

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.35.035 : 537.84

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2026.74.005>**РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ДОЗАТОРА УСТАНОВКИ
ДЛЯ ЛИТТЯ СВИНЦЕВИХ ГРАНУЛ**

А.Ф. Жаркін^{*}, акад. НАН України, **Ю.М. Гориславець**^{**}, докт. техн. наук,
О.І. Глухенький^{***}, канд. техн. наук¹
Інститут електродинаміки НАН України,
Берестейський пр., 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: gai56@ied.org.ua

Для установки лиття свинцевих гранул із метою зменшення перегріву розплаву на виході з електромагнітного дозатора запропоновано виконати його каналну частину у вигляді двох послідовних секцій: безпосередньо каналу з рідким металом, що знаходиться у проміжку електромагніту, і мідної шини. Остання з'єднує закритий фланцем торець каналу з ванною дозатора, формуючи у такий спосіб замкнене електричне коло для індуктивного наведення електричного струму. На основі виконаних раніше експериментальних досліджень визначено робочі характеристики електромагнітного дозатора у вигляді узагальнювальних залежностей електричного струму в рідкому металі каналу дозатора, його оптимальної частоти та витрати розплаву через дозатор від діаметра гранул. Шляхом мультифізичного моделювання досліджено тепловий стан електромагнітного дозатора із запропонованою каналною частиною та визначено його теплові характеристики. Показано, що для такої конструкції дозатора перегрів розплаву на виході з насадка, що формує струмінь металу, відносно температури металу на вході в канал не перевищує гранично припустимого значення для стабільного формування та ефективного охолодження гранул. Бібл. 7, рис. 6.

Ключові слова: установка для лиття свинцевих гранул, електромагнітний дозатор, робочі характеристики, комбінована канална частина, мультифізичне моделювання, перегрів металу.

Вступ. Значний попит на металеві гранули монодисперсного складу викликав необхідність створення оригінальних електромагнітних дозаторів, заснованих на використанні капілярного розпаду циліндричних струменів рідкого металу. Дослідження цього фізичного явища, як відомо, було проведено ще в XIX столітті Релеєм, Плато, Саваром, Магнусом, Вебером та іншими відомими дослідниками [1]. Ними було встановлено, що циліндричний струмінь рідини, що витікає з циліндричного отвору, є нестійким до зовнішніх збурень. Тип збурення, до якого струмінь є найбільш чутливим на виході з отвору, – це збурення, яке створює хвилеподібні осесиметричні коливання його поверхні, що мають довжину $\lambda = \sqrt{2}\pi d$ (d – діаметр струменя, який приблизно дорівнює діаметру отвору). Якщо такі коливання підтримуються хроматичною модуляцією швидкості u витікання рідини з частотою $\nu = u/\lambda$, то розпад струменя стає повністю регулярним.

Свого часу в Інституті електродинаміки НАН України було розроблено та досліджено метод керування капілярним розпадом електропровідних струменів шляхом наведення періодичних збурень за допомогою електромагнітних сил [2]. Такі сили створюються в об'ємі електропровідної рідини на вході в фільтр (насадок із каліброваним отвором), що формує циліндричний струмінь. Проведені дослідження дали змогу створити низку пристроїв та установок для електромагнітного дозування рідких металів, які використовують керований (вимушений) розпад рідкометалевих струменів [3]. Зокрема було створено установку для лиття гранул зі свинцю та свинцевих сплавів, які можуть бути використані при виробництві



мисливського і спортивного дробу, хімічних реактивів, композитного припою, що містить флюс, а також як наповнювач для захисних екранів від радіаційного випромінювання [4]. Установка здійснює плавку свинцю за допомогою індукційної каналної печі, стабілізацію рівня рідкого металу в процесі роботи з використанням електромагнітного насоса, керований розпад струменів розплаву і формування сферичних металевих частинок заданого розміру за допомогою електромагнітного дозатора та кристалізацію останніх у водяних плівках. Кількість струменів, що піддаються дробленню в цій установці, – від одного до трьох. Дозатор живиться від регульованого напівпровідникового перетворювача частоти, що дає змогу дробити струмені металу й отримувати сферичні частки різного діаметру в діапазоні частот від 100 до 400 Гц. Завантажуючи в таку установку твердий метал у вигляді чушок, на її виході одержують готові свинцеві гранули монодисперсного складу.

