основі пульсуючого магнітного поля, яке створюється однофазними індукторами [3]. На рис.1 а-в наведено різні варіанти конструктивного виконання таких перемішувачів. Видно, що конструкції їх є вкрай простими. Вони відпові-

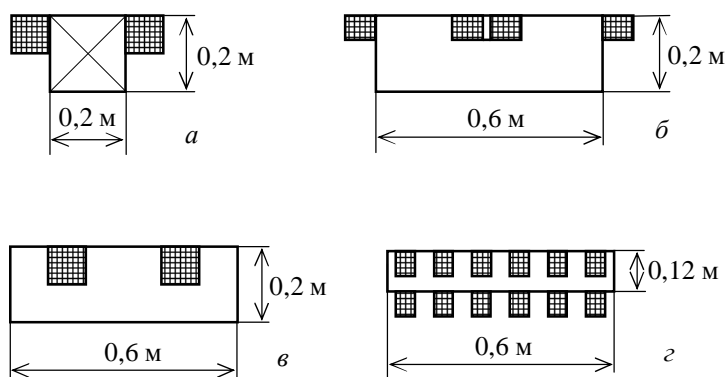


Рис. 1

дають високим вимогам експлуатаційної надійності та можуть бути використані на вже діючому плавильному обладнанні. Перемішувачі складаються з шихтованого феромагнітного осердя, яке може мати I-, П- або Ш-подібну форму з однією або двома котушками, що живляться від джерела змінного струму промислової частоти. У випадку розміщення такого пристрою біля бічної стінки печі в рідкому металі індуються вихрові струми, які, взаємодіючи з результирующим магнітним полем, забезпечують силову дію, переважно

спрямовану нормально бічній стінці ванни печі. Це призводить до ефективного перемішування металу саме в центральній зоні печі за рахунок створення двоконтурної вихрової течії.

Оцінка ефективності однофазних електромагнітних систем з пульсуючим магнітним полем для перемішування рідкого металу у відбивних печах виконувалася шляхом математичного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів у програмному середовищі мультифізичного моделювання Femlab [7].

У системі “перемішувач–ванна печі” електромагнітні та гідродинамічні процеси розглядалися у двовимірній постановці (на горизонтальній площині), як це показано на рис. 2. Такий підхід відповідає нескінченно глибокій ванні печі, до бічної стінки якої підстиковано нескінченно широкий індуктор. Така постановка задачі, власне, є досить грубим наближенням як в електромагнітному, так і гідродинамічному відношеннях, проте вона дає змогу визначити основні закономірності електромагнітного перемішування рідкого металу в таких системах, виявити вплив на інтенсивність його руху різних конструктивних факторів. На цьому рисунку наведено розрахункову область електромагнітної та гідродинамічної задачі для випадку індуктора пульсуючого поля з Ш-подібним феромагнітним осердям, яке зображено на рис.1 в.

Чисельне моделювання та аналіз протікання фізичних процесів виконували на прикладі відбивної печі для плавлення і приготування алюмінієвих сплавів з ванною розмірами 2 на 3 м (у плані). При заповненні її рідким алюмінієм на глибину 0,5 м ємність такої печі становить 3 м^3 , що відповідає завантаженню (з урахуванням питомої густини рідкого алюмінію 2400 кг/м^3) 7,2 т.

Розрахунок електромагнітного поля виконували в лінійній постановці при заданих ампер-витках котушки індуктора шляхом розв'язання системи інтегро-диференціальних рівнянь для векторного магнітного потенціалу [3].

Гідродинамічну задачу розв'язували для горизонтального перерізу ванни з рідким металом (підобласті Ω_5 на рис. 2). Швидкість руху металу визначали шляхом чисельного

розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса для турбулентної течії (з $k-\varepsilon$ моделлю турбулентності [9]), що включають в себе електромагнітні сили, значення яких були отримані в результаті розв'язання електромагнітної задачі.

