

**МУЛЬТИФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ДОЗАТОРА
УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СВИНЦЕВИХ ГРАНУЛ**

А.Ф. Жаркін*, академік НАН України, **О.І. Бондар**** , канд. техн. наук,
О.І. Глухенький*** , канд. техн. наук, **В.І. Залозний****** , канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: gai56@ied.org.ua.

Для електромагнітного дозатора з індукційним наведенням струму в каналі розроблено тривимірну математичну модель взаємопов'язаних електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів. Шляхом порівняння з експериментальними даними, отриманими для дослідного зразка МГД установки для виробництва свинцевих гранул, виконано апробацію математичної моделі електромагнітних процесів в дозаторі. За допомогою математичного моделювання досліджено фізичні процеси в системі "індуктор дозатора – замкнений канал з рідким металом – магніт дозатора". Визначено електромагнітні та енергетичні параметри дозатора, встановлено особливості теплового стану рідкого металу в його каналі. Сформульовано рекомендації щодо зниження перегріву металу в каналі дозатора. Бібл. 9, рис. 10.

Ключові слова: МГД установка, електромагнітний дозатор, мультифізичне моделювання, перегрів металу, транзитний рух.

Вступ. Широке використання безпілотних літальних апаратів (БпЛА) збройними силами російської федерації у війні проти України гостро поставило питання протидії цим системам. Виявилось, що протидія БпЛА, особливо таким малим як FPV-дрони, є надзвичайно складною та багатогранною проблемою. Не зважаючи на наявність таких високоефективних і перспективних засобів як радіоелектронне придушення, ураження надвисокочастотним та лазерним випромінюванням, на сучасному етапі свого розвитку вони не дають змоги самостійно гарантовано запобігати польоту БпЛА в район виконання завдання, мають обмеження щодо застосування зв'язку, потребують забезпечення електромагнітної сумісності з іншими радіоелектронними засобами, не мають високого ступеню вибірності стосовно цілей, що уражаються. Отже, зазначені засоби на даний час можуть бути використані задля протидії БпЛА тільки в сукупності з іншими засобами, в першу чергу із засобами фізичного та вогневого ураження [1].

Серед найбільш ефективних засобів вогневого ураження FPV-дронів можна виділити знищення їх вогнем стрілецької зброї, в першу чергу з гладкоствольних рушниць, вражаючим елементом яких переважно є свинцевий дріб [2]. Використання свинцевого дробу як вражаючого елементу набоїв дає можливість збільшити площу ураження, що важливо для протидії таким мало-розмірним швидкісним та маневреним цілям як FPV-дрони. Їхнім недоліком є недостатня ефективна дальність ураження (до 50 м). Застосування набоїв з свинцевим дробом задля протидії малим БпЛА постійно поширюється та удосконалюється. Зокрема в зоні бойових дій пропонується споряджати кожен транспортну одиницю одразу декількома штатними рушницями (дробовиками) [3]. Для протидії розвідувальним безпілотникам супротивника набуває поширення практика встановлення дробовиків на дрони-перехоплювачі [4]. Задля збільшення ефективної дальності ураження пропонуються патрони з більшим дробово/пороховим навішуванням. Ведеться пошук у напрямку

© Жаркін А.Ф., Бондар О.І., Глухенький О.І., Залозний В.І., 2026
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-5996-0901>; ** <https://orcid.org/0000-0002-1678-8862>;
*** <https://orcid.org/0000-0001-5053-5677>; **** <https://orcid.org/0009-0006-9585-5010>

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2026



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

створення більш потужних дробових набоїв для гладкоствольної зброї, підствольних гранатометів, ракетниць тощо, що буде призводити до різкого збільшення необхідних обсягів свинцевого дробу.

Потреба в набоях до гладкоствольних рушниць в Україні в основному задовольняється за рахунок імпорتنих поставок споряджених мисливських патронів, що є дорого і нераціонально. Власне виробництво свинцевого дробу є досить обмеженим та ведеться напівкустарними способами. Переважно пропонується м'який дріб, який має незадовільні балістичні показники внаслідок деформації під час пострілу. Особливо такий дріб неефективний у разі великого дробово/порохового навішування [5].

В Інституті електродинаміки НАН України в свій час було запропоновано отримувати металеві гранули розміром до 5 мм шляхом забезпечення керованого капілярного розпаду циліндричних струменів металевого розплаву за допомогою періодичних електромагнітних сил. Такі сили створюють в об'ємі рідкого металу на вході в насадок (калібровану філь'єру), що формує струмінь. Реалізація цього методу дала змогу розробити низку дослідних (лабораторних) магнітогідродинамічних (МГД) пристроїв для гранулювання різних металів та сплавів [6]. Одним з прикладів такої реалізації стала МГД установка для виробництва свинцевого дробу, яка поєднує в собі процеси плавлення металу в індукційній каналній печі, перемішування розплаву й підтримання стабільного його рівня за допомогою магнітодинамічного насосу, формування і подрібнення циліндричних струменів в електромагнітному дозаторі з утворенням монодисперсних сферичних частинок розплаву та кристалізацію останніх у водяних плівках. Таким чином, завантажуючи в цю установку твердий метал, на виході її отримують готовий дріб.

МГД установка для виробництва свинцевого дробу дає можливість оперативно організувати без значних додаткових фінансових витрат компактно виробництво свинцевого дробу; отримати для спорядження протидронових набоїв твердий дріб (за рахунок кристалізації та швидкого охолодження у воді); використовувати як вихідну сировину замість первинного свинцю більш дешевий вторинний свинець; відмовитися від застосування дорогих та шкідливих добавок задля збільшення поверхневого натягу розплаву (наприклад, з'єднань миш'яку); суттєво спростити (порівняно з класичним способом лиття) технологічний процес за рахунок виключення цілого ряду операцій, таких як попередня підготовка розплаву (плавлення, рафінування, приготування сплаву), сортування (відбраковування) і класифікація за розмірами дробу та ін., що вимагають додаткового робочого персоналу, дороговартісного промислового обладнання та значних робочих площ для його розміщення.

