

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

СЕМЕНКО АНАСТАСІЯ ЮРІЇВНА

Семенко

УДК 537.84:669.18:621.746.5:66.028

**РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОГО
УПРАВЛІННЯ РОБОЧИМИ ПАРАМЕТРАМИ
ЛИВАРНИХ МАГНІТОДИНАМІЧНИХ УСТАНОВОК**

Спеціальність 05.16.04 – «Ливарне виробництво»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України, м. Київ

Науковий керівник: кандидат технічних наук
Горюк Максим Степанович,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів
НАН України (м. Київ),
заступник завідувача відділу магнітної гідродинаміки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лисенко Тетяна Володимирівна,
Одеський національний політехнічний університет
Міністерства освіти і науки України (м. Одеса),
завідувач кафедри технології
та управління ливарними процесами

доктор технічних наук, професор
Акімов Олег Вікторович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерства освіти і науки України (м. Харків),
завідувач кафедри ливарного виробництва

Захист відбудеться «12» грудня 2019 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01 у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України за адресою: 03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 34/1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України за адресою: 03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 34/1.

Автореферат розісланий « 5 » листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01
доктор технічних наук,



М.І. Тарасевич

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Підвищення якості виробів з алюмінієвих розплавів нерозривно пов'язано з можливостями заливально-дозувального обладнання, що застосовується у технологічних процесах ливарного виробництва. Багаторічна практика експлуатації такого устаткування показала, що високі результати можуть бути досягнуті при застосуванні багатофункціональних ливарних магнітодинамічних установок (МДУ), що забезпечують, разом з якісним заливанням розплавів, доведення розплаву до необхідного хімічного складу, позапічну обробку перед заливанням в ливарну форму або інший металоприймач в період міксерування.

В опублікованих за останні два десятиріччя статтях і патентах на винаходи, присвячених вирішенню вказаної проблеми, наведені, в основному, нові розробки по створенню автоматизованого ливарного устаткування для дозованого розливання металевих розплавів у разові та постійні ливарні форми. Разом з тим публікації з питань автоматизації позапічної обробки розплаву і доведення його до необхідних кондицій перед дозованою заливкою в ливарні форми практично відсутні.

Приготування сплаву, його рафінування і позапічна обробка є одним з найважливіших складових технологічного процесу отримання виливків і литих заготівок. В даний час досліджуються можливості реалізації позапічної електрофізичної обробки розплаву, засновані на реалізації ефекту фізичного модифікування до- і заевтектичних алюмінієвих сплавів за рахунок електромагнітної дії. Добрі результати застосування комплексу вищезгаданих технологій дозволили трансформувати МДУ в сучасний універсальний агрегат, який знайшов своє застосування в дослідницьких та промислових цілях (зокрема, в Нідерландах, Республіці Корея, Великій Британії).

Разом з удосконаленням магнітодинамічного ливарного устаткування, отримали подальший розвиток і практичне застосування функціональні можливості МДУ: регульований індукційний нагрів розплаву, електромагнітне безконтактне кероване перемішування і контрольоване розливання сплавів. Відповідно зростає актуальність проблеми реалізації безперервного контролю та управління основними керуючими параметрами такого обладнання (маси, температури, витрати розплаву). Вирішення цієї проблеми дозволить поліпшити відтворюваність результатів і ефективність позапічної обробки розплаву, оптимізувати режими роботи такого устаткування, а також знизити питомі енерговитрати на тонну виходу придатного лиття, дозволить підвищити конкурентоспроможність створюваного багатофункціонального ливарного устаткування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України відповідно до планів науково-дослідних робіт у рамках тем НДР відомчого замовлення: Ш-16-12-625 «Розробка нових технологічних процесів одержання високоякісних сплавів, у тому числі спеціальних, і литих заготівок з використанням сучасних систем управління, концентрованих джерел нагріву та електромагнітних впливів при обробці і кристалізації металу» (№ держреєстрації 0112U001685, 2012-2016 рр.); Ш-14-14-649 «Розробка наукових основ створення нового покоління магнітодинамічних установок для алюмінієвих сплавів та підвищення при їх використанні ефектив-

ності процесів лиття» (№ держреєстрації 0114U000327, 2014-2016 рр.); Ш-09-17-671 «Розробка наукових основ створення нових високоефективних мультифункціональних магнітодинамічних проміжних ковшів для процесів безперервного лиття» (№ держреєстрації 0117U002689, 2017-2019 рр.); Ш-17-12-626 «Дослідження процесів тепломасопереносу, твердіння, деформації та структуроутворення металевої стрічки при литті-прокатуванні» (№ держреєстрації 0112U001463, 2012-2016 рр.).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є створення наукових і технологічних засад сучасних систем управління основними робочими параметрами ливарного магнітодинамічного обладнання для підвищення його ефективності та поліпшення техніко-економічних показників процесу одержання литих заготовок та виливків з алюмінієвих сплавів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

1. Систематизувати дані щодо експлуатації МДУ та оцінити сучасний рівень їх конкурентоспроможності у порівнянні з ливарно-металургійним обладнанням аналогічного технологічного призначення.

2. Ідентифікувати основні проблеми роботи МДУ, що пов'язані з особливостями їх конструкції та впливають на ефективність реалізації технологічних процесів і комплексів ливарного обладнання.

3. Адаптувати існуючі або розробити нові методики для дослідження основних технічних параметрів МДУ при роботі в різних технологічних режимах приготування та розливання алюмінієвих сплавів (як окремих операцій, так і їх комплексу).

4. З використанням комплексних досліджень на моделях та в умовах натурального експерименту, вивчити особливості протікання електричних, електромагнітних, теплових, гідродинамічних процесів у МДУ для алюмінієвих сплавів, встановити існуючі взаємозалежності і раціональні інтервали варіювання основних параметрів такого обладнання.

5. На основі отриманих експериментальних даних, перевірити доцільність запропонованих концептуальних підходів і адекватність розроблених моделей. Запропонувати принципові рішення щодо розробки новітньої системи автоматичного управління (САУ) роботою МДУ для алюмінієвих сплавів, забезпечити її апаратне втілення та інтеграцію до затребуваних ливарних технологій.

6. Перевірити на дослідній МДУ ефективність запропонованих заходів та розроблених рекомендацій.

Об'єкт дослідження. Процеси управління електромагнітними характеристиками багатофункціонального ливарного магнітодинамічного обладнання.

Предмет дослідження. Технологічні параметри, що чинять вплив на ефективність роботи МДУ.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач і отримання основних результатів дисертаційної роботи були використані аналітичні та експериментальні методи досліджень. За допомогою математичного моделювання досліджувались зміни основних параметрів від режимів роботи МДУ: швидкість створення електромагнітних сил у МДУ залежно від включення систем управління; швидкість зміни температури розплаву залежно від зміни режимів роботи індукторів; динаміка

руху розплаву залежно від зміни параметрів живлення електромагніта та/або індукторів; вплив складової струму та індукції на створювану електромагнітну силу; динаміка зміни гідродинамічних характеристик розплаву при зміні параметрів роботи МДУ в різних режимах. Фізичне моделювання було застосоване для вивчення процесу дозування розплаву з МДУ. Для дослідження потужності теплових втрат МДУ використовувались розрахункові та експериментальні методи.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше при реалізації процесів приготування та розливання алюмінієвих сплавів у МДУ оцінено обсяги перетворення електромагнітної енергії в теплову (65-80%) та гідродинамічну складову (8-11%), що стало можливим завдяки вивченню в реальному масштабі часу силової електромагнітної взаємодії рідкометалевого струмонесучого витка з зовнішнім магнітним полем електромагніту.

2. Вперше при приготуванні та розливанні алюмінієвих сплавів у МДУ встановлено вплив на технологічні характеристики, а саме – створювані електромагнітний тиск, гідравлічний напір та масову витрату при розливанні – перерозподілу енергії між ефективною електромагнітною силою і силою реакції з конструкцією МДУ, що є безповоротними втратами енергії та в абсолютному вимірі складає 5-6%.

3. Отримала подальший розвиток теорія ливарних магнітодинамічних пристроїв, зокрема, вперше при приготуванні та розливанні алюмінієвих сплавів встановлені особливості взаємодії змінних електричних та магнітних полів у металевому розплаві в робочій зоні та каналах МДУ, які полягають у відповідному співвідношенні їх геометрії, конструкції електромагнітних систем, щільності електричного струму в розплаві, індукції магнітного поля та результуючого розподілу об'ємних електромагнітних сил.

4. Вперше з використанням фізичного моделювання встановлено вплив пульсацій струменя на процес розливання металу з МДУ. Визначено раціональний інтервал співвідношення маси розливаної порції металу та миттєвого значення масової витрати при її розливанні – (2,20-2,25). Це дозволяє за рахунок зменшення амплітуди таких пульсацій мінімізувати їх вплив на точність дозування, особливо малих порцій розплаву (маса 1,5-3 кг) – похибка дозування не перевищує 1,5% від маси дози, а також контролювати масову витрату розплаву при розливанні шляхом динамічного управління параметрами живлення електромагнітних систем МДУ.

5. Вперше на основі результатів інженерних розрахунків, моделювання та натурних досліджень розроблено новий принцип управління витратними характеристиками магнітодинамічного обладнання, який ґрунтується на застосуванні інтегрованої ваговиміральної системи (ІВВС), та запропоновано відповідну САУ МДУ.