Керований капілярний розпад струменів розплаву в зазначеній установці реалізує електромагнітний дозатор. У дозаторі електромагнітні сили в рідкому металі над фільєрою наводяться в результаті взаємодії перехресних електричного і магнітного полів. Конструктивно він виконаний у вигляді під'єданого до ванни дозатора замкненого каналу, індуктора для збудження струму в каналі з розплавом та електромагніту постійного струму, в проміжку осердя якого розміщена робоча частина каналу з фільєрами. У результаті взаємодії повздовжнього струму в каналі з поперечним магнітним полем електромагніту в рідкому металі над насадками створюються електромагнітні сили, що змінюються в часі з частотою струму в каналі, яку задає перетворювач частоти. Зазначена частота повинна бути узгоджена з власною частотою коливань поверхні струменя, яка залежить від його швидкості та діаметра. За цієї умови електромагнітні сили, створюючи модуляцію тиску в рідкому металі над насадком, підсилюють осесиметричні коливання поверхні струменя, що витікає з насадка, та сприяють згодом його регулярному розпаду на окремі краплі під дією сил поверхневого натягу.

У роботі [5] для такої установки на основі розробленої мультифізичної математичної моделі проведено дослідження пов'язаних між собою електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів в електромагнітному дозаторі з індукційним збудженням струму в каналі. Визначено електромагнітні та енергетичні параметри дозатора, встановлено особливості теплового стану рідкого металу в його каналі. Показано, що величина струму в каналі, яка необхідна для створення достатнього для регулярного подрібнення струменів рідкого металу періодичного електромагнітного тиску, може призводити до значного перегріву розплаву на виході з дозатора, що є критичним для стабільного формоутворення та ефективного охолодження гранул.

Одним із можливих шляхів зменшення такого перегріву може бути виконання каналної частини дозатора у вигляді двох послідовних секцій: безпосередньо каналу з рідким металом, що знаходиться у проміжку електромагніту, і мідної шини, яка з'єднує закритий фланцем торець каналу з ванною дозатора, формуючи цим замкнене електричне коло для індуктивного наведення електричного струму. За такого комбінованого виконання суттєво скорочуються електричні втрати в каналній частині дозатора та зменшується ділянка, на якій відбувається підігрів рідкого металу в каналі (на шляху від ванни дозатора до насадка), що дає змогу уникнути перегріву металу на виході з нього.

На рис. 1 схематично зображено установку для лиття свинцевих гранул, електромагнітний дозатор якої виконано за зазначеною вище схемою, тобто з комбінованою каналною частиною. Установка складається із чотирьох основних систем: індукційної каналної печі, електромагнітного насоса, електромагнітного дозатора та водяного кристалізатора.

Індукційна піч складається із замкненого каналу 1, плавильного відсіку (ванни печі) 2 та індуктора печі 3 із магнітопроводом 4. Канал і ванна печі виконані з немагнітної нержавіючої сталі. Плавлення металу у печі здійснюється електричним струмом, що наводиться індуктором у каналі.

Електромагнітний насос установки служить для підтримання стабільного рівня рідкого металу H у ванні дозатора 5. В установці використовується відомий насос магнітодинамічного типу [6], який складається з каналу 6 і електромагніту змінного струму 7. Гідродинамічний натиск розплаву в ньому створюється завдяки взаємодії наведеного індуктором

печі в каналі 1 електричного струму з магнітним полем електромагніту. Насос працює в режимі, за яким його напір перевищує різницю рівнів металу Δh між ваннами дозатора і печі. Водночас надлишок розплаву, що утворюється у ванні дозатора, перетікає у ванну печі через гідравлічну засувку 8, яка є рухомою для можливості регулювання її висоти. Отже, через вибір положення засувки та організацію переливу через неї забезпечується стабілізація необхідного для роботи дозатора рівня металу у його ванні, який є незалежним від рівня металу в плавильній ванні печі, де він безперервно змінюється внаслідок періодичної заправки твердого металу (чушок свинцю) та витрати рідкого металу в дозаторі.

Електромагнітний дозатор конструктивно включає ванну дозатора 5, індуктор 9, електромагніт постійного струму 10

та комбіновану каналну частину, до складу якої входить канал 11 із насадками (фільєрами) 12, що формують циліндричні струмені рідкого металу, та мідна шина 13. Насадки montуються на нижній поверхні каналу, робоча частина якого розміщена в проміжку осердя електромагніту. Взаємодія змінного електричного струму, що наводиться індуктором у каналі дозатора, із постійним магнітним полем електромагніту призводить до виникнення електромагнітного тиску в рідкому металі, який гармонічно змінюється з частотою струму каналу. Під дією такого тиску і відбувається регулярний розпад струменів рідкого металу з утворенням монодисперсних частинок, які під дією поверхневого натягу набувають сферичну форму.

Кристалізація отриманих у такий спосіб частинок рідкого металу здійснюється у вод'яному кристалізаторі 14, який формує горизонтальні плівки води, розташовані вертикально одна над одною. Конструкція кристалізатора забезпечує створення плівок шириною до 10 см, що дає змогу охолоджувати в них до трьох струменів металу одночасно. Перетинаючи за вільного падіння послідовно ці плівки, сформовані частинки металу охолоджуються і кристалізуються (затвердівають). Закристалізовані таким чином частинки (гранули) збираються в ємності 15.