Керований розпад струменів рідкого металу в МГД установці здійснюється за допомогою електромагнітних сил, що наводяться в рідкому металі в результаті взаємодії перехресних електричних і магнітних полів. Конструктивно електромагнітні дозатори виконуються у вигляді електромагніту постійного або змінного струму, в проміжку якого розміщено канал з рідким металом. В каналі протікає повздовжній змінний електричний струм, який підводиться кондуктивно або наводиться індуктором. У результаті взаємодії цього струму з поперечним магнітним полем електромагніту в рідкому металі виникають періодичні електромагнітні сили, які викликають модуляцію тиску в рідкому металі над насадком, а, відповідно, і модуляцію швидкості струменя, що витікає з насадка, сприяючи в подальшому його регулярному розпаду на окремі краплі під дією сил поверхневого натягу.

У випадку індукційного наведення струму в каналі дозатора МГД установка для виробництва свинцевого дробу складається з двох практично однакових за складом та незалежних одна від одної електромагнітних систем, до складу кожної з яких входить індуктор, заповнений рідким металом замкнений канал та електромагніт. Плавлення металу та підтримання необхідного температурного режиму розплаву в обох системах забезпечується за рахунок вибору величини електричного струму у відповідних каналах, силова дія на метал – за рахунок взаємодії повздовжнього струму в каналах з поперечним магнітним полем електромагнітів. В роботі [7] на основі тривимірного комп'ютерного моделювання розглянуто електромагнітні процеси в першій з цих систем, а саме: в системі "індукційна канална піч – рідкометалевий насос", що, зокрема, дало змогу розрахунковим шляхом дослідити можливість реалізації в установці фазового керування електромагнітним тиском рідкометалевого насоса.

Мета цієї роботи – для МГД установки для виробництва свинцевого дробу з індукційним наведенням струму в каналі електромагнітного дозатора на основі тривимірного математичного моделювання взаємопов'язаних електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів визначити електромагнітні та енергетичні параметри електромагнітного дозатора, дослідити їхній вплив на

технологічний режим роботи дозатора, встановити закономірності теплового стану рідкого металу в каналі дозатора та визначити шляхи вдосконалення конструкції установки. Задачі цього дослідження полягають у розробці математичної моделі взаємопов'язаних мультифізичних процесів в електромагнітному дозаторі, визначенні на основі комп'ютерного моделювання його основних енергетичних та електромагнітних параметрів, пошуку рішень щодо зниження перегріву металу в каналі дозатора.

Доцільність використання індуктивного наведення струму в каналі дозатора МГД установки виникла внаслідок необхідності підвищення продуктивності установки, що можливо реалізувати за рахунок збільшення частоти розпаду струменів. Для цього запропоновано підвищити частоту струму в каналі дозатора, а періодичні електромагнітні зусилля створювати за рахунок взаємодії змінного електричного струму в каналі з магнітним полем електромагніту постійного струму. Підвищення частоти струму в каналі дозатора, величина якого в процесі роботи може сягати значень до 600 А, зробило нераціональним його кондуктивне підведення, враховуючи підвищені втрати потужності та падіння напруги в кабелях між дозатором та джерелом живлення.

На рис. 1 схематично представлено конструктивну схему електромагнітного дозатора дослідної МГД установки з індуктивним наведенням електричного струму в каналі. Замкнений канал 1 під'єднано до робочого відсіку 2 ванни з рідким металом, де підтримується постійний рівень рідкого металу H . Електричний струм в каналі наводиться за допомогою індуктора 3. До складу дозатора також входить електромагніт постійного струму 4, в проміжку якого знаходиться робоча частина каналу з насадками 5, що формують циліндричні струмені рідкого металу. Індуктор дозатора живиться від перетворювача частоти, який має здатність незалежно регулювати напругу в межах від 0 до 380 В і частоту в діапазоні 100...400 Гц.

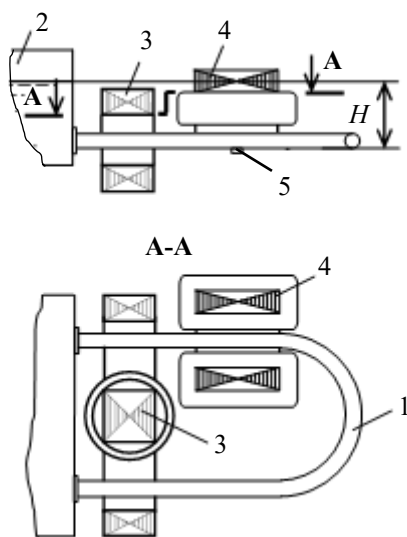


Рис. 1

За такого конструктивного рішення частота електромагнітних сил в дозаторі визначається частотою струму в каналі, а рівень електромагнітного тиску в ньому залежить від добутку значень струму в розплаві та індукції магнітного поля в проміжку електромагніту. В процесі отримання монодисперсних часток (дробу) діаметр насадків, висота розплаву над ними і частота вимушеного розпаду струменів повинні бути узгоджені, а рівень електромагнітних сил достатнім для подрібнення струменю безпосередньо біля витоку. Задля забезпечення стабільного формоутворення та ефективного охолодження дробу бажано мати на виході з насадків стабільну температуру розплаву з незначним перегрівом ($10-20^{\circ}\text{C}$) відносно температури плавлення.

Експериментальні дослідження дослідної МГД установки з індукційним наведенням струму в каналі електромагнітного дозатора загалом засвідчили працездатність запропонованого конструктивного рішення. В той же час проведені дослідження зафіксували деяку складність підтримання стабільного температурного режиму каналу дозатора в процесі його роботи. Як відомо, використання методів математичного моделювання в доповнення до експериментальних досліджень дає змогу глибше зрозуміти взаємозв'язок фізичних явищ в складному технологічному обладнанні, що сприяє як знаходженню оптимальних конструктивних рішень для його складових елементів, так і вибору раціональних технологічних режимів його експлуатації.

Математична модель. Розрахункове дослідження фізичних процесів в електромагнітному дозаторі з індуктивним наведенням електричного струму в каналі потребує вирішення електромагнітної, гідродинамічної та теплової задач. Моделювання мультифізичних процесів виконувалося в програмному середовищі Comsol Multiphysics [8]. Досліджувався усталений режим роботи дозатора, для якого як вихідні данні розглядалися напруга чи струм індуктора дозатора, частота та продуктивність дозування. Розрахункову область системи «індуктор – замкнений канал – магніт дозатора» із скінченно-елементним сітковим розбиттям представлено на рис. 2. Математична модель фізичних процесів, що розглядаються в цій роботі, включає в себе рівняння електромагнітного поля, гідродинаміки та теплопередачі.