Крім трьох зазначених варіантів конструкцій електромагнітного перемішувача з пульсуючим магнітним полем (рис. 1 а–в) чисельному розрахунку і порівняльному аналізу був підданий також трифазний однохвильовий перемішувач біжучого магнітного поля з намотаними навколо ярма осердя котушками (рис. 1 з). В усіх чотирьох випадках як джерело електромагнітного поля виступали сумарні ампер-витки величиною $Iw = 40$ кА (діюче значення). У першому й третьому випадках вони концентрувалися в одній котушці, для другого й четвертого – відповідно розподілялися по двох і шести котушках. У перших трьох випадках живлення котушок було однофазним, у четвертому – трифазним з фазовим зсувом між сусідніми котушками в 60 ел. град. Відстань (зазор) між рідким металом і осердям перемішувача в усіх випадках прийнята однаковою (100 мм).

Для кожної конструкції розраховані електромагнітні сили в рідкому металі, які у цьому випадку (для двовимірної моделі) мають дві просторові складові f_x і f_y , спрямовані відповідно тангенціально і нормально до бічної стінки ванни печі. Було встановлено, що для однофазних індукторів нормальні складові електромагнітних сил f_x більш ніж на порядок перевищують тангенціальні сили f_y . При Ш-подібному осерді розподіл сил f_y уздовж стінки (по координаті x) має “двогорбий” характер. У випадку П-подібного осердя ці сили є дещо меншими за величиною, але на відміну від Ш-подібного осердя вони зосереджені в основному в одній зоні (на ділянці між кернами індуктора). Характер розподілу сил для перемішувача з І-подібним осердям такий же, як і для Ш-подібного, але величина їх значно менша.

Що стосується трифазного індуктора, то нормальні сили, які наводяться в рідкому металі у цьому випадку, більш ніж на порядок менші сил, створених однофазними індукторами, в той час як тангенціальні електромагнітні сили (максимальні значення) у них приблизно однакові. Основною відмінністю у розподілі тангенціальних сил між ними є те, що якщо проінтегрувати ці сили по осі x , то для однофазних індукторів вони дорівнюватимуть нулю, а для трифазного – ні. Саме ця складова електромагнітних сил у випадку індуктора біжучого магнітного поля і створює у ванні печі одноконтурний вихровий рух, незважаючи на те, що вона у декілька разів менша нормальної складової.

Варто зазначити, що величини як нормальної, так і тангенціальної складових електромагнітних сил для розглянутих випадків спадають по координаті y за законом $f(y) = f_0 \exp(-y/\xi_1)$, де f_0 – величина електромагнітних сил на поверхні розплаву, $\xi_1 = 0,018$ м – величина знаменника показника експоненти, отримана за результатами розрахунків електромагнітних сил. Величина ξ_1 , яку можна трактувати як глибину проникнення електромагнітних сил в рідкий метал, приблизно у два рази менша глибини проникнення електромагнітного поля в провідне середовище $\xi = \sqrt{2/(\sigma\mu_0\omega)}$, яка для рідкого алюмінію (при $\omega = 314$ 1/с) складає 0,034 м.