Практичне значення отриманих результатів. На підставі отриманих теоретичних і експериментальних результатів:

- забезпечено заощадження енергетичних витрат роботи МДУ при приготуванні та розливанні алюмінієвих сплавів завдяки: оцінці перерозподілу енергії силових взаємодій МДУ між ефективно використаною та безповоротно втраченою; контролю за станом індукційного каналу МДУ та її тепловою роботою; визначенню і дотриманню раціональних параметрів живлення електромагнітних систем МДУ;

- розроблено принципову схему САУ МДУ на основі безперервного контролю за допомогою ІВВС динамічних характеристик процесу лиття з використанням магнітодинамічного обладнання;
- розроблені наукові підходи та технічні засоби їх реалізації для підвищення точності дозування алюмінієвого розплаву з МДУ, особливо малими порціями (1,5-3 кг) за рахунок встановлення раціональних параметрів електричного живлення електромагнітних систем і застосування розроблених підходів та засобів управління, з метою запобігання пульсацій струменя рідкого металу;
- удосконалено методику розрахунку магнітодинамічних ливарно-металургійних агрегатів як комплексних електромагнітних систем, що дає змогу проводити розробки нових зразків такого обладнання, систем живлення та управління ним.

Особистий внесок здобувача. Наукові та практичні результати роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно або у співавторстві. Внесок здобувача в роботах, що опубліковані у співавторстві, полягає в:

- аналізі та систематизації існуючих способів контролю та управління технологічними процесами обробки та розливання алюмінієвих сплавів магнітодинамічними установками для визначення та аналізу чинників, що знижують ефективність роботи ливарних МДУ [1, 3, 4];
- проведенні комплексу експериментальних досліджень залежностей експлуатаційних та технологічних параметрів роботи МДУ у залежності від режимів та параметрів роботи електромагнітних систем МДУ (індукторів та електромагніту) [5];
- проведенні експериментальних досліджень на математичних та фізичних моделях, аналітичній обробці експериментальних даних, зокрема, щодо інтегрованих ваговимірювальних систем та пружино-тензометричних вагових пристроїв для ливарних МДУ [5, 7, 9];
- проведенні експериментальних досліджень на фізичній моделі заливальної установки з вагодозувальним жолобом традиційної конструкції та розробці нового технічного рішення, що дозволяє спростити конструкцію МДУ та позитивно впливає на собівартість ливарної продукції, забезпечує економічний ефект при впровадженні її у виробництво [5, 9];
- проведенні комплексу натурних експериментальних досліджень на діючій МДУ, математичній обробці експериментальних даних та залежностей силових пндеромоторних взаємодій [5, 8, 24].

Апробація роботи. Основні положення та результати роботи повідомлені й обговорені на: Міжнародній науково-практичній виставці-конференції «Литво» (м. Запоріжжя, 2014-2019 рр.); 8-й Міжнародній конференції з електромагнітної обробки матеріалів «ЕРМ-2015» (м. Канни, Франція, 2015 р.); 10-й Міжнародній конференції РАМІР «Фундаментальна та прикладна магнітна гідродинаміка» (м. Кальярі, Італія, 2016 р.); 6-й Міжнародній конференції «Космічні технології: сьогодні та майбутнє» (м. Дніпро, 2017р.); 9-й Міжнародній конференції молодих вчених «Зварювання та суміжні технології» (м. Київ, 2017 р.); VII Науково-практичній конференції молодих вчених України (2018 р., м. Київ).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 24 наукові праці, у тому числі: 9 – статей у наукових фахових виданнях, затверджених ДАК МОН України, 1 стаття, що індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus; 12 доповідей у збірках наукових праць міжнародних конференцій; 1 тези доповідей на науково-практичній конференції; 1 патент України.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (86 найменувань) та 2 додатків. Повний обсяг дисертації – 171 сторінка, обсяг основної частини – 125 сторінок. У розділах дисертації 37 рисунків і 15 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показано актуальність теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і задачі досліджень, представлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також наведено дані про апробацію роботи та публікацію її основних положень.

Перший розділ присвячено детальному теоретичному аналізу існуючого технологічного обладнання для приготування та розливання алюмінієвих сплавів. Розглянуто проблеми та основні вимоги створення сучасного конкурентоспроможного ливарного магнітодинамічного обладнання. Проведено систематизацію існуючих способів контролю та управління технологічними процесами обробки та розливання у магнітодинамічній установці (МДУ). Проаналізовано результати досліджень та науково-технічних розробок, що були проведені у ФТІМС НАН України та направлені на удосконалення розроблених конкурентоспроможних на світовому ринку багатофункціональних електротехнологічних установок типу МДН-6А для виготовлення та електромагнітного розливання алюмінієвих сплавів, а також супутніх технологій обробки та розливання таких сплавів.

Проведено аналіз літературних джерел та аналогічних до МДУ за технологічними можливостями агрегатів, що застосовуються у світі показав, що для забезпечення сучасного рівня конкурентоспроможності МДУ для алюмінієвих сплавів необхідно здійснити ряд технологічних та функціональних удосконалень.

За допомогою проведеного аналізу було визначено та сформульовано мету та задачі дослідження.

У другому розділі наведено методичне забезпечення для дослідження керуючих параметрів МДУ.

Структурно-функціональна схема дослідної магнітовагової установки, основним елементом якої є МДН-6А, що оснащена системою контролю температури, маси та масової витрати відповідно до керуючих параметрів електромагнітних систем, наведена на рис. 1. Описано основні режими її роботи, комплексну систему автоматичного управління процесами приготування, обробки та дозованого розливання алюмінієвих розплавів з МДУ.

За допомогою установки МДН-6А можуть бути реалізовані наступні режими заливання сплаву в ливарні форми:

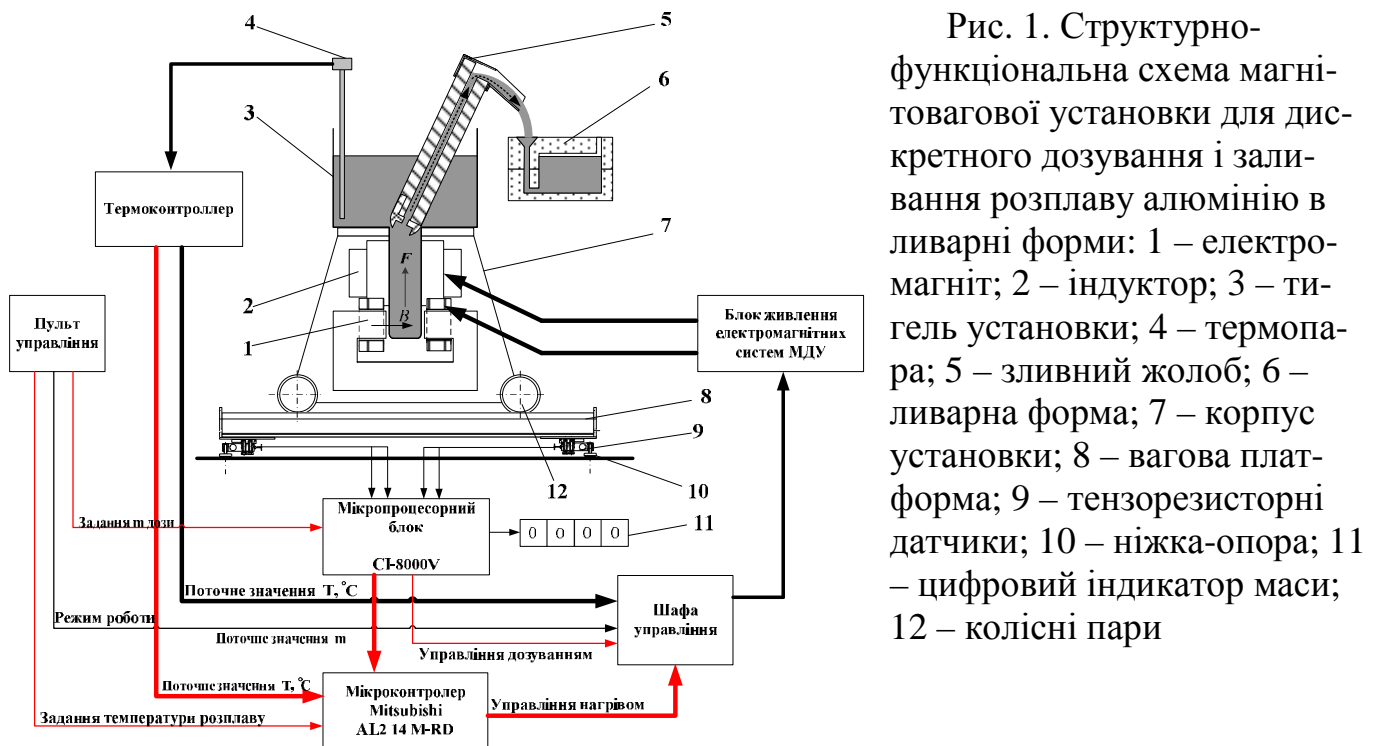
1– традиційний режим заливання при постійній витраті розплаву з введенням упередження в програму дозування;

2– двостадійний режим заливання з доливанням розплаву при зменшеній витраті у вихідній фазі дозування;

3– режим дозування і заливання при постійній витраті розплаву з гальмуванням у вихідній фазі дозування;

4– режим дозування і заливання з доливанням розплаву при зменшеній витраті і гальмуванні у вихідній фазі дозування.

В базовому варіанті системи автоматичного управління закладено два основні режими роботи: режим нагріву і зберігання та режим розливання. Технічні характеристики установки наведені у табл. 1.



Таблиця 1

Основні технічні характеристики МДН-6А

Місткість по алюмінієвому розплаву, кг	60-630
Максимальний електромагнітний тиск, кПа	25-30 (1200 мм алюмінієвого стовпа)
Швидкість потоку, кг/с	0,3-10
Швидкість нагрівання, °С/хв.	3-9
Температура розплаву, °С	600-850
Спосіб дозування:	за часом, об'ємом, вагою, витратою
Маса дози, кг	1-400
Похибка дозування, %	2±0,5 (для доз 1-50кг)

На першому етапі, для комплексного аналізу взаємозв'язку технологічних та експлуатаційних параметрів МДУ розроблено методику експериментального дослідження залежностей електромагнітних силових взаємодій МДН-6А (рис. 2) із використанням інтегрованої ваговиміральної системи (ІВВС), що безпосередньо входить до її складу.