Задача розрахунку електромагнітного поля вирішувалася без врахування електрорушійних сил за рахунок руху розплаву в магнітному полі, оскільки для робочого діапазону частот струму в каналі дозатора 100-400 Гц вони нехтовно малі відносно електрорушійних сил електромагнітної індукції. Прийняте спрощення дало можливість скористатися для моделювання електромагнітних процесів інтерфейсом "Магнітні поля" (The Magnetic Fields interface), особливістю якого в частотній області є застосування калібрувального перетворення відносно векторного магнітного потенціалу. Воно дає змогу виключити з розгляду скалярний електричний потенціал і тим самим скоротити кількість незалежних змінних системи рівнянь з чотирьох до трьох. Рівняння для розрахунку електромагнітного поля відносно отриманого внаслідок калібрувального перетворення векторного магнітного потенціалу $\mathbf{A}$ в загальному випадку має вигляд

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) + (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \mathbf{A} = \mathbf{J}_e, \quad (1)$$

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

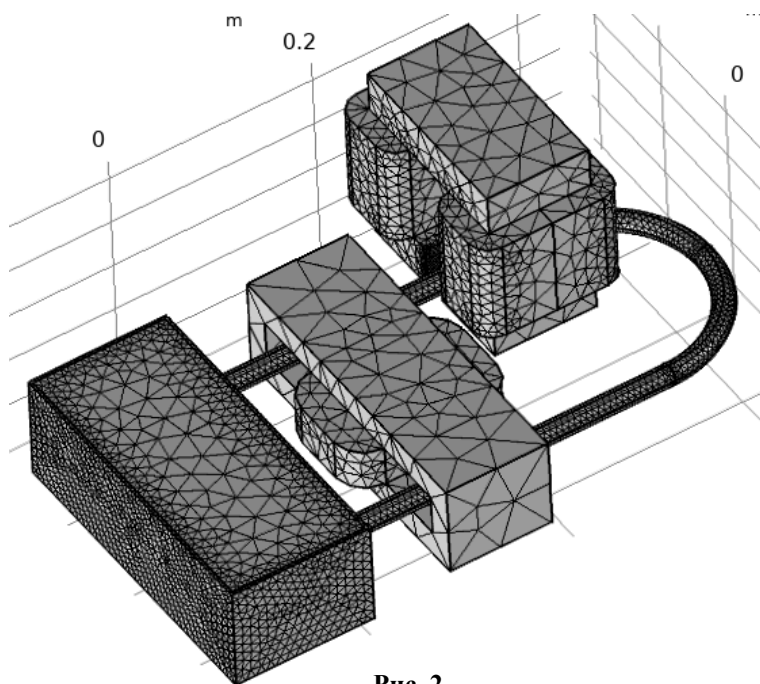


Рис. 2

Зазначений інтерфейс опціонально для багатовиткових котушок по результатам розрахунків, виходячи з положень теорії електричних кіл ($\dot{U} = \dot{I}R + j\omega\dot{\Psi}$, де $\dot{U}$, $\dot{I}$, $\dot{\Psi}$ – комплексні значення напруги, струму та потокозчеплення котушки, R – її опір), дає можливість за умови заданого струму в котушках визначати на них напругу, і, навпаки, за умови заданої напруги на котушках – визначати в них струм.

Необхідно зазначити, що мова йде про поняття електричної напруги, яке використовується в теорії електричних кіл та на практиці. Це варто уточнювати, оскільки в загальних рамках теоретичної електротехніки, як відомо [9], теорія електричних кіл та теорія електромагнітного поля використовують різні поняття електричної напруги, які радикально відрізняються

між собою. Нагадаємо, що в теорії електричних кіл напруга визначається як різниця скалярних електричних потенціалів, є однозначною величиною між двома довільними точками електричного кола, а сума напруг по замкненому контуру дорівнює нулю. В теорії електромагнітного поля напруга визначається як інтеграл напруженості електричного поля між двома точками, значення якого залежить від шляху інтегрування, а інтеграл по замкненому контуру в загальному випадку не дорівнює нулю.

Граничною умовою для електромагнітної задачі була умова магнітної ізоляції $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$, де $\mathbf{n}$ – вектор зовнішньої нормалі до зовнішніх границь розрахункової області (зовнішня область у вигляді прямокутного паралелепіпеду на рис. 2 не показана).

Електромагнітна задача вирішувалася в лінійній постановці з використанням постійного значення відносної магнітної проникності $\mu_r = \text{const}$ для шихтованих феромагнітних осердь та без врахування залежності питомої електропровідності σ від температури, оскільки температура каналу з рідким металом для усталеного режиму роботи електромагнітного дозатора змінюється несуттєво.

За результатами розрахунку визначалися середні за період об'ємні електромагнітні сили $\mathbf{f}$ в рідкому металі та питома потужність q від струмів в каналі дозатора, які використовувалися, відповідно, в гідродинамічній та тепловій задачах

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

$$q = 0,5 \mathbf{\dot{J}} \cdot \mathbf{\dot{J}}^* / \sigma, \quad (3)$$

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

Гідродинамічна задача розраховувалася для об'єму рідкого металу дозатора. Швидкість $\mathbf{u}$ рідкого металу визначалася шляхом рішення рівнянь Нав'є-Стокса для стаціонарної течії з використанням k - ε моделі турбулентності для розрахунку коефіцієнтів ефективної динамічної в'язкості

$$\rho_m (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (5)$$

де ρ_m – густина рідкого металу; p – тиск; η_{eff} – коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості металу; $\mathbf{f}$ – об'ємна електромагнітна сила в рідкому металі, обчислена за результатами розрахунку електромагнітної задачі.

Як фактор, що визначає основний рух рідкого металу в дозаторі, задавалася гранична умова виходу на вільній поверхні отвору насадка для формування циліндричних струменів рідкого металу з заданим значенням масової продуктивності дозатора G [кг/год]. Для отвору в дні робочого відсіку ванни з рідким металом, через який метал подається рідкометалевим насосом в дозатор, задавалася гранична умова входу з відповідним виходу значенням масової продуктивності. Граничні умови на стінках каналу та робочого відсіку ванни задавалися у вигляді логарифмічного профілю швидкості для приграничного шару. На верхній (вільній) поверхні рідкого металу у відсіку ванни приймалася умова ковзання за відсутності нормальної складової швидкості руху.