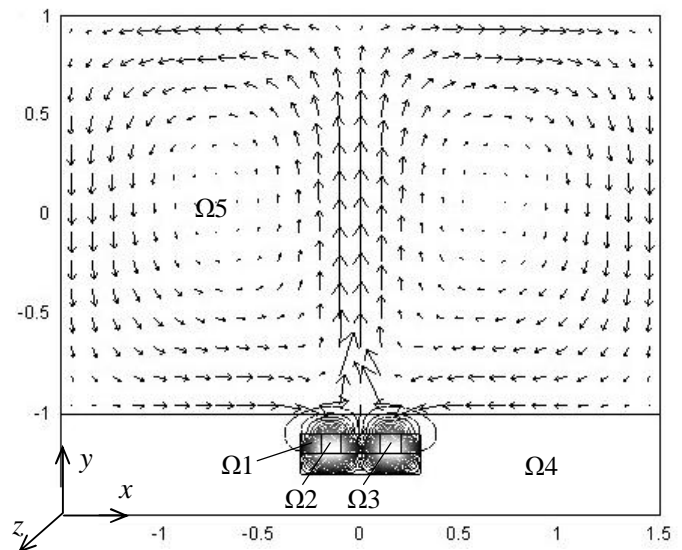


Рис. 2

У результаті розв'язання гідродинамічної задачі для кожного випадку були отримані параметри руху (течії) рідкого металу, що виникає під дією розрахованих вище електромагнітних сил. Як і слід було очікувати, індуктори пульсуючого поля створюють у ванні печі двоконтурну течію (див. рис. 2), а індуктор біжучого поля – одноконтурну (рис. 3).

Подальший аналіз та порівняльна оцінка ефективності кожного варіанту електромагнітного перемішувача проводилися за допомогою інтегральних параметрів, в якості яких виступали інтегральні (тангенціальні і нормальні) електромагнітні сили $F_x = h \int_S f_x ds$ і $F_y = h \int_S f_y ds$,

що діють на рідкий метал, де h і S – глибина і площа поверхні ванни; потужність тепловиділення в рідкому металі $Q = 0,5h \int_S \sigma^{-1} J^2 ds$, де σ – питома елект-

ропровідність рідкого металу; J – густина індукованого в металі струму; об'ємна продуктивність перемішування рідкого металу $N = h \int_l V_n dl$, розрахована шляхом інтегрування норма-

льної складової швидкості уздовж лінії, що з'єднує між собою центри вихорів (для двоконтурної течії) або центр вихору та бічну стінку печі (у випадку одноконтурного руху). Для двоконтурного руху рідкого металу інтегральна тангенціальна сила F_x розраховувалася для однієї половини ванни (значення F_x в цілому для ванни з урахуванням симетричності електромагнітного поля щодо середини індуктора в цих випадках дорівнює нулю).

В результаті проведеного аналізу було встановлено наступне.

Серед розглянутих перемішувачів на основі пульсуючого магнітного поля найменш ефективною виявилася конструкція перемішувача з I-подібним (лінійним) осердям (рис. 1 а). Відсутність у цьому випадку феромагнітних шляхів для замикання магнітного потоку навколо котушки поза рідким металом і стінками печі ослаблює магнітне поле індуктора. Інтегральна нормальна сила F_y у цьому випадку приблизно в 2,5, а продуктивність перемішування розплаву N в 1,7 разу нижчі, ніж при Ш-подібному осерді.

Співставлення між собою перемішувачів з П- і Ш-подібними осердями (рис.1 б і в) показує, що незважаючи на досить істотну різницю як у потужностях тепловиділень Q , так і в силах F_y (в 1,7 разу більші у випадку Ш-подібного осердя), продуктивність перемішування N у них приблизно однакова. Концентрація електромагнітних сил у першому випадку компенсує кількісну різницю в їхній величині, а тому в результаті забезпечується приблизно однакова гідродинамічна ефективність цих перемішувачів.

Особливий інтерес представляє співставлення між собою перемішувачів рідкого металу на основі пульсуючого й біжучого магнітних полів. При однакових ампер-витках продуктивність N розглянутої конструкції перемішувача з біжучим полем виявилася приблизно на 20 % нижчою, ніж у випадку однофазного індуктора з Ш-подібним осердям. Цікаво також відзначити, що за приблизно однаковими гідродинамічними параметрами рівень як електромагнітних сил, так і тепловиділень у рідкому металі у випадку трифазного індуктора біжучого поля майже на порядок нижчий. Тут необхідно зазначити, що оцінка енергетичної ефекти-