Мета цієї роботи – для установки лиття свинцевих гранул на основі раніше отриманих експериментальних даних та за допомогою тривимірного мультифізичного моделювання визначити робочі характеристики електромагнітного дозатора з комбінованою каналною частиною, що реалізує керований капілярний розпад струменів рідкого металу.

Електричні і витратні характеристики електромагнітного дозатора. Як відомо, процес розпаду циліндричного струменя рідкого металу під дією електромагнітних сил залежить від багатьох факторів (параметрів), основними серед яких є діаметр струменя (насадка) d , швидкість витікання струменя u , яка визначається висотою металу над насадком H , рівень електромагнітних сил в каналі та частота подрібнення струменя ν , що дорівнює частоті електромагнітних сил (частоті струму) у каналі електромагнітного дозатора. Якщо зв'язати ці параметри між собою, можна отримати робочі характеристики електромагнітно-

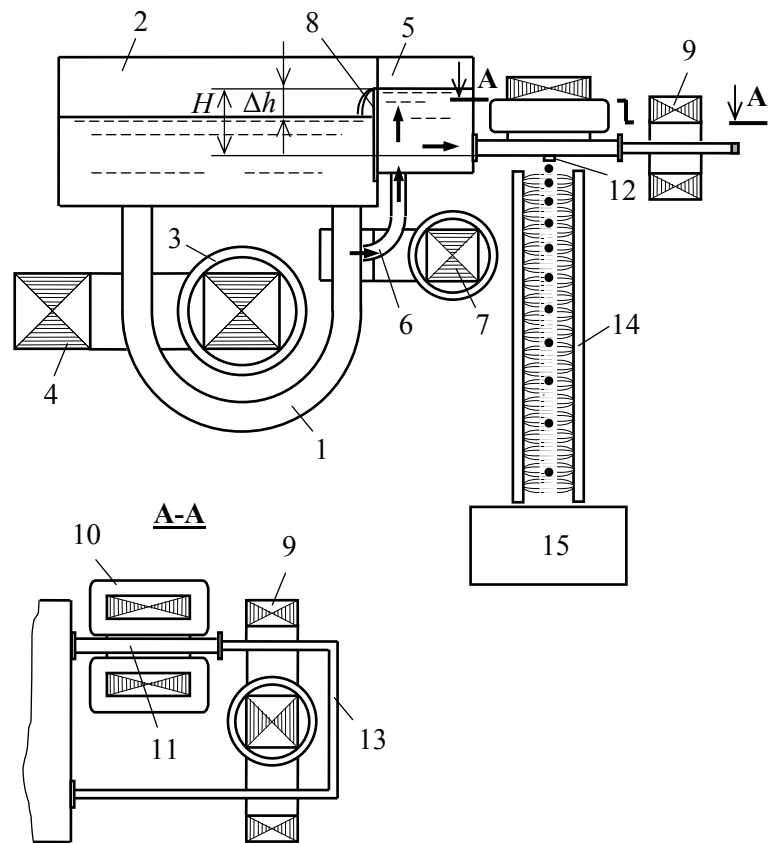


Рис. 1. Конструктивна схема установки для лиття свинцевих гранул із комбінованою каналною частиною дозатора

го дозатора у вигляді узагальнюючих залежностей електричного струму I у рідкому металі каналу дозатора, його оптимальної частоти ν_{opt} та витрати розплаву G через дозатор від діаметра гранул d_{gr} .

При визначенні таких характеристик будемо виходити із основного критерію, що характеризує умови розпаду циліндричного струменя рідкого металу під дією електромагнітних сил, яким, як відомо, є магнітне число Ейлера:

$$Eu_m = \tilde{p} / \rho u^2, \quad (1)$$

де $\tilde{p}$ – амплітуда змінного в часі електромагнітного тиску над отвором насадка, що створюється електромагнітними силами, ρ – густина рідкого металу. Критерій Eu_m визначає відношення електромагнітного тиску до швидкісного натиску струменя.

Як показали виконані раніше експериментальні дослідження, за умови близького збігу частоти електромагнітних сил в каналі із власною частотою коливань поверхні струменя надійний регулярний розпад рідкометалевого струменя безпосередньо у його виток (практично на першій хвилі коливання) відбувається за умови $Eu_m \geq 0,1$. Відповідно до відхилення частоти збурювальних сил від власної частоти коливань струменя для забезпечення чіткого його розпаду рівень силової електромагнітної дії необхідно збільшувати, а проте магнітне число Ейлера може сягати значення 0,5 і навіть більше.