Теплова задача розраховувалася для об'єму рідкого металу, металевих стінок ванни та каналу дозатора. Для моделювання теплових процесів використовувалося стаціонарне рівняння теплопровідності з врахуванням тепломасопереносу за рахунок руху рідкого металу

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) + q, \quad (6)$$

де C_p – питома теплоємність; T – абсолютна температура; λ_{eff} – коефіцієнт ефективної теплопровідності; q – внутрішні джерела теплоти, обумовлені протіканням в рідкому металі та стінках каналу електричного струму, розподіл яких визначено за результатами розрахунку електромагнітної задачі.

Введення в рівняння (6) коефіцієнта ефективної теплопровідності дає можливість врахувати додаткову передачу теплоти за рахунок турбулентних пульсацій, що виникають за турбулентного руху розплаву. Під час розрахунків приймалося, що λ_{eff} перевищує молекулярне значення коефіцієнта теплопровідності для рідкого металу на порядок (в десять раз).

Питомий тепловий потік з поверхні дзеркала рідкого металу у ванні за рахунок випромінювання враховувався відповідно до загальновідомого виразу

$$P_{\text{rad}} = \xi \sigma_{SB} (T^4 - T_0^4), \quad (7)$$

де $\xi = 0,3$ – приведена ступінь чорноти поверхні розплаву; $\sigma_{SB} = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постійна Стефана-Больцмана; температура навколишнього середовища вважалася рівною $T_0 = 300$ К.

Додатково для цієї поверхні враховувалася втрата тепла за рахунок конвекційної тепловіддачі

$$P_{\text{conv}} = h(T - T_0), \quad (8)$$

де $h = 10$ Вт/(м²К) – коефіцієнт тепловіддачі (КТВ) для горизонтальної поверхні за природної конвекції.

Обране значення коефіцієнта тепловіддачі є близьким до верхньої межі діапазону значень 6-12 Вт/(м²К), який рекомендовано для розміщених в приміщеннях плоских поверхонь, теплоізованих вертикальних та горизонтальних трубопроводів за вільної конвекції (діючі в Україні СНиП 2.04.14-88. Додаток 9). Зазначимо, що для розрахункової оцінки теплового стану розплаву в каналі дозатора точність завдання значень КТВ не є принциповим моментом. Тому, в першому наближенні дане значення КТВ буде використовуватись і надалі в тепловій задачі під час визначення втрат тепла за рахунок вільної конвекції з усіх інших поверхонь.

Питомий тепловий потік до навколишнього середовища з теплоізованих поверхонь ванни та каналу дозатора з метою спрощення моделювання також визначався відповідно до виразу (8) шляхом введення ефективного коефіцієнта тепловіддачі h_{eff} , який інтегрально враховує тепловий опір

теплоізоляції та конвекційну тепловіддачу до навколишнього середовища. Такий підхід дає змогу, зокрема, уникнути «перемальовування» геометрії під час моделювання впливу товщини теплоізоляції на тепловий стан дозатора.

Значення ефективного коефіцієнта тепловіддачі для плоских поверхонь ванни дозатора визначалося у відповідності з виразом

$$h_{eff} = \left(\frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h} \right)^{-1}, \quad (9)$$

де δ_{is} і λ_{is} – товщина та коефіцієнт теплопровідності ізоляції.

Для визначення ефективного коефіцієнта тепловіддачі каналу використовувався приблизний вираз, який зі зростанням товщини циліндричної теплоізоляції враховує збільшення площі поперечного перетину теплоізоляції та поверхні тепловіддачі. В межах співвідношення зовнішнього та внутрішнього діаметрів теплоізоляції $d_2/d_1 < 2$ похибка цього виразу складає менше 1 %

$$h_{eff} \approx \left(\frac{(d_2 - d_1) \cdot d_1}{\lambda_{is} \cdot (d_2 + d_1)} + \frac{1}{h \cdot (d_2/d_1)} \right)^{-1}. \quad (10)$$

На рис. 3 представлено розраховані у відповідності з виразами (9), (10) залежності ефективного коефіцієнта тепловіддачі від товщини теплоізоляції для випадків плоских поверхонь

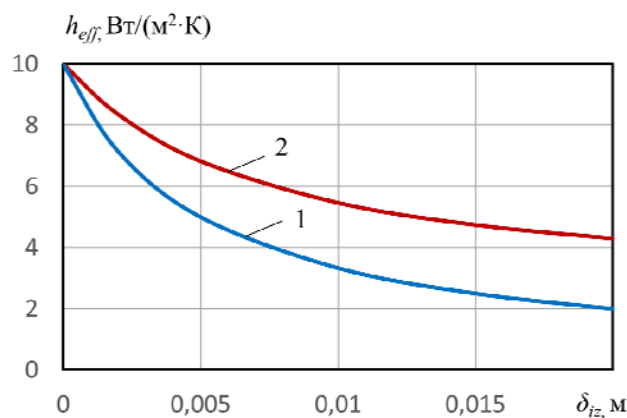


Рис. 3

та циліндричного каналу (крива 2). Залежності отримано для наступних вихідних даних: коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції (вати з базальтових волокон) $\lambda_{is} = 0,05$ Вт/(м·К), коефіцієнт тепловіддачі $h = 10$ Вт/(м²·К), діаметр каналу $d_1 = 0,02$ м. Для випадку циліндричного каналу зовнішній діаметр ізоляції визначався у відповідності до виразу $d_2 = d_1 + 2 \cdot \delta_{is}$.

Під час дослідження теплового стану каналу дозатора на теплоізолюваній поверхні дозуючого відсіку ванни постійно задавалося значення $h_{eff} = 2$ Вт/(м²·К), що відповідає товщині ізоляції для плоских стінок 20 мм. Температура розплаву на вході в робочий відсік ванни складала 600 К.

Результати комп'ютерного моделювання. В роботі представлено результати розрахункового дослідження конструкції електромагнітного дозатора дослідної МГД установки для виробництва свинцевого дробу з індуктивним наведенням струму в каналі. Площа поперечного перетину магнітного осердя індуктора складала $S = 50$ см², кількість витків обмотки – $w = 167$. Дослідження електромагнітного дозатора виконувалося в діапазоні частот 100...400 Гц за умови живлення індуктора напругою в межах від 0 до 380 В.

Для зазначених вище конструктивних параметрів індуктора дозатора значень максимальної напруги та мінімальної частоти його живлення максимальне середнє значення магнітної індукції в шихтованому феромагнітному осерді індуктора становить близько 1 Тл, що підтверджує прийнятність лінійної постановки електромагнітної задачі з заданим постійним значенням відносної магнітної проникності μ_r . Під час розрахунків її значення приймалося $\mu_r = 2000$. Значення питомої електропровідності рідкого металу та каналу дозатора в моделі приймалися постійними для температури 600 К (327 °С), яка незначно перевищує температуру плавлення свинцю (320 °С). Для розплаву свинцю задавалося значення $\sigma_{pb} = 0,85$ Ом⁻¹·м⁻¹, для нержавіючої сталі – $\sigma_{st} = 1,15$ Ом⁻¹·м⁻¹.