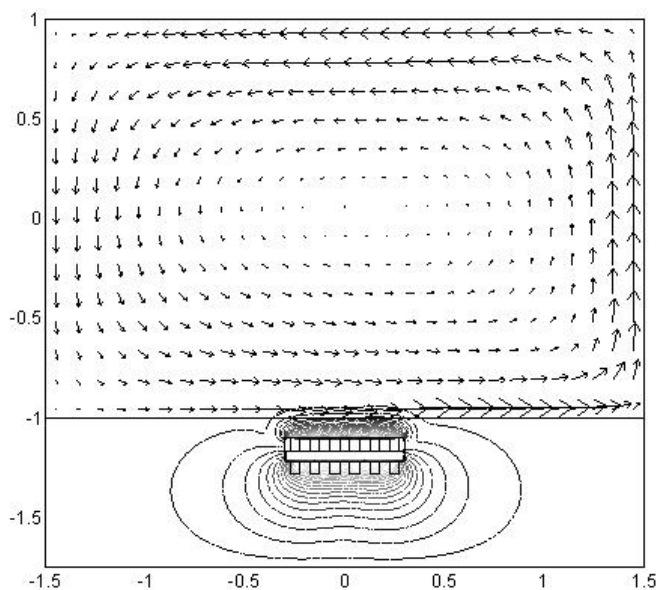


Рис.3

вності електромагнітних пристроїв для металургійного виробництва за звичай проводиться без віднесення до втрат енергії електромагнітного поля, що виділяється в рідкому металі у вигляді тепла. Втратами вважаються лише тепловиділення в індукторі, які при однакових ампер-витках можна також вважати однаковими. Головною відмінністю індукторів пульсуючого і біжучого магнітних полів є те, що перші створюють двоконтурну вихрову течію рідкого металу в ванні печі, а другі – одноконтурну. Як було зазначено, з технологічної точки зору двоконтурна течія є більш ефективною.

Таким чином, наведені результати показують доцільність розробки та впровадження електромагнітних перемішувачів з пульсуючим магнітним полем на відбивних печах для плавлення та приготування алюмінієвих сплавів. Такі перемішувачі у порівнянні з перемішувачами біжучого магнітного поля є більш простими і надійними в експлуатації, більш ефективні з технологічної точки зору та не поступаються їм за ефективністю перемішування.

Роботи у цьому напрямку проводяться спільно з Фізико-технологічним інститутом металів і сплавів НАН України. Там проведена експериментальна перевірка електромагнітного перемішувача рідкого алюмінію з пульсуючим магнітним полем, яка підтвердила спроможність такого пристрою ефективно перемішувати рідкий метал [3].

Окрім електромагнітних перемішувачів рідкого металу у відділі проводились також дослідження електромагнітних систем обертального руху рідкого металу для технології безперервного рафінування алюмінієвих сплавів.

Рафінування розплавленого металу, тобто очищення його від твердих та газоподібних домішок, як відомо, важлива технологічна операція, яка дає змогу покращити якість розплаву і в результаті підвищити механічні властивості отриманих з нього металевих виробів. Відомі різні методи такого очищення, а саме: механічна фільтрація, електрофлюсове рафінування, продування розплаву рафінуючим газом, вакуумування тощо [1, 6].

Значно підвищити ступінь очищення розплаву можна за рахунок використання силової дії електромагнітного поля на розплавлений метал як самостійно, так і в комбінації з іншими методами очищення. Останнє є найбільш продуктивним, і його доцільно використовувати у першу чергу в технології безперервного лиття, оскільки час, за який метал (сплав) має змогу очищатися у цьому випадку, є обмеженим. Сумісна дія електромагнітного поля, наприклад, з продуванням газом суттєво підвищує ефективність очищення розплаву, що дає змогу підвищити якість відлитого металу (зливків). Останнє є особливо важливим для виробів так званого відповідального призначення, наприклад, виробів для авіаційної та ракетно-космічної техніки.