В даному дослідженні ІВВС використовувалась як пристрій для вимірювання та контролю силових електромагнітних взаємодій індукованих в Ш-подібному каналі установки струмів підвищеної щільності, зовнішнього магнітного поля, електромагнітних сил в робочій зоні з електромагнітними системами МДУ.

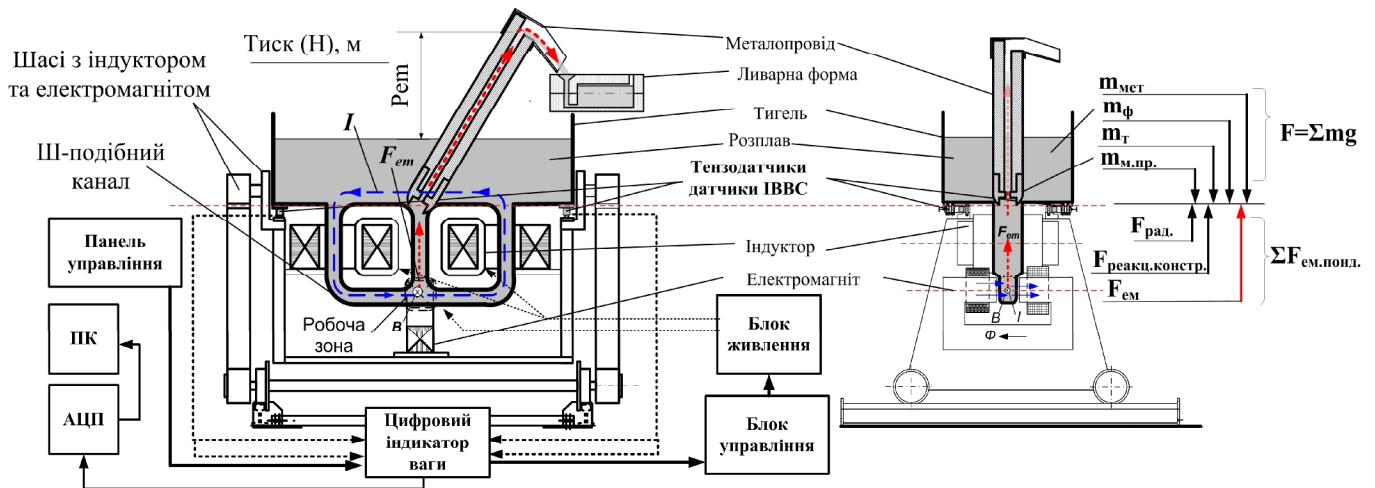


Рис. 2. Структурно-функціональна схема МДУ з ІВВС

За допомогою розробленої методики необхідно було:

- вивчити можливості реєстрації, контролю та вимірювання технологічних параметрів роботи МДУ, встановити закономірності математичного характеру основних експлуатаційних характеристик роботи МДУ від параметрів роботи її електромагнітних систем;

- визначити основні показники ефективності роботи існуючого МГД-обладнання, встановити ролі, величини та характерні залежності впливу параметрів індукованих в Ш-подібному каналі МДУ електричних струмів, електромагнітних сил і взаємодій на їх основі, при створенні електромагнітного тиску та управління його параметрами.

Далі в роботі для розрахунку основних електричних параметрів електромагнітних систем установки МДН-6А для алюмінієвих сплавів та у подальшому пов'язаних з ними основних технологічних характеристик і режимів роботи обладнання, було адаптовано методику розрахунку магнітодинамічної установки для чавуну МДН-6ч-3,0-1, розроблену у відділі магнітної гідродинаміки ФТІМС НАН України. В її основі лежить стандартний розрахунок індукційних каналних пристроїв, який доповнено у зв'язку з більшою кількістю електромагнітних систем МДУ, порівняно з індукційними каналними агрегатами, та необхідністю врахувати їх взаємний вплив.

З метою вибору раціональних техніко-економічних показників МДУ з багат шаровою футеровкою теплові втрати в даній роботі було досліджено двома методами: розрахунковим та експериментальним.

Спочатку теплові втрати було розраховано. Це обґрунтовано тим, що розрахунок дозволить встановити температурний режим роботи кожного шару футеровки МДУ, що дозволить вибирати ефективні вогнетривкі та теплоізоляційні матеріали, а також визначати товщину шарів. Наступна частина досліджень теплової роботи полягала в розробці раціонального експериментального методу визначення потужності теплових втрат у діючій установці МДН-6А, що містить рідкий алюмінієвий сплав.

Ідея методу полягає у використанні наявної в схемі управління установкою МДН-6А двопозиційної системи регулювання температури. Оскільки різниця $t_{\max} - t_{\min}$ зазвичай не перевищує 15-20 °С та задається автоматично через відповідні мікроконтролери в САУ, то прийнято, що зміна температури між нижньою і верхньою межами в даному разі інтегрально не впливає на потужність тепловтрат.

В ході роботи необхідно було зареєструвати проміжки часу: $t_1, t_2 - t_1, t_3 - t_2, \dots, t_n - t_{n-1}$ за умови, що n – число, яке відповідає завершенню одного повного циклу «нагрівання-охолодження». Одночасно реєструємо значення активної потужності P_1, P_2, \dots, P_n відповідне кожному з цих інтервалів.

З метою вивчення залежностей витратних характеристик у різних режимах роботи МДУ від напруги, що подається, розроблено та описано методику експериментальних досліджень на фізичній моделі заливальної установки з вагодозуючим похилим зливним жолобом традиційної конструкції, оснащеним тензOMETричним датчиком (рис. 3).

Розроблено нове технічне рішення для заливальної установки з вагодозуючим похилим жолобом традиційної конструкції, що ґрунтується на передачі електромагнітним способом сили, пропорційної миттєвому значенню маси розплаву на жолобі.

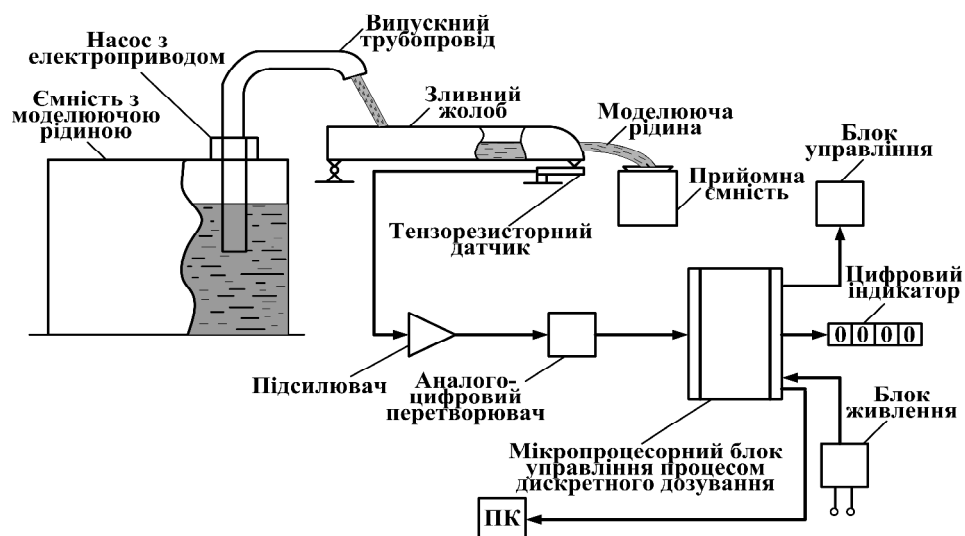


Рис. 3. Структурно-функціональна схема фізичної моделі заливальної установки з похилим зливним жолобом

На підставі спостереження за гідравлікою струменя моделюючої рідини на фізичній моделі визначалася оптимальна напруга живлення електромагніту, виходячи з того, що дозу з високою точністю можна залити при постійній витраті, а відповідно, за умови близького до ламінарного режиму течії струменя на зливному жолобі.

У третьому розділі описано дослідження теплових, гідродинамічних та магнітодинамічних характеристик МДУ. За допомогою створення математичних моделей та натурних досліджень встановлені залежності електромагнітних силових взаємодій у МДУ. Наведено розрахунок основних параметрів МДУ, у т.ч. результати експериментальних досліджень теплової роботи МДУ та її витратних характеристик за допомогою фізичного моделювання.

Показана відмінність функціональних можливостей МДУ з платформеною ваговимірювальною системою (ВВС) і МДУ з ІВВС шляхом порівняння балансу сил.

Для випадку МДУ з платформеними вагами, рівняння балансу сил виглядає наступним чином:

$$(m_{мет.} + m_{конструкції}) \cdot g = F(m_{ВВС}) \quad (1)$$

де $m_{мет.}$ – маса розплаву в тиглі та каналі МДУ (30-630 кг), кг; $m_{констр.}$ – загальна маса конструкції МДУ без металу, кг, яка складається з: $m_{конструкції} = (m_m + m_k + m_\phi + m_{м.п.} + m_{ш.} + m_{ем.сист.})$, кг, у т. ч. m_m – маса металоконструкції тигля, кг; m_k – маса металоконструкції каналу, кг; m_ϕ – маса футеровки, кг; $m_{м.п.}$ – маса металопровода, термопари, інших пристосувань, змонтованих на МДУ, кг; $m_{ш.}$ – маса шасі МДУ, кг; $m_{ем.сист.}$ – маса електромагнітних систем МДУ, кг; g – прискорення вільного падіння $9,8 \text{ м}^2/\text{с}$; $F(m_{ВВС})$ – величина, що вимірюється ВВС у ваговому еквіваленті, Н.