Амплітуду змінного електромагнітного тиску можна приблизно представити як

$$\tilde{p} = \int_0^h j_m B dy, \quad (2)$$

де j_m – амплітудне значення густини струму в рідкому металі каналу дозатора, B – індукція магнітного поля у проміжку електромагніту, h – висота рідкого металу в каналі дозатора, а швидкість струменя як

$$u = \zeta \sqrt{2gH}, \quad (3)$$

де ζ – коефіцієнт швидкості, g – прискорення сил земного тяжіння, H – висота (рівень) металу у ванні дозатора над отвором насадка. Коефіцієнт швидкості ζ залежно від діаметра отвору d експериментально отримано і приведено в роботі [4]. Використовуючи також експериментально визначену в цій же роботі залежність діаметра гранул d_{gr} від діаметра насадка d та приймаючи постійними (константами) магнітне число Ейлера і індукцію магнітного поля в проміжку електромагніту дозатора, можна отримати робочу характеристику дозатора у вигляді залежності значень електричного струму I в рідкому металі каналу, які достатні для забезпечення регулярного розпаду рідкометалевих струменів, від діаметра гранул d_{gr} і висоти металу H у ванні дозатора.

На рис. 2 показано таку характеристику дозатора, яка визначена при $Eu_m = 0,5$, $B = 0,3$ Тл і $h = 20$ мм, у вигляді сімейства кривих $I = \varphi(d_{gr})$ для п'яти значень висоти металу H .

Окрім струму в каналі, другою важливою характеристикою електромагнітного дозатора може бути залежність частоти цього струму від діаметра гранул. Для її встановлення скористаємося результатами експериментального дослідження впливу частоти електромагнітних сил на характер вимушеного розпаду струменя рідкого металу при фіксованих значеннях діаметра насадка і висоти металу над ним. Ці результати представлено в роботі [4], в якій показано, що за відносно малої частоти електромагнітних збурень, коли довжина хвилі λ на поверхні рідкометалевого струменя перевершує ту довжину його відрізка, яка спроможна за заданого діаметра трансформуватися в одну круглу частинку (краплю), поряд з основною (максимально можливою за розміром) частинкою виникає крапля-супутник. Збільшення частоти струму (збурень) ν призводить до зменшення розміру супутника, аж до його повного зникнення. Розмір основної частинки за таких обставин залишається незмінним. Значення частоти, при якому повністю зникає супутник, що супроводжує основну краплю, у цій роботі названо оптимальною частотою ν_{opt} . Власне це та частота, яка дає змогу за заданого діаметра насадка d і висоті металу H , що визначає швидкість витікання струменя, одержати максимально можливі за розміром монодисперсні частинки. Подальше збільшення частоти ν призво-

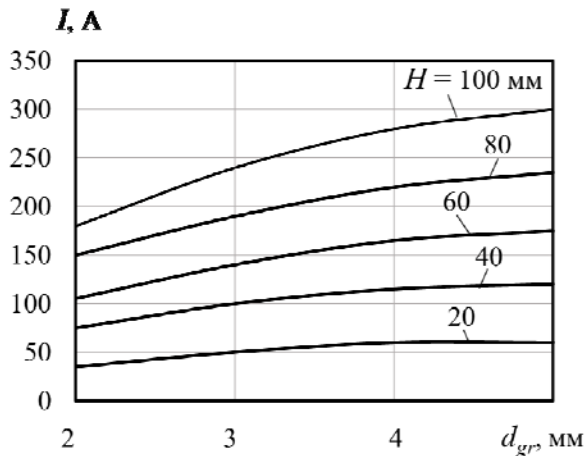


Рис. 2. Залежність достатніх значень струму в рідкому металі каналу дозатора від діаметра гранул

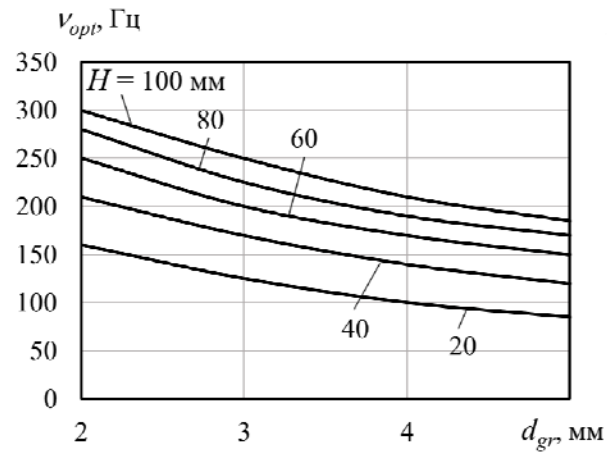


Рис. 3. Залежність оптимальної частоти струму в рідкому металі каналу дозатора від діаметра гранул

дить до зменшення розміру рідких частинок та потребує збільшення рівня електромагнітних сил, необхідного для їх отримання.

У зазначеній роботі наведено залежності оптимальної частоти розпаду струменя v_{opt} від висоти металу H для трьох фіксованих значень діаметра насадка: 1,6; 2,1 і 2,4 мм. Показано, що оптимальна частота керованого розпаду струменя збільшується із зростанням висоти розплаву над насадком і зменшується з ростом діаметра отвору насадка.