У роботах [4, 5] описана запропонована нами комбінована система рафінування, що поєднує в собі декілька різних за своєю природою методів очищення. Це індукційна установка, яка розроблена на основі індукційної каналної печі і призначена для рафінування переважно легких металів та сплавів у процесі безперервного лиття. Очищення розплаву в ній здійснюється за рахунок пропускання через метал змінного електричного струму, електромагнітного обертання розплаву в циліндричному каналі, продування його рафінуючим газом та фільтрації за допомогою пінокерамічних фільтрів. Обертальний рух розплаву в установці забезпечує електромагнітна система, що містить у собі індуктор (основну котушку) з замкнутим феромагнітним осердям (магнітопроводом) і додаткову двосекційну котушку, намотану поверх індуктора. Наявність просторового та фазового зсувів між магнітними полями основної і додаткової котушок призводить до виникнення електромагнітного моменту, який і змушує обертатися рідкий метал у циліндричних каналах установки.

Для такої системи розв'язано три окремі (але пов'язані між собою) задачі: задача розрахунку електромагнітного поля, гідродинамічна задача розрахунку руху розплаву в циліндричних каналах установки під дією електромагнітних сил та задача розрахунку руху бульбашок рафінуючого газу в обертальному потоці рідкого металу.

Визначення параметрів електромагнітного поля в установці проводилось шляхом чисельного розв'язання в квазітривимірній постановці зв'язаної коло-польової задачі [4]. Відповідно до сформульованої математичної моделі розрахунок виконувався при заданій напру-

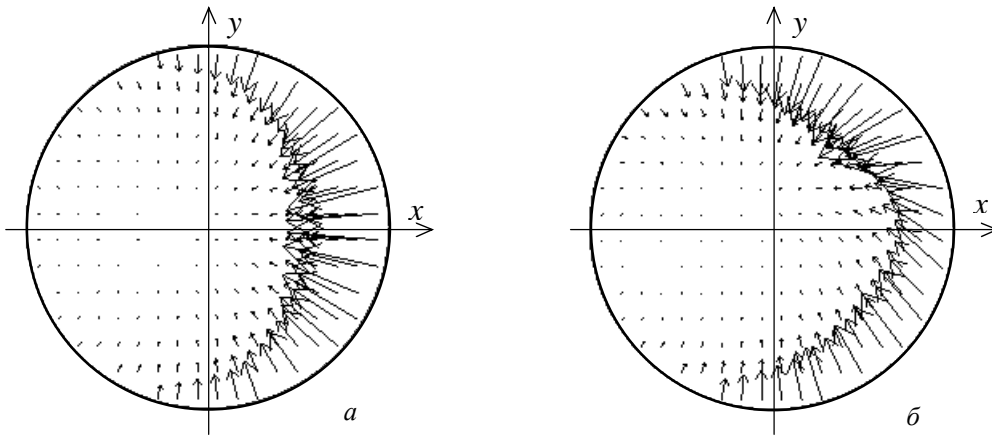


Рис. 4

магнітних сил, що виникають в циліндричному каналі у відсутності додаткової котушки (рис. *a*) та при її наявності (рис. *б*). Внаслідок витіснення струму (за рахунок скін-ефекту і ефекту близькості) розподіл електромагнітних сил у поперечному перерізі каналу є досить неоднорідним. Сили в каналі головним чином концентруються з боку індуктора. У відсутності додаткової котушки вони симетрично розподілені відносно осі x і спрямовані в основному до осі циліндричного каналу, тобто тангенціальні компоненти електромагнітних сил практично відсутні. При наявності котушки зазначена симетрія порушується, при цьому тангенціальні сили збільшуються. Якщо проінтегрувати останні по поперечному перерізу каналу, то отримана таким чином результуюча сила, а отже, і електромагнітний момент у каналі у цьому випадку будуть більшими нуля на відміну від випадку, коли котушка відсутня. За рахунок цього і виникає в каналі обертальний рух рідкого металу.