Діапазон варіації величини $F(m_{ВВС})$ для даного випадку становить у ваговому вимірі еквівалент маси 4000-5500 кг, тоді як $F(m_{ІВВС})$, що вимірюється ІВВС (перетворена в силу, пропорційну ваговому еквіваленту, Н), коливається в діапазоні мас 1500-2500 кг, що у 2-3 рази менше за масу, вимірювану за допомогою платформених вагів і має додаткові «нормальні» складові вищевказаних силових електромагнітних взаємодій:

$$(m_m + m_\phi + m_k + m_{м.п.}) \cdot g - (F_{ем.сил.} + F_{реак.констр.} + F_{ем.взаємод.} + F_{рад.сил.}) = F(m_{ІВВС}) \quad (2)$$

Це спрощує умови роботи обладнання та підвищує ефективність функціонування системи управління, зокрема, створює передумови для підвищення точності дозування.

На першому етапі досліджено залежність нормальної складової сумарних електромагнітних силових взаємодій ($\sum F_{ем} = f(U_{інд}, U_{ем})$) МДУ з ІВВС при включенні індукторів МДУ в режим «насос» на ступені 1, 3 і 5 (відповідно 42, 60 і 80 В на кож-

ну) і варійованих значеннях напруги, що подається на електромагніт, від 40 до 80 В (ступені 1, 2, 3, 4, 5). Отримані експериментальні дані показані на рис. 4. Експериментальні залежності ($\sum F_{em} = f(U_{ind}, U_{em})$) можна інтерполювати до лінійної кореляційної математичної моделі, – поліному 1-го або 2-гоступеню.

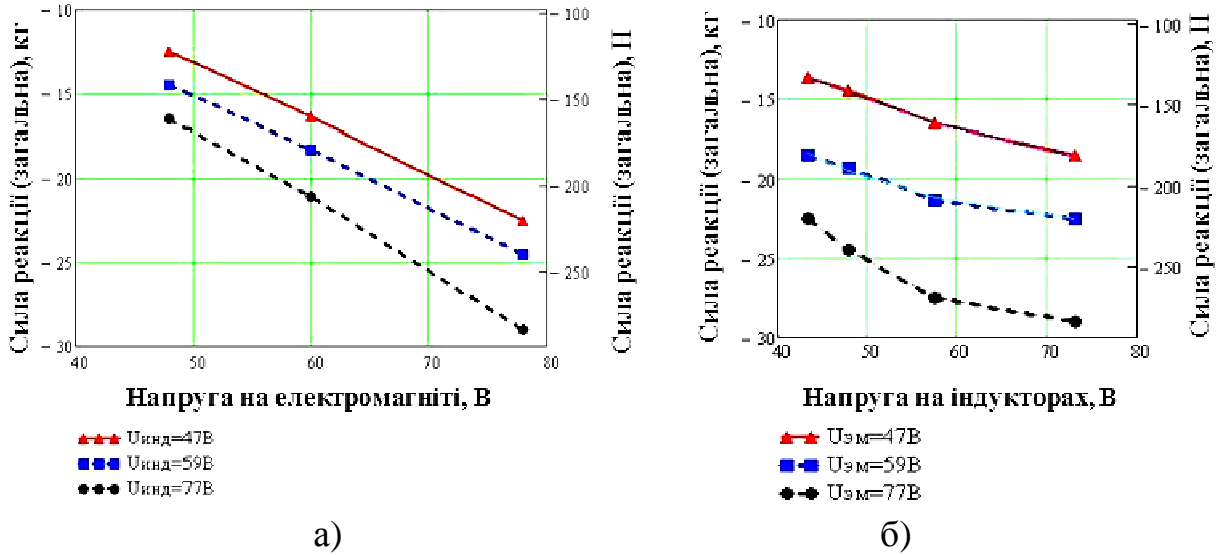


Рис. 4. Експериментальні залежності сумарних електромагнітних сил при роботі МДУ в режимі «насос» від напруги, що подається на електромагніт (а) і на індуктори (б)

За допомогою співвідношення регресійних коефіцієнтів – $k1/k2$ (рис. 5), оцінена роль та ступінь участі індуктованих у рідкометалевому витку в Ш-подібному каналі МДУ струмів (I) і магнітного поля (B).

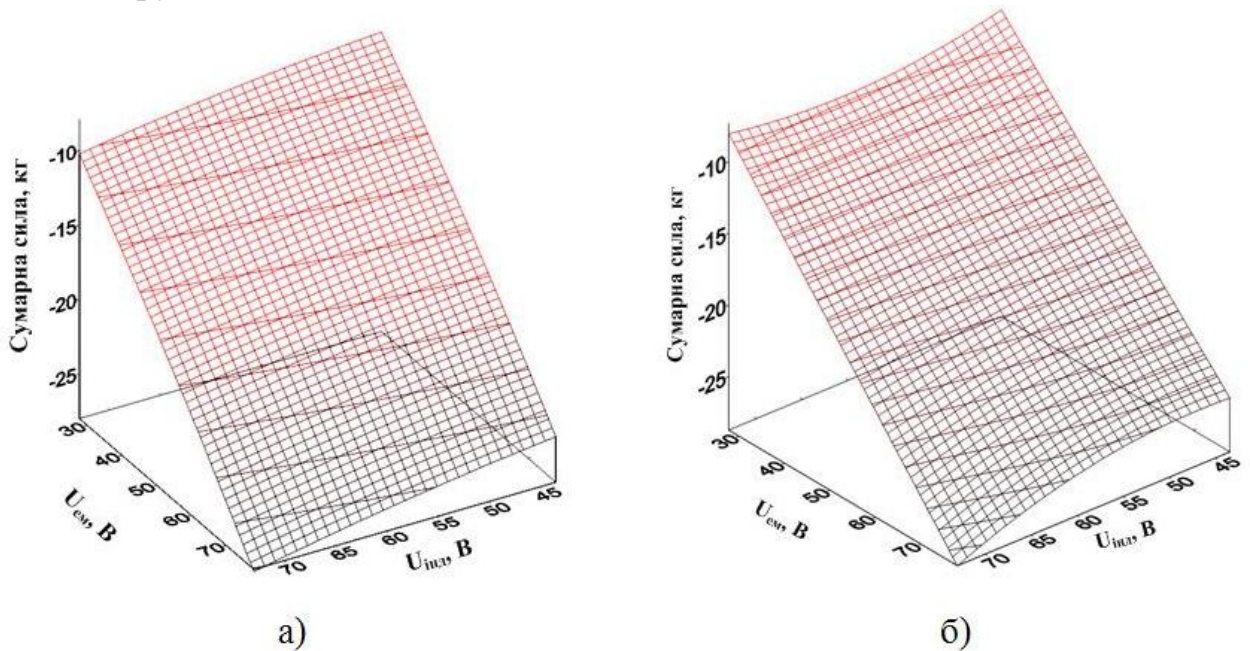


Рис. 5. Тривимірний (3D) вигляд кореляційної моделі ($\sum F_{em}(U_{ind}, U_{em})$): а – лінійного типу; б – квадратичного полінома створюваної в МДУ сумарної електромагнітної сили (у кг)

Участь складової струму в індукції магнітного поля для створення електромагнітної сили в р.з. МДУ, що становить $-k1/k2 = [U_{інд} / U_{ем}] = 1 / (3,7 \div 3,5) = 0,27 \div 0,29$. Співвідношення коефіцієнтів нелінійності 2-го порядку $k4/k5 = [U_{інд}^2 / U_{ем}^2] = 1,375/1$ характеризує зниження ступеня впливу величини напруг живлення індукторів при створенні максимальних значень електромагнітних сил та електромагнітного тиску (до 30 кПа).

Отримані залежності приведено до виду $-(h = f(p_{ем}) \equiv f(f_{ем}))$:

$$h(f_{ем}) = (f_{ем} / S_{нат.р.з.}) / (r \cdot g) = k \cdot f_{ем}, \text{ м}, \quad (3)$$

де $f_{ем}$ – величина електромагнітної сили, Н; $S_{нат.р.з.}$ – площа перерізу випускного патрубка трійникової р.з. МДУ ($S_{нат.р.з.} = (7,85 \div 9,42) \cdot 10^{-4}$) м²); r – густина алюмінієвого розплаву, кг/м³ (для сплаву АК7 при температурі 700°C $r \approx 2450$ кг/м³); k – коефіцієнт перетворення проєкцій електромагнітних сил на випускний патрубок трійникової р. з. ($k \approx 0,0441 \div 0,053$ с²/кг).

Для перетворення встановлених експериментально силових закономірностей до гідравлічної ефективної е.м.с., що створює гідравлічний тиск в розплаві поза р.з. – $f_{ем}^*$, представлено її співвідношення до $\sum F_{ем}$ з коефіцієнтом $k_{втр}$, що характеризує сукупні втрати в р.з. МДУ:

$$k_{втр} = \frac{f_{ем}^*}{\sum F_{ем}} = \frac{(23,55 \div 31,84)}{284,50} = (0,08278 \div 0,1112) \quad (4)$$

Таким чином, встановлено реальне значення ефективності дії (фактично коефіцієнт корисної дії – ККД) електромагнітних сил у трійниковій р. з. існуючої МДУ для створення гідравлічного тиску становить від 8,3 до 11,1%.