На рис. 3 шляхом інтерполяції та екстраполяції наведених у роботі [4] даних показано залежності оптимальної частоти v_{opt} розпаду струменя рідкого металу від розміру (діаметра) гранул d_{gr} , який змінюється в діапазоні від 2 до 5 мм для різних значень висоти металу H . Зображені залежності дають змогу за виставленим рівнем рідкого металу у ванні дозатора визначати для кожного діаметра гранул робочу (оптимальну) частоту струму в каналі дозатора, яка забезпечує отримання монодисперсних гранул відповідного розміру.

Використовуючи визначені у такий спосіб залежності оптимальної частоти, була також визначена витрата рідкого металу через насадок при отриманні гранул різних розмірів за заданої висоти металу H . На рис. 4 показано залежності витрати G рідкого металу (розплаву свинцю) від діаметра гранул у випадку наявності одного насадка в каналі дозатора. Звісно, що при двох або трьох насадках витрата металу через дозатор збільшиться відповідно у два – три рази. Слід зазначити, що те чи інше значення витрати рідкого металу повинно забезпечуватися наявністю відповідної кількості розплаву в установці завдяки роботі плавильної печі, тобто активна потужність індукційної каналної печі установки повинна корелюватися з витратою металу через електромагнітний дозатор (продуктивністю установки). На рис. 4, як приклад, для трьох значень потужності печі $P_{furn} = 5, 10$ і 15 кВт точками позначено відповідно узгоджені (корельовані) значення витрати металу.

Визначені робочі характеристики електромагнітного дозатора разом з експериментальною залежністю розміру гранул від діаметра отвору насадка та відомою залежністю активної потужності індукційної каналної печі від струму індуктора дають змогу знаходити, з огляду на розмір гранул та висоту металу у ванні дозатора, всі основні параметри режиму роботи установки для лиття свинцевих гранул, а саме: струм індук-

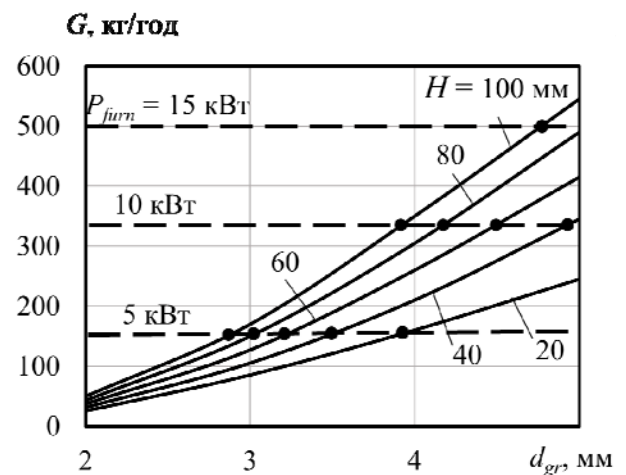


Рис. 4. Витрата рідкого металу через насадок при отриманні гранул різних розмірів

тора печі, струм індуктора дозатора, його частоту, струм електромагніту постійного струму та діаметр отвору насадка.

Теплові характеристики електромагнітного дозатора з комбінованим каналом. Як уже зазначалося, у роботі [5] для установки лиття свинцевих гранул досліджено тепловий стан електромагнітного дозатора з індукційним наведенням електричного струму, канална частина якого виконана у вигляді вигнутої (круглої в поперечному перерізі) труби, обидва кінці якої приєднано до ванни дозатора. За допомогою індуктора в такому каналі (в рідкому металі і стінках каналу) наводиться змінний електричний струм відповідної частоти. Дослідження виконувалися шляхом чисельного моделювання взаємопов'язаних електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів у такій системі. Для цього було розроблено математичну модель, яка реалізована в програмному середовищі Comsol Multiphysics [7]. Адекватність математичної моделі підтверджена шляхом порівняння з експериментальними даними.

Ця ж модель, вихідними даними якої розглядаються струм індуктора дозатора, його частота та масова витрата рідкого металу через насадок, була використана і для дослідження запропонованої конструкції електромагнітного дозатора з комбінованою каналною частиною, схематично зображеної на рис. 1.

У математичній моделі, яка докладно представлена в роботі [5], для розрахунку електромагнітного поля використано рівняння відносно векторного магнітного потенціалу

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r) \dot{\mathbf{A}} = \dot{\mathbf{J}}_e, \quad (4)$$

де $\dot{\mathbf{A}}$ і $\dot{\mathbf{J}}_e$ – відповідно комплексні амплітуди векторного магнітного потенціалу та густини зовнішнього струму, ω – кутова частота, σ – питома електропровідність, μ_0 і ϵ_0 – магнітна та діелектрична проникність вакууму, μ_r і ϵ_r – відносні магнітні та діелектричні проникності.