Розв'язання гідродинамічної задачі для цієї системи дало змогу знайти параметри руху рідкого металу, тобто визначити швидкість вихрової течії у циліндричних каналах установки [5]. На рис. 5 наведено результати розрахунку у вигляді поля швидкостей рідкого металу в циліндричному каналі у відсутності додаткової котушки (рис. *a*) та при її наявності (рис. *б*). Без додаткової котушки в поперечному перерізі каналу виникає симетрична двоконтурна течія металу, аналогічна течії, яка зазвичай має місце в каналах класичних індукційних печей. При наявності додаткової котушки симетрія цієї течії порушується. Зі збільшенням ампер-витків котушки інтенсивність одного вихору зростає, а іншого зменшується. Це продовжується доти, поки двоконтурна течія не перетвориться в одноконтурний (обертальний) рух (рис. 5 *б*). Слід відзначити, що внаслідок неоднорідного розподілу електромагнітних сил у поперечному перерізі каналу рух рідкого металу не є осесиметричним, тобто центр обертового руху не збігається з віссю циліндричного каналу.

І, нарешті, метою третьої задачі було вивчення поведінки дисперсних часток рафінуючого газу, що вдувається в створений таким чином неосесиметричний обертальний потік металевого розплаву. Варто при цьому зазначити, що відомі дослідження поведінки газових часток у рідкому металі при електромагнітному обертанні в основному проводилися для осесиметричного розподілу електромагнітних сил та осесиметричного потоку [2, 8].

Траєкторії руху газових частинок (бульбашок) у циліндричному каналі установки з обертовим рухом рідкого металу знаходили виходячи з балансу сил, що діють на одиночну сферичну бульбашку, шляхом розв'язання нестационарного диференціального рівняння руху під дією сили інерції, сил Архімеда і гравітації, сил, що виникають при обертовому русі, сили гідродинамічного опору та електромагнітної сили.

Розраховувалися траєкторії руху бульбашок газу (аргону) з розмірами в діапазоні 0,001...0,01 м при введенні їх у нижню частину циліндричного каналу в різних точках поперечного перерізу. Розрахунки виконували з врахуванням транзитної течії розплаву в осьо-

зі з урахуванням системи електроживлення установки. Зазначимо, що така досить складна математична задача розв'язувалась також за допомогою стандартного пакета мультифізичного моделювання Femlab.

На рис. 4, як приклад, наведено розподіл електро-

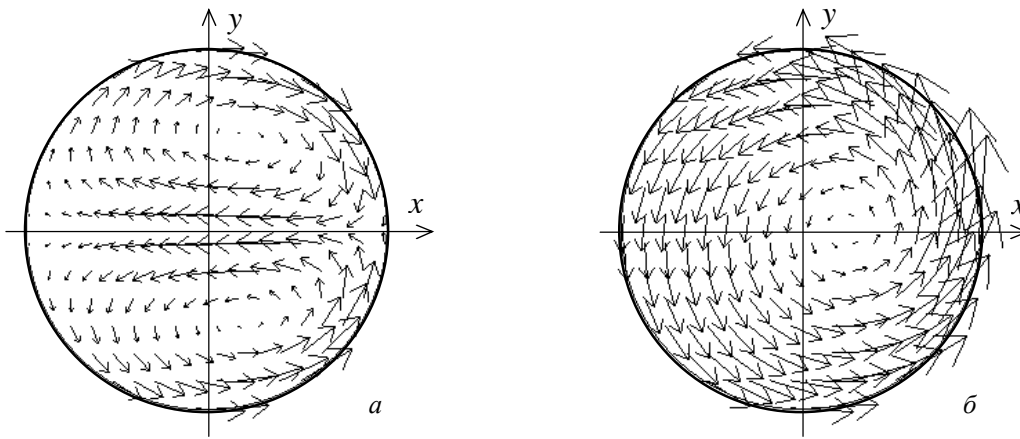


Рис. 5

вому напрямі каналу зі швидкістю 0,035 м/с, що відповідає об'ємній продуктивності установки 0,001 м³/с. Масова продуктивність при рафінуванні рідкого алюмінію при цьому складає 2,35 кг/с.