Задля перевірки адекватності розробленої математичної моделі електромагнітних процесів в дозаторі було виконано порівняння отриманих результатів розрахунку електромагнітної задачі з експериментальними даними. Експериментальні дослідження індуктора дозатора дослідної МГД установки проводились за відсутності у складі електромагнітної системи дозатора електромагніту постійного струму. Його відсутність враховувалося в моделі завданням для підобласті осердя електромагніту значення відносної магнітної проникності $\mu_r = 1$. В ході експериментальних досліджень вимірювалися значення струму I в індукторі та споживана їм активна потужність P для

діапазону частоти 100-300 Гц. Вимірювання проводилися за напруги $U = 393$ В (максимальна напруга перетворювача частоти) для порожнього каналу та за $U = 142$ В – для заповненого рідким металом каналу.

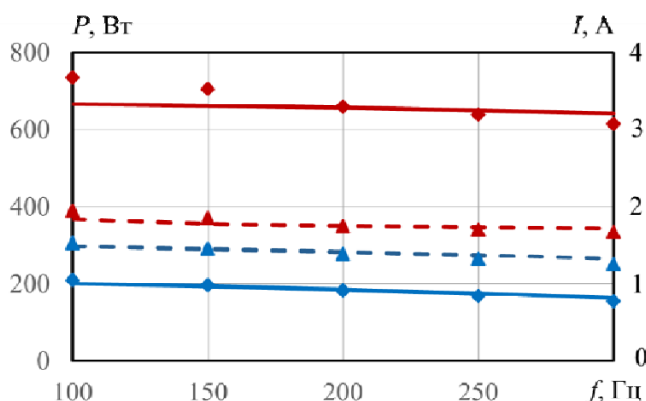


Рис. 4

Порівняння результатів експериментального та розрахункового досліджень демонструє їхній досить близький збіг для розглянутого діапазону частот як за наявності розплаву в каналі, так і за його відсутності, що свідчить не тільки про адекватність математичної моделі, а й про правильно задані в моделі електромагнітні властивості матеріалів.

Електромагнітні параметри та енергетичні характеристики системи «індуктор – замкнений канал – магніт дозатора». Необхідність визначення за результатами розрахунків електромагнітної задачі електромагнітних параметрів дозатора обумовлена можливістю спрощення

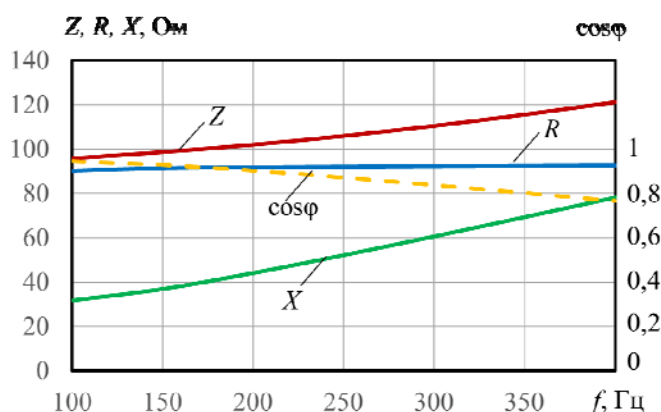


Рис. 5

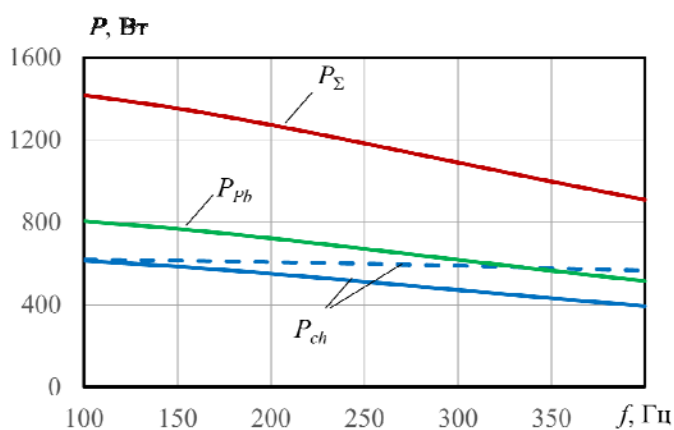


Рис. 6

На рис. 4 для порівняння представлено результати експериментального та розрахункового досліджень електромагнітної системи «індуктор – замкнений канал дозатора». Червоним кольором на малюнку позначено результати, що отримано для порожнього каналу за напруги на індукторі $U = 393$ В, синім – для заповненого рідким металом каналу з напругою індуктора $U = 142$ В. Суцільними лініями представлено розрахункові залежності потужності індуктора P , штриховими – струмів індуктора I . Експериментальні результати представлено у вигляді маркерів відповідних кольорів.

подальшого аналізу його енергетичних та технологічних характеристик. Залежність електромагнітних параметрів системи від частоти для заповненого розплавом каналу представлено на рис. 5. Зі зміною частоти активний опір системи R залишається практично незмінним. Це свідчить про те, що під час роботи електромагнітного дозатора на різних частотах з однаковим струмом індуктора буде забезпечуватися практично однакове тепловиділення в каналі з рідким металом. Реактивний опір X та, відповідно, повний опір Z системи зі зростанням частоти також зростають, а коефіцієнт потужності $\cos\phi$ падає.

На рис. 6 для напруги індуктора $U = 380$ В суцільними лініями представлено залежності потужності тепловиділень від наведеного індуктором струму в каналі з рідким металом від частоти. Окремо показано як загальні втрати в каналі P_{Σ} , так і втрати в рідкому металі P_{pb} та стінках каналу P_{ch} . Штриховою лінією показано втрати в порожньому каналі. Як і слідувало очікувати, виходячи з характеру зміни електромагнітних параметрів системи від частоти, у випадку сталої напруги живлення індуктора тепловиділення в заповненому каналі зі зростанням частоти суттєво падають. Рівень загальних

тепловиділень в порожньому каналі є значно нижчим та менш залежним від частоти, що дає змогу виконувати розігрів порожнього каналу перед його заповненням розплавом на будь-якій частоті. Найбільш зручно це робити на частоті, на якій планується робота дозатора.