За результатами розрахунку електромагнітної задачі обчислювалися електромагнітні сили $\mathbf{f}$ в розплаві, що впливають на рух металу в каналі, та потужність джоулевих тепловиділень q від наведених струмів у розплаві та стінках каналу і ванни дозатора, які задавалися як вихідні данні в гідродинамічній та тепловій задачах відповідно

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

$$q = 0,5 \dot{\mathbf{J}} \cdot \dot{\mathbf{J}}^* / \sigma, \quad (6)$$

де $\dot{\mathbf{J}}$ – комплексна амплітуда густини струму провідності, $\dot{\mathbf{J}}$ і $\dot{\mathbf{B}}$ – відповідно спряжені комплексні амплітуди густини струму провідності та індукції магнітного поля.

Гідродинамічна задача розв'язувалась для об'єму розплаву, який заповнює ванну та канал дозатора, шляхом чисельного рішення нелінійних рівнянь Нав'є-Стокса для стаціонарної турбулентної течії

$$\rho_m (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (8)$$

де $\mathbf{u}$ – швидкість рідкого металу, η_{eff} – коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості, ρ_m – густина рідкого металу, p – тиск. Для розрахунку коефіцієнтів ефективної динамічної в'язкості розплаву використовувалась k - ϵ модель турбулентності.

Рух розплаву в каналі на шляху з ванни дозатора до насадка, який пов'язаний з масовою продуктивністю G роботи дозатора, в гідродинамічній задачі вводився за допомогою граничної умови виходу (Outlet) з відповідним заданим значенням масової витрати на вільній поверхні отвору насадка.

Для розрахунку розподілу температури в дозаторі застосовувалось стаціонарне рівняння теплопровідності, яке врахує тепломасоперенос завдяки руху розплаву

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) + q, \quad (9)$$

де T – абсолютна температура, C_p – питома теплоємність, λ_{eff} – коефіцієнт ефективної теплопровідності.

Розрахункову область електромагнітного дозатора з комбінованою каналною частиною показано на рис. 5. У конструкції цього дозатора відносно попереднього варіанту [5]

змінено просторове розміщення індуктора та електромагніту відносно ванни дозатора. Комбінована канална частина дозатора виконана із двох стикованих між собою частин: каналу з рідким металом у вигляді круглої нержавіючої труби діаметром 20 мм (товщина стінки 2 мм) і мідної шини поперечним перерізом $(20 \times 5) \text{ мм}^2$.

За такого виконання каналної частини дозатора подача рідкого металу з робочого відсіку до насадка відбувається з одного боку, що сприяє завдяки збільшеному тепломасопереносу стабілізації температури металу вздовж цієї ділянки каналу. Зменшується також ділянка, вздовж якої відбувається підігрів/охолодження рідкого металу в каналі на шляху до насадка. Обидва фактори в запропонованій конструкції дозатора сприяють зменшенню різниці ΔT між температурою металу на виході з насадка T_n та його температурою на вході в канал дозатора T_k ($\Delta T = T_n - T_k$).

Для розрахункового дослідження теплового стану рідкого металу в каналі дозатора приймалося, що комбінована канална частина дозатора по всій довжині була теплоізовльована шаром вати з базальтових волокон товщиною 5 мм.

На рис. 6 подано теплові характеристики електромагнітного дозатора у вигляді залежності різниці температури металу ΔT від діаметра гранул за різних значень висоти металу H у ванні дозатора, які були отримані, виходячи з визначених раніше значень електричного струму I в рідкому металі каналу (рис. 2), його оптимальної частоти $\nu_{\text{опт}}$ (рис. 3) та витрати рідкого металу через один насадок G (рис. 4), які забезпечують отримання гранул відповідного розміру.

Як видно з наведеного рисунка, для запропонованої конструкції електромагнітного дозатора з комбінованою каналною частиною при одержанні гранул розміром від 2 до 5 мм для всіх розглянутих значень висоти металу H у ванні дозатора перегрів розплаву на виході з насадка відносно температури металу на вході в канал не перевищує 10 К. Отже, у разі забезпечення у ванні дозатора на вході в канал температури розплаву T_k , близької до температури плавлення $T_{\text{пл}}$, зазначене значення ΔT цілком задовольняє умову стабільного формоутворення та ефективного охолодження гранул, за якої температура розплаву на виході з насадка T_n не повинна перевищувати $T_{\text{пл}}$ більш ніж на 20 К.

Водночас у дозаторі з комбінованою каналною частиною за режимів роботи з відносно малою висотою металу у ванні дозатора ($H \leq 50 \text{ мм}$), навпаки, можливе охолодження розплаву в каналі на шляху до насадка, яке, особливо в разі отримання гранул малих розмірів, буде досить значним.