У ре-

зультаті проведених розрахунків було встановлено, що час спливання бульбашок в осьовому напрямку каналу суттєво залежить від їх розміру. Зі зменшенням розміру газових часток час спливання їх вгору зростає. Зважаючи на те, що рафінуюча дія газових бульбашок залежить від часу перебування їх в розплаві, перевагу слід надати введенню газу в канал у вигляді більш дрібних бульбашок. Введення менших за розміром бульбашок є більш раціональним також і з точки зору більшої загальної поверхні контакту їх з розплавом при однаковому об'ємі газу, що вдувається.

Характер руху (траєкторії) газових часток, якщо розглядати його в проекції на поперечний переріз циліндричного каналу, залежить від ампер-витків додаткової котушки. При порівняно невеликих значеннях ампер-витків всі газові бульбашки незалежно від розміру і місця їх введення в розплав, рухаючись по спіральних орбітах, мігрують до циліндричної стінки каналу (рис. 6 а). При цьому міграція як відносно малих (0,001 м), так і великих (0,01 м) бульбашок переважно відбувається в напрямку індуктора. Таке переміщення бульбашок (з адгезованими на їх поверхні неметалевими частками) має призводити до одностороннього відкладання оксидів на стінці каналу. На практиці саме таке одностороннє “заростання” каналів спостерігається в класичних індукційних каналних печах. Відмінність у поведінці малих і великих бульбашок при такому значенні ампер-витків додаткової котушки є в тому, що більші бульбашки скоріше досягають стінки каналу в порівнянні з малими (час руху бульбашок, що досягають стінок каналу, на рис. 6 проставлено біля кожної траєкторії).

При збільшенні ампер-витків додаткової котушки поведінка газових бульбашок змінюється. У цьому випадку в поперечному перерізі циліндричного каналу утворюються три характерні зони руху: пристінкова, середня і приосьова (рис. 6 б). Бульбашки, введені в рідкий метал у пристінковій і приосьовій зонах, прямують до стінки каналу, а в середній зоні – у зворотному напрямку. При цьому з приосьової і середньої зон бульбашки виходять на замкнуту траєкторію стійкої рівноваги, яка розділяє ці зони. Середню і пристінкову зони, навпаки, розділяє траєкторія нестійкої рівноваги (на рис. 6 б ця границя умовно показана пунктирною лінією). Із подальшим збільшенням ампер-витків розміри пристінкової та приосьової зон зменшуються, а середньої – збільшуються.

При оцінці поведінки рафінуючого газу в обертальному потоці рідкого металу слід мати на увазі, що більш ефективним вважається рух бульбашок по траєкторіях, спрямованих до центру (осі) каналу. Це дає змогу забезпечити рафінування розплаву в більш великому об'ємі каналу за рахунок адгезії та подальшого виносу оксидних часток на поверхню розплаву, в той час як рух бульбашок до стінок каналу призводить до осідання оксидів на них, що є негативним фактором.

Таким чином, характер руху газових бульбашок в обертальному потоці металевого розплаву рафінуючої установки в основному залежить від ампер-витків додаткової котушки, розміру (діаметра) бульбашок та місця їх введення в циліндричний канал. Для збільшення

рафінуючої дії газових часток ампер-витки додаткової котушки мають забезпечити такий обертальний рух рідкого металу, при якому вони мігруватимуть у напрямку осі циліндричного каналу, переболюючи дію радіальних електромагнітних