За результатами розрахунків встановлено, що для заповненого каналу в розглянутому діапазоні частот частка струму в розплаві є постійною та складає близько 53 % від загального струму в каналі I_Σ . Співвідношення між загальним струмом в каналі та ампервитками індуктора також є практично постійним та становить приблизно $I_\Sigma/I \cdot w = 0,97$ (змінюється зі зростанням частоти від 0,965 до 0,975). Для порожнього каналу останнє співвідношення змінюється дещо в ширших межах $I_\Sigma/I \cdot w = 0,93 \div 0,98$. Таким чином, по значенню струму індуктора за відомої кількості витків індуктора w можливо досить точно визначати наведений струм в каналі.

Дослідження теплового стану замкненого каналу електромагнітного дозатора. Під час роботи дозатора тепловий стан каналу головним чином визначається потужністю джоулевих тепловиділень P_Σ від наведеного в ньому електричного струму I_Σ . На практиці традиційно прийнято в процесі дозування контролювати саме струм каналу, значення якого разом зі значенням струму електромагніту дозатора також визначають величину періодичного електромагнітного тиску в каналі дозатора. На рис. 7 для частот 100 Гц (штрихова крива) та 400 Гц (суцільна крива) представлено

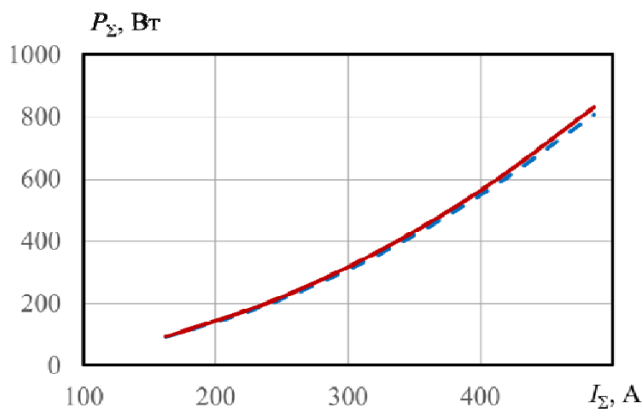


Рис. 7

залежності потужності тепловиділень P_Σ від струму I_Σ для заповненого рідким металом каналу. Діапазон представлених на рисунку значень струму каналу відповідає зміні струму індуктора в межах від 1 до 3 А. Як випливає з наведеного рисунка, значення потужності, що отримано для граничних значень робочого діапазону частоти дозування, практично співпадають. Це дає підставу стверджувати, що залежність потужності тепловиділень від струму каналу є однозначною технологічною характеристикою електромагнітного дозатора з індукційним введенням струму в канал для всього діапазону робочих частот.

В процесі роботи дозатора задля забезпечення рівня електромагнітних зусиль, який є достатнім для подрібнення струменю розплаву безпосередньо після витоку з насадка, значення струму в каналі зазвичай підтримують в межах 250-350 А. Для зазначеного робочого діапазону струмів потужність тепловиділення в каналі (рис. 7) змінюється приблизно від 200 до 430 Вт.

Окрім струму тепловий стан каналу визначають його теплоізоляція та наявність руху рідкого металу в каналі. Структура руху та його інтенсивність визначаються, в першу чергу, масовою продуктивністю дозування G та електромагнітними силами, що виникають в розплаві за рахунок взаємодії струму з власним магнітним полем та полем розсіювання індуктора. Продуктивність дозатора в залежності від розміру гранул змінюється в діапазоні від 100 до 300 кг/год.

Виконаний для випадку відсутності руху металу в каналі тепловий розрахунок показав, що за відсутності теплоізоляції каналу на його зовнішній поверхні усталене значення робочої температури каналу близько 600 К досягається за струму $I_\Sigma = 235 \text{ А}$ з потужністю тепловиділення в каналі $P_\Sigma = 189 \text{ Вт}$. Зазначений струм є меншим від робочих струмів дозатору, необхідних задля забезпечення достатніх електромагнітних зусиль для подрібнення струменів рідкого металу. Підняття струму до необхідного рівня та наявність теплоізоляції призводять до підвищення температури каналу. Рух розплаву в каналі за рахунок більш низької температури рідкого металу у ванні дозатора навпаки сприяє зниженню температури каналу.

На рис. 8 представлено структуру руху металу та розподіл температури в ньому за умови загального струму в каналі $I_\Sigma = 300 \text{ А}$ з потужністю тепловиділення $P_\Sigma = 307 \text{ Вт}$, масової продуктивності дозування $G = 200 \text{ кг/год}$ та товщини теплоізоляції циліндричного каналу $\delta_{is} = 2 \text{ мм}$, що еквівалентно значенню ефективного коефіцієнта тепловіддачі на його поверхні $h_{eff} = 8,35 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ (рис. 3). Для розглянутого конструктивного рішення та режиму роботи дозатора маємо температуру металу на виході з насадка $T_n = 606 \text{ К}$. Перегрів по відношенню до температури металу на вході в канал $T_k = 586 \text{ К}$ становить $\Delta T = T_n - T_k = 606 - 586 = 20 \text{ К}$, що відповідає гранично

допустимому перегріву відносно температури плавлення з точки зору забезпечення стабільного формоутворення та ефективного охолодження дробу.

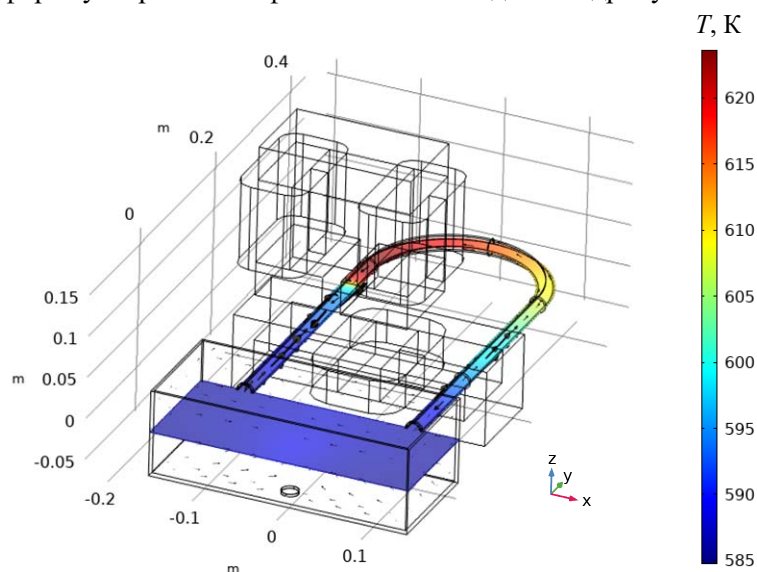


Рис. 8

струм 350 А є взагалі неприпустимим.