Теоретично розрахований напір складає від 1 до 1,68 м. що в цілому відповідає заявленим технічним характеристикам існуючої МДН-6А. У даному випадку, враховуючи залежність перетворення вимірюваних за допомогою ІВВС і створюваних у р.з. МДУ об'ємних електромагнітних сил до величини створюваного в МДУ електромагнітного напору (тиску), математична кореляційна модель залежності напірних характеристик МДУ від напруги живлення індукторів і електромагніту має вигляд:

$$h(U_{інд}, U_{ем}) = -(0,0036 \div 0,0059) \cdot \begin{pmatrix} -0,001093 \cdot U_{інд}^2 - 0,000794 \cdot U_{ем}^2 - \\ + 0,065497 \cdot U_{інд} - 0,22967 \cdot U_{ем} - \\ - 0,0006 \cdot U_{інд} \cdot U_{ем} - 0,950214 \end{pmatrix} \cdot g, \text{ м} \quad (5)$$

Перевірка адекватності математичної моделі (5), її відповідності реальним експериментальним залежностям напірних характеристик (отриманих за методикою вимірювання реального перепаду рівнів металу в тиглі МДУ та металопроводі у за-

лежності від напруги живлення електромагніту (від 35 до 75В) і для 3-х значень напруги, що подається на обмотки індукторів (44, 58 і 73 В), підтвердила відповідність математичної моделі (рис. 6). Девіація математичної моделі напору в МДУ з урахуванням сукупної похибки експериментальних вимірювань напруги і напірних характеристик $\pm 2,5\text{-}3\%$ склала не більше $\pm 7\%$ ($R = 0,9$).

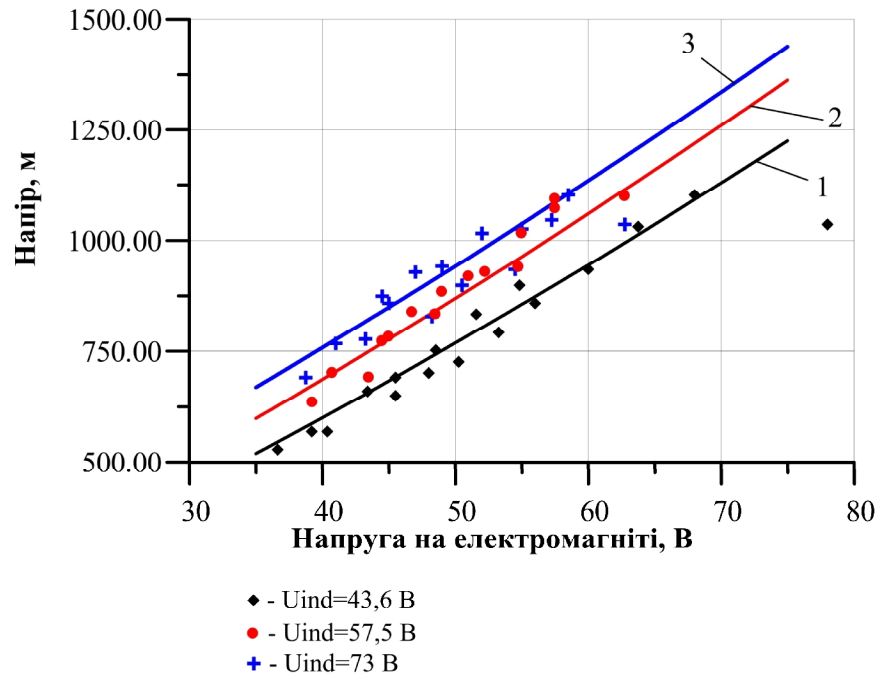


Рис. 6. Порівняння розрахункових і експериментальних значень напірних характеристик МДУ (адекватність математичної моделі)

Залежність і величину складової $F_{ем.взаємод}$ визначено експериментально шляхом вимірювання силової взаємодії за допомогою ІВВС при включенні МДН-6А в режим «насос», при різних значеннях напруги, що подається на обмотки індукторів у симетричному режимі, відповідно $(U_{ind}) = 43, 53, 57, 65$ та 73 В. Для виділення чистої складової силової взаємодії з С-подібним магнітопроводом, обмотки електромагніту відключали ($U_{ем} = 0$). Маса алюмінієвого розплаву марки АК7 в експериментах варіювалась від 50 до 150 кг. Подальший аналіз даних показав, що зміна маси розплаву в тиглі МДУ не впливає на вимірювану величину. Для встановлення впливу температурного фактору дослідження величини втягування проводили при температурах від 680 до 740°C. Зі зниженням температури розплаву сила втягування виявилась трохи вищою. Даний ефект пов'язаний зі зміною абсолютного значення індукції магнітного поля, індукованої поблизу С-подібного електромагніту, і власне значенням сили струму (I) на горизонтальній ділянці каналу МДУ, що є залежною величиною від електропровідності розплаву в каналах МДУ, яка з підвищенням температури збільшується та навпаки (рис. 7).

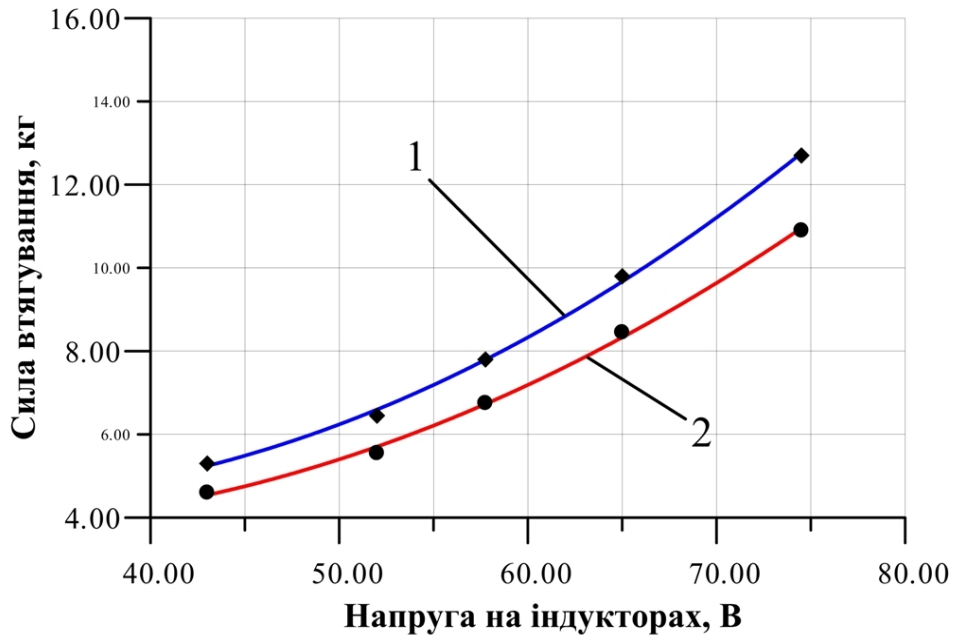


Рис. 7. Залежність силової взаємодії струмів, індуктованих на горизонтальній ділянці Ш-подібного каналу МДУ з магнітопроводом С-подібного електромагніту від напруги, що подається на обмотки індукторів: 1 – температура розплаву – 670-680 °С; 2 – температура розплаву – 740-750 °С

Залежність і величину складової $F_{\text{реак.конст. р.}}$ визначено експериментально шляхом вимірювання силової взаємодії за допомогою ІВВС, при включенні електромагніта в режим «насос» та живленні його обмоток напругою $U_{\text{ем}} = 48, 53, 60, 68$ і 78 В. Для виключення впливу радіальних електромагнітних сил у Ш-подібному каналі МДУ, індуктори установки відключали $U_{\text{інд}} = 0$. Кореляція отриманої експериментальної залежності представлено у вигляді виразу:

$$F_{\text{реак.констр.}}(U_{\text{ем}}) = (-0,00061 \cdot U_{\text{ем}}^2 + 0,0373 \cdot U_{\text{ем}} - 1,1687) \cdot g, H \quad (6)$$

З точки зору розробки САУ, досліджена величина може бути використана для виділення складової електромагнітних сил, що розвиваються в рідкому металі та окремо силового впливу на нього. При цьому фактична сила реакції з конструкцією каналу МДУ сама по собі відноситься до безповоротних втрат, що не створюють силовий вплив на розплав.

Далі, за методикою, що була уточнена та наведена у другому розділі роботи було проведено розрахунок основних електричних параметрів електромагнітних систем установки МДН-6А для алюмінієвих сплавів.

Результати розрахунку (табл. 2) використані в для дослідження технологічних характеристик установки МДН-6А, а також можуть бути використані для модернізації дослідної установки і враховані при проектуванні технологій з використанням МДУ.

Таблиця 2

Основні електричні параметри електромагнітних систем установки МДН-6А

Параметр	Умовне позначення	Розрахункове значення
Активний опір індуктора, Ом	R_g	$3,28 \cdot 10^{-4}$
Індуктивний опір, Ом	x_g	$5,1 \cdot 10^{-4}$
Повний опір, Ом	z_g	$6,042 \cdot 10^{-4}$
Електрорушійна сила (ЕРС), створювана індуктором у витку рідкого металу, В	E_{ei}	3,94
Максимальна індукція в залізі магнітопровода індуктора, Тл	B_{Fei}	0,616
Електричний струм в рідкому металі, А	I_g	6567
Активна потужність, що виділяється у витку, кВА	P_{ag}	25,9
Коефіцієнт потужності витка	$\cos j_g$	0,54
Електричний струм в індукторі, А	I_i	219
Активна потужність індуктора, кВт	P_{ai}	25,25
Повна потужність індуктора, кВА	P_{si}	28,5
Реактивна потужність індуктора, кВА	P_{pi}	26,5
Потужність конденсаторів, кВА	P_{Cu}	13,25
Коефіцієнт потужності індуктора(фактично його $1/2$)	$\cos j_i$	0,89
Максимальна потужність, споживана в системі «індуктор – виток рідкого металу», кВт	P_i	51,09
ЕРС на виток котушки електромагніта, В	E_e	19,74
Максимальна індукція в магнітопроводі електромагніту, Тл	B_{Fee}	1,56
Магнітна індукція в центрі полюса електромагніту, Тл	B_n	0,24
Активний опір обмотки електромагніту, Ом	R_e	$3,35 \cdot 10^{-3}$
Активна потужність електромагніту, кВт	P_{ae}	33,4
Реактивна потужність електромагніту, кВА	P_{pe}	424,28
Повна потужність електромагніту, кВА	P_{se}	425,6
Коефіцієнт потужності електромагніту	$\cos j_e$	0,078

Наступним етапом досліджень була оцінка теплової роботи МДУ. Спочатку втрати тепла в установці з багатошаровою футеровкою, що відбуваються за рахунок теплопровідності і теплової конвекції було розраховано за методикою, що наведена у другому розділі роботи. Встановлено, що загальні теплові втрати дослідної установки МДН-6А для алюмінієвих сплавів з закритою кришкою складають 13,08 кВт.