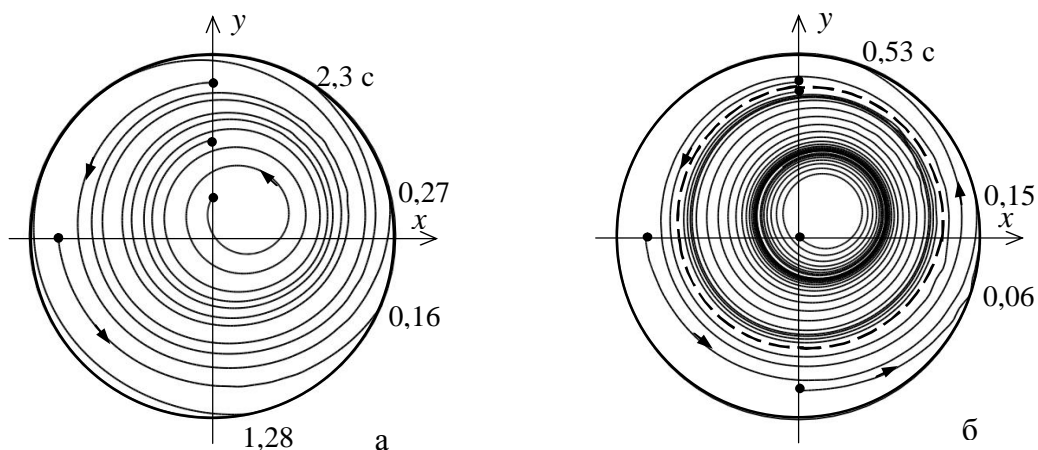


Рис.6

сил. Розміри газових бульбашок при цьому мають бути якомога меншими, а вводити їх у метал необхідно в середню зону поперечного перерізу каналу на границі з пристінковою зоною.

На основі виконаних наукових робіт за темою НДР "Елом-П" розроблено комбіновану установку для рафінування алюмінієвих сплавів у процесі безперервного лиття потужністю 200 кВт, яка монтується між роздавальною піччю (міксером) і ливарною машиною. Додатковою перевагою розробленої установки є можливість підігрівати розплав у процесі лиття до необхідної робочої температури замість перегрівання всієї маси металу, що знаходиться в міксері. Для цієї установки розроблено також систему живлення, яка за рахунок наявності конденсаторних елементів забезпечує близький до 90 ел. град. фазовий зсув між магнітними полями індуктора і допоміжної котушки, а також компенсує реактивну потужність рафінуючої установки. Виконано проектно-конструкторську проробку цієї установки в цілому та окремих її елементів на рівні ескізного проекту. Подальша робота за цим напрямком буде спрямована на створення дослідного взірця установки та впровадження її у промисловість (спільно з Донецьким інститутом кольорових металів).

1. *Альтман М.Б., Глотов Е.Б., Засыпкин В.А., Макаров Г.С.* Вакуумирование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 240 с.
2. *Блинов В.И., Казачков И.В., Колесниченко А.Ф.* Численное исследование вращательного МГД течения с непроводящими полидисперсными включениями в цилиндрическом канале // *Магнитная гидродинамика.* – 1987. – № 3 – С. 78–80.
3. *Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Глухенький А.И., Гориславец Ю.М.* МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем // *Техн. электродинамика.* – 2009. – № 1. – С. 61–66.
4. *Гориславец Ю.М.* Электромагнитное поле и параметры устройства непрерывного рафинирования жидкого металла // *Техн. электродинамика.* – 2008. – №4. – С.69-74.
5. *Гориславец Ю.М., Глухенький А.И.* Определение скорости вращательного движения жидкого металла в устройстве непрерывного рафинирования. *Техн. электродинамика.* – 2008. – № 6. – С. 60–64.
6. *Макаров Г.С.* Рафинирование алюминиевых сплавов газами. – М.: Металлургия, 1983. – 119 с.
7. *FEMLAB User's Guide and Introduction.* – FEMLAB 2.3. – COMSOL, Inc., 1994–2002. – 436 p.
8. *Qi F., Li B., Tsukihashi F.* Behaviors of Argon Gas Bubbles in Electromagnetic Driven Swirling Flow. *The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials.* – 2006. – Sendai, Japan., ISIJ, – P. 248–253.
9. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD // DCW Industries Inc. – 1998.