Додатковою особливістю теплового стану дозатора, як впливає з рис. 8, є значний градієнт температури вздовж каналу в зоні насадка для формування струменя металу. Несиметричність положення зазначеної зони відносно двох входів каналу призводить до різних витрат металу через них. Зазначимо, що наявність на рисунку стрілок з протилежним напрямом руху металу в каналі на шляхах до насадка з обох боків обумовлена виникненням локальних вихрових течій в зоні індуктора при тому, що загальний рух в каналі здійснюється від обох входів в напрямі до насадка. Витрата металу через ближній до насадка вхід становить близько 70 % від загальної продуктивності дозатору, через дальній – 30 %. Враховуючи меншу витрату та довшу відстань, метал на шляху від дальнього входу до насадка нагрівається до вищої температури, внаслідок чого біля насадка формується зона розплаву зі значним градієнтом температури. Це може негативно позначатися під час роботи дозатора з декількома насадками, розплав на виході з яких буде мати різну температуру.

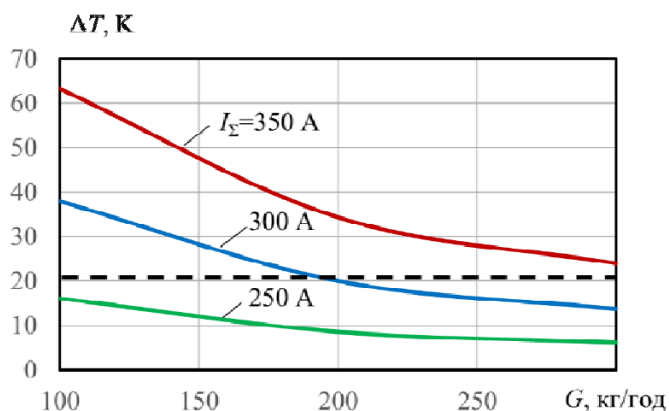


Рис. 9

В рамках даної роботи обмежимося ілюстрацією позитивних змін теплового стану каналу, що з'являються внаслідок створення в ньому однонаправленого транзитного руху металу. На рис. 10 представлено структуру руху металу та розподіл температури в ньому за умови створення в каналі однонаправленого транзитного руху. Транзитний рух в каналі дозатора моделювався шляхом введення для дальнього від зони насадків входу каналу дозатора відповідної граничної умови з заданим значенням масової витрати транзитного руху G_{tr} , значення якої під час розрахунку

Зрозуміло, що зі збільшенням струму каналу чи зменшенням масової продуктивності дозування гранично допустимий перегрів буде перевищено. На рис. 9 показано перегрів розплаву на виході з насадка відносно температури металу на вході в канал в залежності від продуктивності дозатора G для трьох фіксованих значень струму каналу. Штриховою лінією на малюнку показано гранично допустимий перегрів у 20 К відносно температури плавлення. Лише струм $I_{\Sigma} = 250$ А відповідає вимозі неперевикнення граничного перегріву для всього розглянутого діапазону продуктивності дозатора. Струм у 300 А допустимий лише для діапазону продуктивності 200-300 кг/год, а

Серед рішень, що будуть сприяти відповідності теплового стану каналу вимогам по допустимому перегріву металу та близьким значенням температури в зоні насадків, можна запропонувати створення однонаправленого транзитного руху з напрямом в каналі від ближнього до дальнього відносно насадків входу. Такий рух в каналі дозатора може бути забезпечений різними конструктивними засобами, вибір найбільш раціонального з яких може бути зроблений за допомогою їхнього порівняльного аналізу на основі математичного моделювання чи експериментальних досліджень.

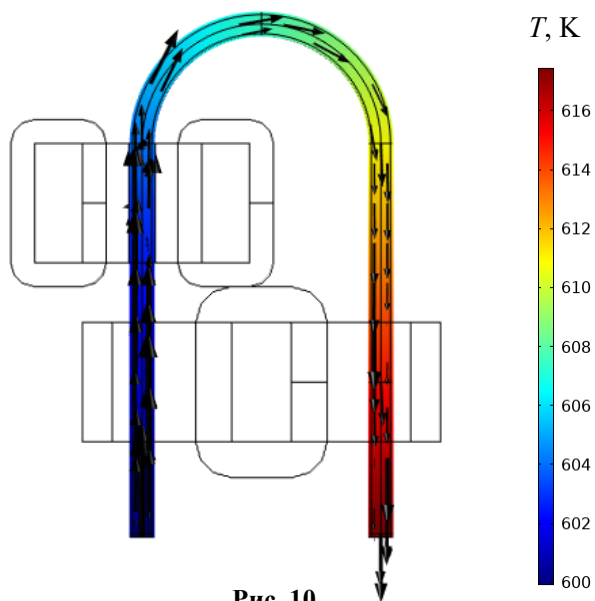


Рис. 10

гідродинамічної задачі приймалося 200 кг/год. На ближньому до насадків вході каналу вибором відповідної граничної умови забезпечувалася масова витрата, значення якої визначається сумою масових витрат на дозування та транзитний рух. Рух розплаву в ванні дозатора за даної постановки гідродинамічної задачі не розглядався. В тепловій задачі температура розплаву на ближньому до насадків вході в канал задавалася 600 К. Представлені на рис. 10 розрахункові результати отримано за тих же вихідних даних, окрім структури руху розплаву, що і результати, представлені на рис. 8, а саме: струм в каналі $I_{\Sigma} = 300$ А з потужністю тепловиділення $P_{\Sigma} = 307$ Вт, масова продуктивність дозування $G = 200$ кг/год та ефективний коефіцієнт тепловіддачі $h_{eff} = 8,35$ Вт/(м²·К). Зазначимо, що за таких вихідних даних загальна масова витрата розплаву через ближній до насадків вхід в канал становила 400 кг/год.