Відповідно, максимальна потужність індуктора в режимі зберігання металу ($T=720$ °С) з урахуванням електричного ККД системи індукції струму становить 39 кВт.

Далі, згідно з методикою, що наведена у другому розділі роботи, проведено розрахунок основних технологічних параметрів установки МДН-6А для ступені 3 живлення індукторів – 65 В (при максимально можливій напрузі 89 В, яка відповідає ступені 5). Відповідно основні технологічні параметри дослідної установки МДН-6А для такого підключення становлять:

- тиск, створюваний в робочій зоні: $p_e = 18,2$ кПа;
- підйом металу під дією створюваної в робочій зоні електромагнітної сили (електромагнітний напір): $H = 0,594$ м;
- продуктивність по перегріву металу на $T = 100$ °С дорівнює: $\Pi = 0,11$ кг/с.

Отримані технологічні параметри МДН-6А можуть бути використані для модернізації дослідної установки, а також враховані при проектуванні технологій з використанням МДУ.

Проведено оцінку потужності теплових втрат МДУ для алюмінієвих сплавів методом прямого натурального експерименту. Встановлено, що швидкість зміни температури розплаву (як при нагріванні, так і при охолодженні) в «коридорі» системи регулювання у діапазоні 710-730 °С складає 2,5-3 °С/хв. Визначено потужність теплових втрат установки в режимі «зберігання» з закритою кришкою (маса розплаву 133,5 кг) – 20 кВт (див. рис. 8). У перерахунку на цикл нагрів/охолодження протягом 27 хв, надлишкова електрична потужність індукторів склала 8,99 кВт.

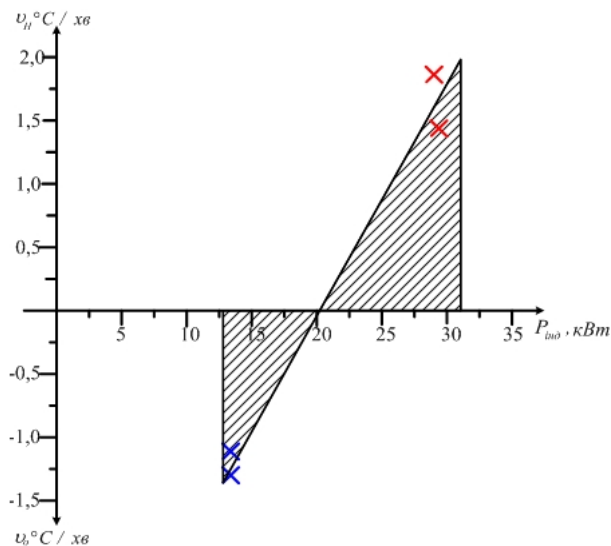


Рис. 8. Швидкість зміни температури розплаву залежно від потужності індукторів МДУ

Таким чином, встановлено, що застосування наявної дискретної двопозиційної системи управління потужністю індукторів, в основі якої лежить періодичне перемикання ступенів живлення автотрансформатора, спричиняє надмірне споживання електроенергії у обсязі 19,98 кВт·год, що у питомому виразі стосовно до маси розп-

лаву у МДУ складе 0,15 кВт·год/кг. Очевидно, що застосування досліджуваної аналогової САУ дозволить забезпечити суттєве енергозаощадження. Наприклад, для МДУ місткістю 630 кг рідкого алюмінієвого сплаву добова економія електроенергії при роботі в режимі зберігання розплаву складе 480 кВт·год.

Експериментальним шляхом на фізичній моделі установки досліджено витратні характеристики МДУ.

Керуючим параметром при дозуванні є напруга, тому задачею даного дослідження було визначення її раціонального інтервалу. Для цього на фізичній моделі, використовуючи розроблену методичку, були отримані та зафіксовані дані, з урахуванням спостереження за гідравлікою струменя моделюючої рідини. Цей підхід обґрунтовано тим, що дозу з високою точністю можна залити лише при постійній витраті та, відповідно, при ламінарній течії струменя на зливному жолобі.

Всі дані зафіксовано за інтервал часу 6 с, та в інтервалі напруги від 10 до 20,5 В. Для кожного значення напруги U розраховано витрату моделюючої рідини Q .

Для визначення оптимальної напруги було виділено три залежності досліджуваних параметрів напруги від наступних критеріїв:

- миттєвого значення маси m_{vis} ;
- миттєвого значення масової витрати моделюючої рідини Q ;
- для третьої залежності було розраховано коефіцієнт k , що показує чисельну залежність миттєвої витрати від миттєвого значення маси:

$$k = \frac{Q}{m_{vis}} \quad (7)$$

При введенні коефіцієнта, що показує залежність масової витрати від миттєвого значення маси до подаваної напруги (рис. 9), раціональний діапазон зміни k становить від 2,2 до 2,25, що дозволяє мінімізувати вплив пульсацій струменя на точність дозування за рахунок зменшення їх амплітуди.

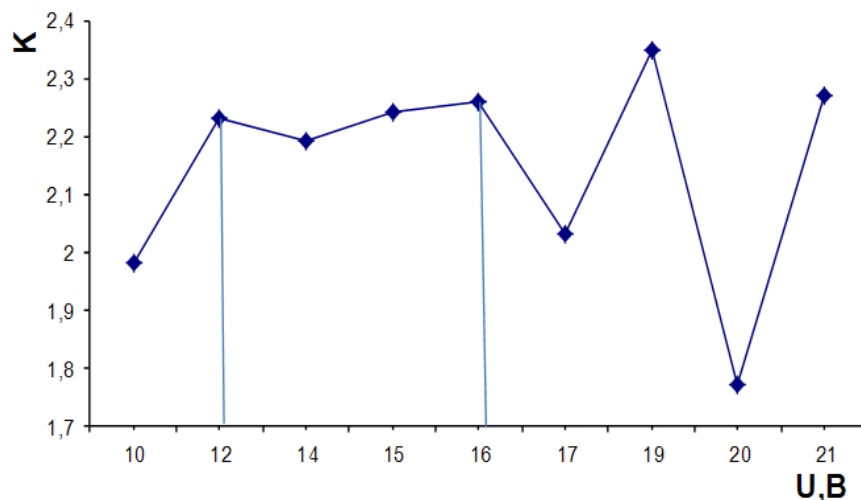


Рис. 9. Залежність масової витрати від миттєвого значення маси до напруги, що подається на електромагніт МДУ

Шляхом експериментальних досліджень на фізичній моделі МДН-6А встановлено, що при заливанні доз масою 1,5-3 кг раціональний діапазон напруги на електромагніті складає 12,3-16,3 В.

У четвертому розділі представлено результати дослідження принципів розробки системи управління МДУ. Наведено практичні приклади застосування систем динамічного контролю основних технологічних параметрів обладнання. Запропоновано удосконалення процесів безперервного розливання металів та сплавів на основі використання вітчизняного магнітодинамічного обладнання. Представлено новий принцип управління витратними характеристиками, який ґрунтується на застосуванні магнітовагової системи та розробленої відповідної САУ процесом безперервного розливання металу з використанням магнітодинамічного проміжного ковша. Показано техніко-економічні переваги технологічних ливарно-металургійних процесів з використанням МДУ при застосуванні розроблених принципів і засобів управління основними робочими параметрами.

Розглянуто процес дозування алюмінієвого розплаву з МДУ в ливарну форму. Реєстрація зміни маси розплаву, що надходить у ливарну форму, реалізовувалась з використанням ІВВС, на яку встановлена МДУ. Експериментальна закономірність зміни у часі маси розплаву при дозуванні порції масою 2 кг протягом часового інтервалу 2,5 с із середньою масовою витратою 0,8 кг/с показана на рис. 10.