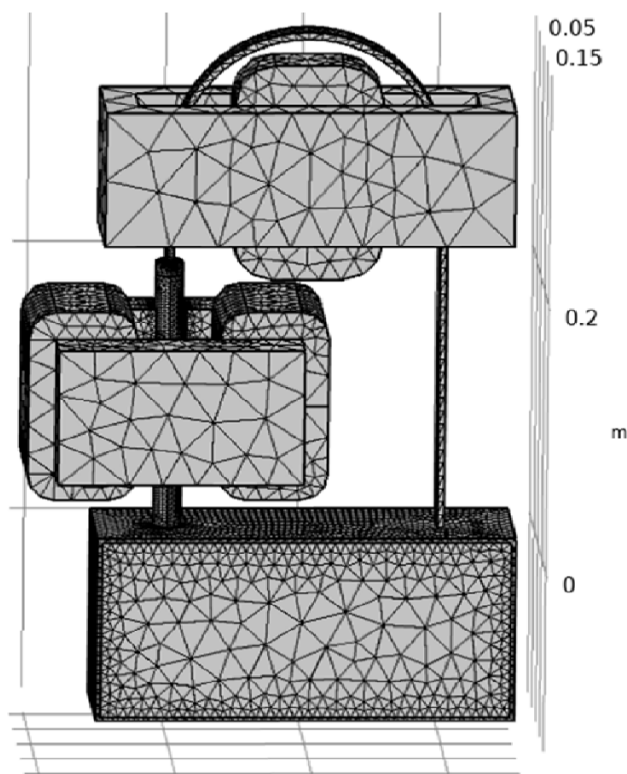


Рис. 5. Розрахункова область дозатора із комбінованою каналною частиною

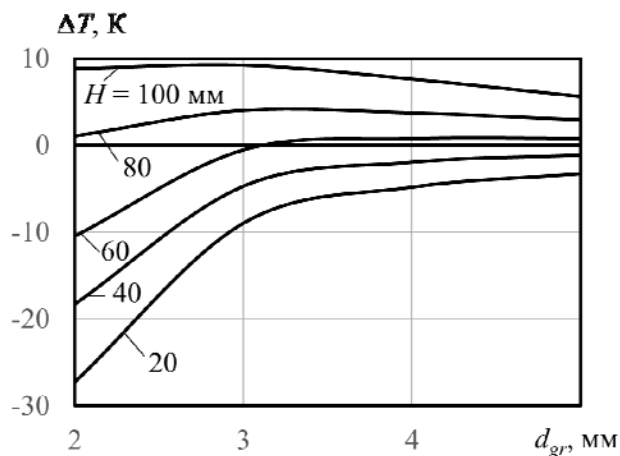


Рис. 6. Різниця температури розплаву на виході з насадка відносно його температури на вході в канал

Так, при $H = 20$ мм та $d_{gr} = 2$ мм у каналі на шляху з ванни дозатора до насадка відбувається охолодження розплаву приблизно на 27 К.

В установці для лиття свинцевих гранул охолодження розплаву в каналі електромагнітного дозатора є не настільки критичним як перегрів, оскільки компенсація охолодження для отримання необхідної температури на виході з насадка можлива через підвищення температури розплаву у ванні дозатора шляхом збільшення потужності плавильної печі. Зрозуміло, що при значному перегріві розплаву в каналі знижати температуру у ванні дозатора нижче температури плавлення не можна, оскільки метал у такому разі перестав бути рідиною.

Одним із шляхів зменшення як перегріву, так і охолодження розплаву в дозаторі з комбінованою каналною частиною при одержанні гранул малих розмірів є його робота з двома або трьома насадками, унаслідок чого відповідно збільшиться витрата металу, що сприятиме завдяки тепломасопереносу стабілізації температури металу в каналі.

Висновки. 1. З метою зменшення перегріву рідкого металу на виході з насадка електромагнітного дозатора запропоновано його каналну частину з індукційним наведенням струму виконати комбінованою у вигляді стикованих між собою нержавіючої труби та мідної шини.

2. На основі раніше отриманих експериментальних даних визначено робочі характеристики електромагнітного дозатора, що реалізує вимушений капілярний розпад циліндричного струменя рідкого металу, у вигляді узагальнювальних залежностей електричного струму в рідкому металі каналу дозатора, його оптимальної частоти та витрати розплаву через дозатор від діаметра гранул та рівня металу у ванні дозатора. Зазначені характеристики разом з експериментальною залежністю розміру гранул від діаметру отвору насадка та відомою залежністю активної потужності індукційної каналної печі від струму індуктора дають змогу визначати, виходячи з розміру гранул та висоти металу у ванні дозатора, всі основні параметри режиму роботи установки для лиття свинцевих гранул, а саме: струм індуктора печі, струм індуктора дозатора, його частоту, струм електромагніту постійного струму та діаметр отвору насадка.