Як видно з рис. 10, навіть за наявності досить слабого транзитного руху в каналі дозатора (приблизно 20 л/год розплаву свинцю) перегрів металу на виході з насадка по відношенню до його температури на вході в канал впав з 20 до 3 К. При тому по довжині каналу в зоні насадка відсутні значні градієнти температури. Зі збільшенням інтенсивності транзитного руху зазначений перегрів буде ще зменшуватися, що допускає можливість посилення теплоізоляції каналу, що, в свою чергу, буде сприяти підвищенню енергетичної ефективності установки в цілому за рахунок зменшення теплових втрат каналу дозатора.

Висновки.

1. Для МГД установки з виробництва свинцевого дробу розроблено математичну модель взаємопов'язаних електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів в електромагнітному дозаторі з індукційним наведенням струму в каналі. Адекватність математичної моделі електромагнітних процесів підтверджена шляхом порівняння з експериментальними даними.
2. Потужність тепловиділень в заповненому рідким металом каналі однозначно визначається значенням його струму та не залежить від частоти роботи дозатора з індукційним введенням струму в канал.
3. Величини струму каналу, необхідні задля забезпечення достатніх електромагнітних зусиль для подрібнення струменів рідкого металу, можуть призводити до суттєвого перегріву металу на виході з насадка відносно температури плавлення, що небажано з точки зору забезпечення стабільного формоутворення та ефективного охолодження дробу.
4. Задля зниження перегріву розплаву запропоновано створити однонаправлений транзитний рух в каналі з напрямом від ближнього до дальнього відносно насадка входу.

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 набоїв».

1. Волотівський П.Б., Гончаров О.В., Давиденко В.М., Мамонова Н.Л. Способи та засоби протидії БпЛА, їхні переваги та недоліки. Погляди щодо напрямів їх розвитку. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2024. Вип. № 20 (27). С. 52-62. DOI: <https://doi.org/10.54858/dndia.2024-20-7>.
2. Приходько Р. Дрон із дробовиком 30 ОМБр знищив понад 20 російських БПЛА. URL: <https://military.com/uk/news/dron-iz-drobovykom-30-ombr-znyshhyv-ponad-20-rosijskyh-bpla/> (дата звернення 30.09.2025).
3. Шумлянський Д. У ССО проаналізували використання Росією дробовиків для захисту від FPV. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/vykorystannya-rosiyeu-drobovykiv-dlya-zahystu-vid-fpv/> (дата звернення 30.09.2025).

4. Nagy K. Ukrainische Analyse des russischen Einsatzes von Flinten zur Drohnenabwehr. URL: <https://www.hartpunkt.de/ukrainische-analyse-des-russischen-einsatzes-von-flinten-zur-drohnenabwehr/> (дата звернення 30.09.2025).
5. Дріб мисливський, спортивний та картеч. URL: <https://geneta.com.ua/ua/drob-okhotnichya-sportivnaya-i-kartech/> (дата звернення 30.09.2025).
6. Шидловский А.К., Гориславец Ю.М., Глухенький А.И. Электромагнитные системы для дозирования жидких металлов. К.: ИЕД НАН Украины, 2011. 208 с.
7. Глухенький О.І., Гориславец Ю.М., Токаревський А.В. Тривимірне моделювання системи "індукційна канална піч – рідкометалевий насос" установки для лиття металевих гранул. *Технічна електродинаміка*. 2015. №3. С. 52-59.
8. Comsol Multiphysics. URL: <https://www.comsol.com/> (дата звернення 30.09.2025).
9. International standard IEC 60050 International Electrotechnical Vocabulary. Part 121, 131. URL: <http://www.electropedia.org/> (дата звернення 30.09.2025).

MULTIPHYSICS MODELING OF ELECTROMAGNETIC DOSER INSTALLATION FOR LEAD PELLETS PRODUCTION

A.F. Zharkin, O.I. Bondar, O.I. Hlukhenkyi, V.I. Zaliznyi
 Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
 56, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine,
 e-mail: gai56@ied.org.ua.

A three-dimensional mathematical model of interconnected electromagnetic, hydrodynamic and thermal processes has been developed for an electromagnetic doser with induction current supply to the channel. By comparing with experimental data obtained for a prototype of a MHD installation for the production of lead pellets, a mathematical model of electromagnetic processes in the dosing unit was validated. Using mathematical modeling, physical processes in the system " dosing unit inductor - short-circuited channel with liquid metal - dosing unit magnet" were investigated. The electromagnetic and energy parameters of the dosing unit were determined, and the features of the thermal state of the liquid metal in its channel were established. Recommendations were formulated to reduce metal overheating in the channel during feeder operation. References 9, figures 10.

Keywords: MHD installation, electromagnetic dosing unit, multiphysics modeling, metal overheating, transit motion.

1. Volotivsky P.B., Honcharov O.V., Davidenko V.M., Mamonova N.M. Methods and means of countering UAVs, their advantages and disadvantages. Perspectives on effective solutions to the problem of countering UAVs. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovoho-doslidnoho institutu aviacii*. 2024. No 20 (27). Pp. 52-62. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.54858/dndia.2024-20-7>.
2. Prikhodko R. 30th Brigade's shotgun drone destroyed over 20 Russian UAVs. URL: <https://military.com/uk/news/dron-iz-drobovykom-30-ombr-znyshhyv-ponad-20-rosijskyh-bpla/> (accessed at 30.09.2025). (Ukr)
3. Shumlyansky D. Ukrainian SOF analyzes Russia's use of shotguns to protect against FPV drones. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/vykorystannya-rosiyye-drobovykiv-dlya-zahystu-vid-fpv/> (accessed at 30.09.2025). (Ukr)
4. Nagy K. Ukrainian analysis of the Russian use of shotguns for drone defense. URL: <https://www.hartpunkt.de/ukrainische-analyse-des-russischen-einsatzes-von-flinten-zur-drohnenabwehr/> (accessed at 09.30.2025).
5. Hunting shot, sports shot and buckshot. URL: <https://geneta.com.ua/ua/drob-okhotnichya-sportivnaya-i-kartech/> (accessed at 30.09.2025). (Ukr)
6. 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)
7. Glukhenkyi O.I., Goryslavets Yu.M., Tokarevskyi A.V. Three-dimensional simulation of system "induction channel furnace – liquid metal pump" of installation for production of metal granules". *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 3. Pp. 52-59. (Ukr).
8. Comsol Multiphysics. URL: <https://www.comsol.com/> (accessed at 30.09.2025).
9. International standard IEC 60050 International Electrotechnical Vocabulary, Part 121, 131. URL: <http://www.electropedia.org/> (accessed at 30.09.2025).

Надійшла 14.10.2025
 Прийнята 26.11.2025