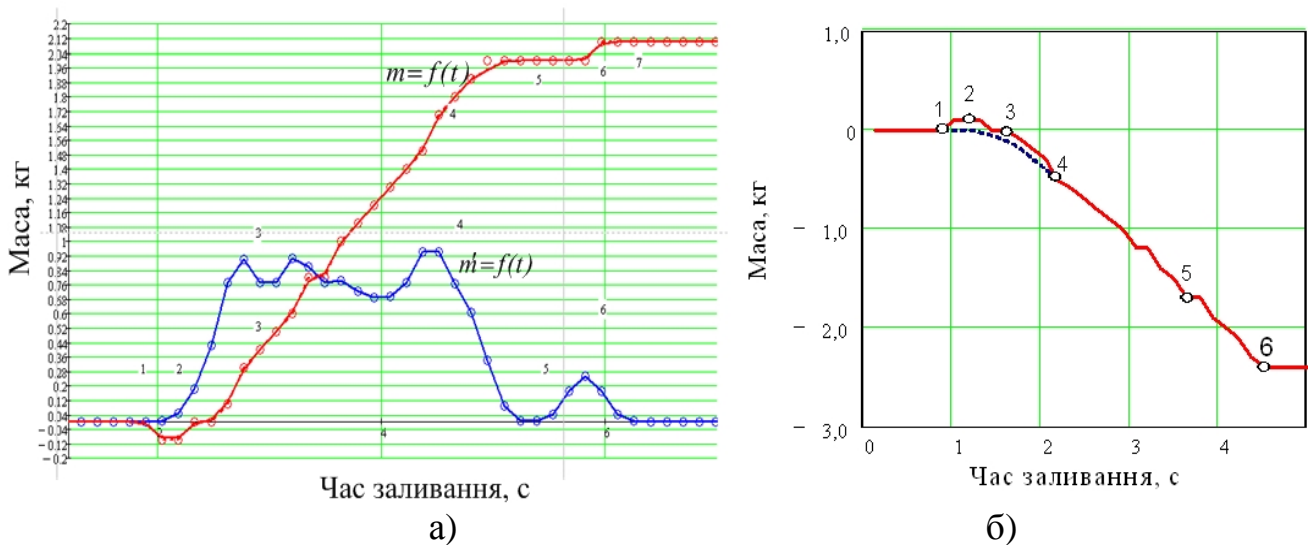


Рис. 10. Зміна маси розливаного розплаву $m = f(t)$ та масової витрати $m' = f(t)$

у часі (а) при дозуванні порції $m_0 = 2\text{ кг}$ алюмінієвого розплаву та характеристика від'єднання маси порції від маси МДУ при розливанні (б)

Залежність зміни маси розливаної порції у часі розділено на декілька проміжків, а саме: 1 – вмикання МДУ у режим розливання (насос); 2-3 розгін розплаву у металопроводі та вихід на стабільний процес розливання; 3-4 – сталий (за величиною масової витрати) процес розливання; 4-5 – інерційне зливання розплаву після вимкнення МДУ. Ділянка 5-6 характеризує зливання залишків розплаву із системи подачі розплаву у ливарну форму (жолоб). Також метал, який перебував у зливному

металопроводі МДУ та не дійшов на момент закінчення розливання до точки незворотного переливу на жолоб, стікає назад у МДУ.

Ділянка 2-3 характеризує процес наростання масової витрати і є дуже важливою для дозування за методом контролю у часі. Ділянка 3-4 важлива з точки зору забезпечення технологічних вимог по підтриманню заданого значення масової витрати та характеризується абсолютним значенням параметрів осциляції. Щодо ділянки 4-5 (заключний етап), то її тривалість залежить від поточного значення масової витрати (на момент вимкнення електромагнітного тиску) та в'язкості розплаву, а також від геометричних особливостей металопроводу, гідравлічних опорів та власне інерційності системи, що подає розплав із МДУ у ливарну форму.

Особливий інтерес, з точки зору реалізації динамічного контролю, у даному випадку має закономірність зміни у часі значення масової витрати та спосіб її визначення.

Залежність $m' = f(t)$ (перша похідна зміни величини маси у часі), визначена шляхом перерахунку зміни параметру маси $(m_{i+1} - m_i)$ за відповідний інтервал часу $(t_{m_{i+1}} - t_{m_i}) = 0,5c$, $Q_i = m'_i = (m_{i+1} - m_i) / (t_{m_{i+1}} - t_{m_i})$ (рис. 12).

Зокрема, параметр величини часового проміжку $t_i = (t_{m_{i+1}} - t_{m_i})$ коригується у відповідності до параметрів роботи ваговимірювальної системи, блока реєстрації миттєвого значення маси розплаву, що заливається, та особливо до співвідношення між масою порції і масовою витратою $c = m_{\text{доза}} / Q_{\text{зал}}$, що для більшості типових процесів розливання із забезпеченням достатнього рівня точності (не більше 2%), що корелюється, як процес заливання протягом часу $t \geq 2c$.

Додатково, величина масової витрати розплаву може контролюватися шляхом дублюючого розрахунку масової витрати розплаву $Q(H)$, що зливається із металопроводу, за умови сталих параметрів системи тракту металопроводу, по якому здійснюється подача розплаву у ливарну форму, з урахуванням створюваного електромагнітного напору (H) , який також може бути обчислений або виміряний напряму з використанням ІВВС. У такому разі, система динамічного контролю масової витрати може бути записана у вигляді взаємодоповнюючої сукупності рівнянь (8), які можуть бути запрограмовані у вигляді алгоритмів у мікропроцесорному блоці та обчислюватися у процесі лиття в реальному масштабі часу:

$$\left. \begin{aligned} Q(m) &= m'_i = (m_{i+1} - m_i) / (t_{m_{i+1}} - t_{m_i}) \\ Q(H) &= r \cdot e_\epsilon \cdot e \cdot j \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot (H - L_{\text{мет-пров}} + h_{\text{ур}})^{\frac{3}{2}} \\ Q(v_{\text{мет}})^* &= v_{\text{мет}} \cdot S_{\text{мет}} \cdot r_{\text{Al}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де $Q(v_{\text{мет}})^*$ – складова рівняння, яка може бути виміряна з використанням допоміжних пристроїв, що можуть входити до комплекту обладнання МДУ з ІВВС.

Для коригування контрольованого параметру, має здійснюватися безперервне обчислення головних параметрів роботи МДУ за рівняннями (8).

Приклад реалізації методу динамічного контролю (у випадку застосування алгоритму відстеження динаміки зміни у часі масової витрати, що реалізується за алгоритмом п'ятистадійного визначення величини) наведений на рис. 11.

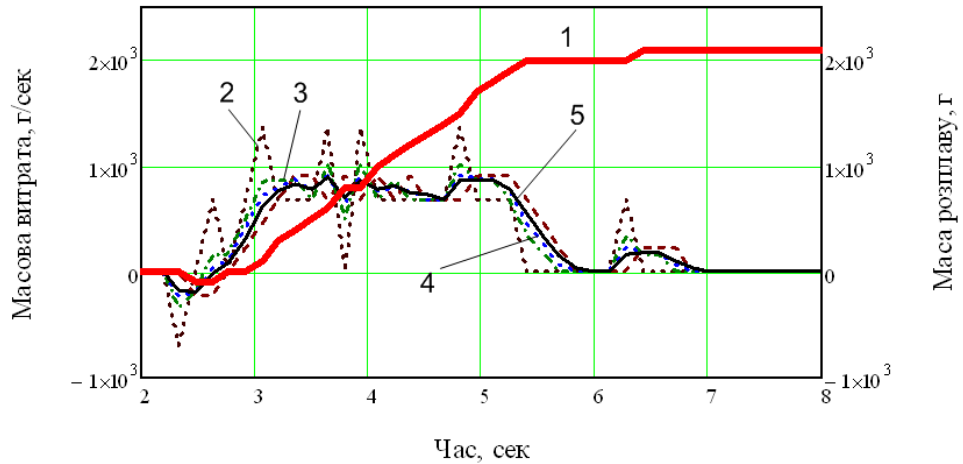


Рис. 11. Залежність зміни у часі масової витрати, що визначається динамічною системою відстеження за алгоритмом інтервального обчислення:

$$1 - \text{маса розплаву, г}; 2 - Q_{i,i+1} = (m_{i+1} - m_i) / (t_{m_{i+1}} - t_{m_i});$$

$$3 - Q_{i,i+2} = (m_{i+2} - m_i) / (t_{m_{i+2}} - t_{m_i}); 4 - Q_{i_3} = \sum_{n=3} Q_{i,i+n} / n; 5 - Q_{i_4} = \sum_{n=4} Q_{i,i+n} / n$$

Аналіз залежності (рис. 11) показав, що для створення алгоритму системи відстеження безперервного коригування масової витрати слід використовувати першу складову $(i+1) - i$, у якості сигналу старту відпрацьовування режиму корекції, та п'яту складову $\sum_{n=4} [(i+n) - i] / n$, як вихідну величину коригування.

Здійснення динамічного контролю масової витрати та температури розливаного розплаву є доцільним для суттєвого підвищення точності дозування до рівня, що відповідає точності роботизованих систем дозування (не більше 1% у діапазоні доз від 0,1 до 100 кг), відтворення адаптивного регулювання параметра масової витрати розплаву у періоди початку розливання, при розливанні та при доливанні заданої дози, створення систем динамічного регулювання процесів заповнення ливарної форми для технологій ЛЕМТ, РОЗЛИВ-ЛЕМТ.

Розглянуто особливості САУ для процесів безперервного розливання. Запропоновано удосконалення процесів безперервного розливання металів та сплавів на основі використання магнітодинамічного обладнання. Розроблено новий принцип управління витратними характеристиками, який ґрунтується на застосуванні магнітовагової системи. Розроблено відповідну САУ процесом безперервного розливання металу з використанням магнітодинамічного проміжного ковша (рис. 12).

Порівняння розробленої САУ МД-ПК з традиційними технологіями управління безперервним розливанням свідчить, що запропонований спосіб і агрегати для його реалізації дозволяють за рахунок скорочення кількості різних окремих видів

технологічного обладнання (які не завжди добре адаптуються один до одного і синхронізуються між собою, не є взаємозамінними та важко інтегруються до єдиної системи) створити належні передумови для розвитку процесу та поліпшення його техніко-економічних показників.