3. Розрахунковим шляхом отримано теплові робочі характеристики електромагнітного дозатора у вигляді різниці температури розплаву на виході з насадка і температури у ванні дозатора залежно від розміру гранул і висоти металу в дозаторі. Установлено, що при отриманні гранул розміром від 2 до 5 мм для діапазону значень висоти металу над насадком 20-100 мм перегрів металу в каналі на шляху з ванни дозатора до насадка не перевищує 10 К. Зазначене значення цілком задовольняє умову стабільного формоутворення та ефективного охолодження гранул, за якої бажана температура розплаву на виході з насадка не перевищувала б температуру плавлення більш ніж на 20 К.

Представлені дослідження проведено завдяки грантовій підтримці Національного фонду досліджень України, конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності і національної безпеки України», проєкт №2025.06/0010 «Магнітогідродинамічна установка для виробництва свинцевого дробу для протидронових набойів».

1. Рэлей Дж. Теория звука. М.: Гостехиздат. 1955. Т. 2. 475 с.
2. Колесниченко А.Ф., Казачков И.В., Водянюк В.О., Лысак Н.В. Капиллярные МГД течения со свободными границами. К.: Наук. думка, 1988. 176 с.
3. Шидловский А.К., Гориславец Ю.М., Глухенький А.И. Электромагнитные системы для дозирования жидких металлов. К.: ІЕД НАН України. 2011. 208 с. ISBN 978-966-02-6101-3.
4. Гориславец Ю.М., Глухенький О.І., Михальський В.М., Токаревський А.В. Установка для електромагнітного дозування рідкого металу підвищеної продуктивності. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 74–80.
5. Жаркін А.Ф., Бондар О.І., Глухенький О.І., Залозний В.І. Мультифізичне моделювання електромагнітного дозатора установки для виробництва свинцевих гранул. *Технічна електродинаміка*. 2026. № 3. С. 74–80. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2026.03.088>
6. Полищук В.П., Цин М.Р., Горн Р.К., Дубоделов В.И., Погорский В.К., Трефняк В.А. Магнитодинамические насосы для жидких металлов. К.: Наук. думка, 1989. 256 с.
7. Comsol Multiphysics. URL: <https://www.comsol.com/> / (дата звернення 20.02.2026).

OPERATING CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC DOSER OF THE INSTALLATION FOR CASTING LEAD GRANULES**A.F. Zharkin, Yu.M. Goryslavets, O.I. Hlukhenkyi**

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

Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: gai56@ied.org.ua

For a lead granules casting installation in order to reduce metal overheating at the outlet of an electromagnetic doser, it is proposed to make its channel part in the form of two consecutive sections: directly the channel with liquid metal located in the gap of the electromagnet, and a copper bus. The latter connects the flanged end of the channel with the doser bath, thereby forming a closed electric circuit for inductive induction of electric current. Based on previously performed experimental studies, the operating characteristics of the electromagnetic doser were determined in the form of generalized dependences of the electric current in the liquid metal of the doser channel, its optimal frequency and the melt flow rate through the doser on the diameter of the granules. By means of multiphysical modeling, the thermal state of the electromagnetic doser with the proposed channel part was investigated and its thermal characteristics were determined. It is shown that for this design of the doser, the overheating of the melt at the outlet of the nozzle that forms the metal jet, relative to the temperature of the metal at the inlet to the channel, does not exceed the maximum permissible value for stable shaping and effective cooling of the granules. Ref. 7, fig. 6.

Key words: installation for casting lead granules, electromagnetic doser, operating characteristics, combined channel part, multiphysics modeling, metal overheating.

1. Rayleigh J. Theory of Sound. Moscow: Gostekhizdat. 1955. Vol. 2. 475 p. (Rus)
2. Kolesnichenko A.F., Kazachkov I.V., Vodyanyuk V.O., Lysak N.V. Capillary MHD Flows with Free Boundaries. Kiev: Nauk. Dumka, 1988. 176 p. (Rus)
3. Shidlovskii A.K., Gorislavets Yu.M., Glukhenkii A.I. Electromagnetic systems for batching of liquid metals. Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2011. 208 p. (Rus)
4. Goryslavets Yu.M., Glukhenkyi O.I., Mikhalskyi V.M., Tokarevskyi A.V. Installation for electromagnetic batching of liquid metal with high productivity. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 5. Pp. 74–80. (Ukr)
5. Zharkin A.F., Bondar O.I., Hlukhenkyi O.I., Zaliznyi V.I. Multiphysical modeling of electromagnetic doser installation for lead pellets production. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2026. No 3. Pp. 74–80. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2026.03.088>
6. Polischuk V.P., Tsin M.R., Gorn R.K., Dubodelov V.I., Pogorsky V.K., Trefnyak V.A. Magnetodynamic pumps for liquid metals. Kyiv: Nauk. Dumka, 1989. 256 p. (Rus)
7. Comsol Multiphysics. URL: Access mode: <https://www.comsol.com/> (access date 20.02.2026).

Надійшла: 16.02.2026

Прийнята: 26.02.2026

Submitted: 16.02.2026

Accepted: 26.02.2026