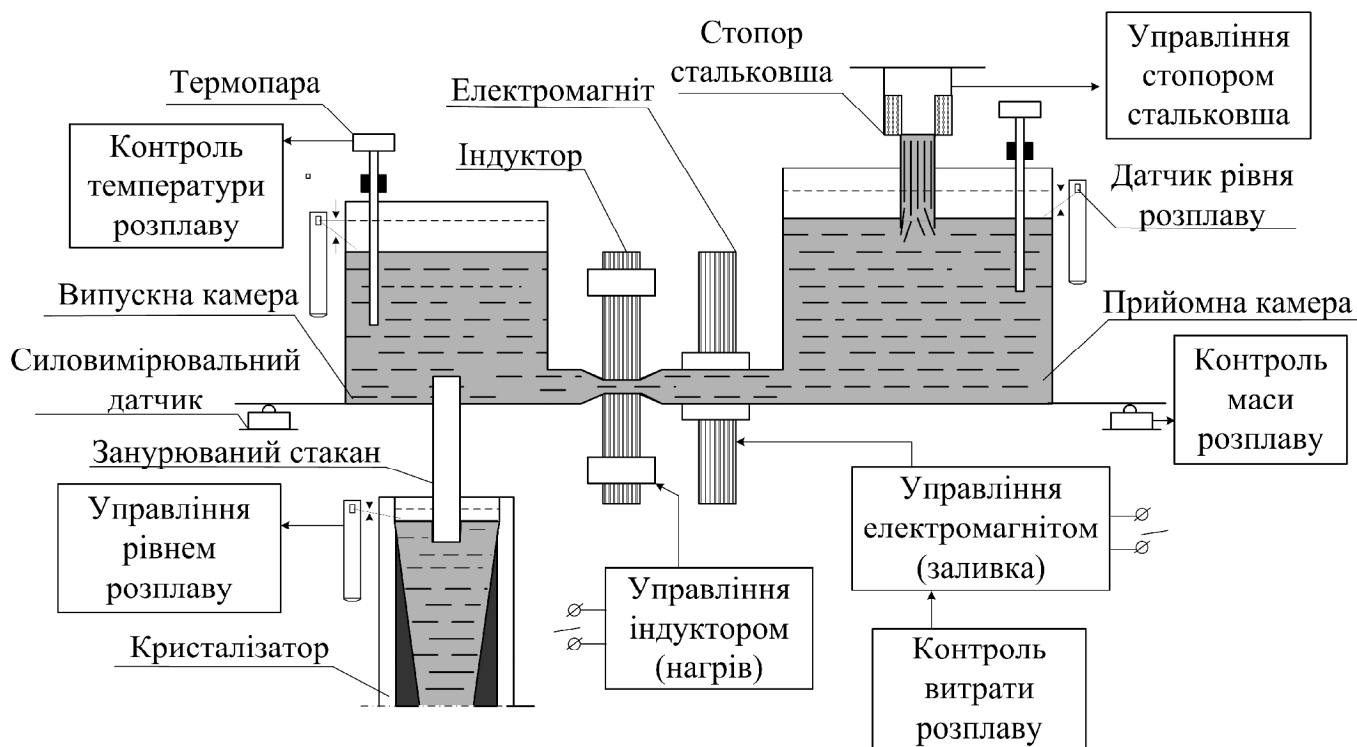


Рис. 12. Конструктивно-функціональна схема САУ МД-ПК для процесів безперервного розливання сплавів

Оціночний розрахунок економічного ефекту від застосування розроблених принципів і засобів управління основними робочими параметрами магнітодинамічного обладнання проводився для існуючих МДУ для алюмінієвих сплавів без конструкційних змін. Статті економії включають: 1) зменшення витрати розплаву на 1 т придатного лиття за рахунок підвищення точності дозування (зменшена похибка дозування з 2% до 1,5% для виливків масою до 400 кг) і зменшення кількості зворотного сплаву, який потребує повторного переплаву та розливання, забезпечують економію на 1 т придатного лиття у розмірі 23,67 \$; 2) зменшення капітальних витрат на конструкцію МДУ і ваговимірювальну систему за рахунок зменшення необхідної кількості тензорезисторних силових датчиків (з 4-х до 1-го), що при середній вартості одного тензодатчика 190 \$ забезпечує економію сукупної вартості обладнання в розмірі 570 \$; 3) можливість скорочення витрат електроенергії, за рахунок аналогового управління живлення електромагнітних систем у порівнянні зі ступінчастою схемою регулювання. Слід враховувати, що разові капітальні витрати на перехід від дискретного управління з використанням автотрансформаторів до аналогової системи управління, наприклад, на базі тиристорного перетворювача будуть дещо вищими (орієнтовно на 10-15% в залежності від типу і моделі обладнання). Однак усу-

нення надмірного споживання електроенергії, яке має місце при існуючій двопозиційній системі регулювання, забезпечить середню добову економію в розмірі **42 \$**.

Загальний економічний ефект при виготовленні 1 т алюмінієвого лиття, без урахування статей капітальних витрат, складе не менше 65,6 \$/1 т.

Як загальний наслідок, впровадження у виробництво розроблених наукових принципів та реалізованих на їх основі технічних рішень при додержанні заданих показників якості литих виробів забезпечить: стабілізацію технологічного процесу лиття і підвищення його продуктивності на 10-15%; зменшення впливу людського фактору на техніко-економічні показники виготовлення литої металопродукції; скорочення шкідливого впливу на довкілля (передусім пов'язаного з тепловим і хімічним факторами) та відповідне поліпшення умов праці обслуговуючого персоналу і загалом екології на виробництві; створення передумов для подальшого розвитку ливарних технологій та розробки новітнього обладнання для їх реалізації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-технічне завдання щодо підвищення ефективності багатofункціонального ливарного магнітодинамічного обладнання. Це забезпечує збільшення виходу придатного лиття, енерго- та матеріалоощадження, покращення контрольованості методів управління рухом розплаву при його транспортуванні та підвищення точності дозованого розливання металу відкритим струменем, що досягнуто шляхом встановлення раціональних інтервалів основних параметрів МДУ. Результати роботи в подальшому дають змогу створити на базі цих розробок систему адаптивного інтелектуального автоматичного управління процесами лиття для технології електромагнітного розливання.

Основні наукові та теоретичні результати роботи:

1. За результатами аналізу аналогічних за технологічними можливостями агрегатів, які застосовуються у світі, встановлено, що для додержання сучасного рівня конкурентоспроможності МДУ в технологіях приготування та розливання алюмінієвих розплавів, слід забезпечити відповідність ряду технологічних параметрів, зокрема, належну місткість агрегату (наприклад, для технологій лиття під тиском – не менше 250 кг), високу точність дозування, особливо для малих порцій металу (похибка дозування – не більше 2% від маси порції), напірні характеристики МДУ як насоса – більше 1 м алюмінієвого стовпа, а також розширення діапазону масової витрати при розливанні як у бік малих значень (менше наявних 0,3 кг/с), так і великих значень (до 10 кг/с і більше, що необхідно для технологій безперервного розливання металів та одержання відповідальних крупногабаритних виливків складної конфігурації).

2. З урахуванням світового досвіду управління технологічними процесами лиття на основі контролю маси розплаву у агрегаті під час приготування та розливання рідкого металу і експлуатації раніше створених МДУ з платформною ваговимірювальною системою, шляхом порівняння балансу сил показано, що більш перспективною та прогресивною є інтегрована ваговимірювальна система (ІВВС), оскільки вона забезпечує діапазон вимірювання еквівалента маси у 2-3 рази менший, ніж платформна система (відповідно 1500-2500 кг проти 4800-5200 кг).

3. З використанням ІВВС досліджено процеси перетворення електромагнітної сили (що вимірюється прямим шляхом), генерованої у робочій зоні МДУ, в ефективну електромагнітну силу. Встановлено, що для створення електромагнітного тиску на рівні 30-35 кПа, який на 10-20% вище від паспортних даних існуючих серійних МДУ і є мінімально необхідним для подальшого розвитку одержання виливків за технологіями ЛЕМТ та РОЗЛИВ-ЛЕМТ, ефективна електромагнітна сила складає 23,55-31,84 Н.

4. З використанням розроблених математичних і фізичних моделей та натурних експериментів на діючому магнітодинамічному обладнанні досліджено супутні пондеромоторні взаємодії у МДУ – моторний ефекту, реакцію магнітного поля з конструкцією МДУ та взаємодії з осердям електромагніту, що дозволяє встановити рівень безповоротних втрат енергії, а також здійснювати періодичний або безперервний контроль стану окремих вузлів МДУ і коефіцієнта їх корисної дії. Це дає змогу в перспективі при створенні нових магнітодинамічних агрегатів враховувати особливості конструкції як окремих вузлів, так і всього пристрою в цілому, для підвищення ефективності безпосередньо обладнання та реалізованих з його застосуванням технологій.

5. Експериментально встановлено залежність і величину складової сили реакції конструкції шляхом визначення силової взаємодії за допомогою ІВВС. Визначено особливості взаємодії зовнішнього магнітного поля в міжполюсному зазорі С-подібного електромагніту з конструкцією каналу МДУ, а саме трійниковою р. з. Як результат, має місце утворення електрично замкнутих контурів, що створюють реактивний опір. Сила реакції з конструкцією каналу МДУ становить від 5 до 6% по відношенню до сумарної величини електромагнітних сил, створених в установці та реєстрованих за допомогою ІВВС. Напрямок співпадає з напрямом електромагнітних сил, генерованих в р. з. МДУ, тобто залежить від полярності підключення електромагнітних систем і суперпозиції індукційного струму та змінного зовнішнього магнітного поля.

6. Встановлено реальне значення ефективності дії (фактично коефіцієнт корисної дії – ККД) електромагнітних сил у трійниковій р. з. існуючої МДУ, який для створення гідравлічного тиску становить від 8,3 до 11,1%. При усуненні безповоротних втрат енергії, ККД р. з. може бути суттєво підвищений. Також для цього випадку теоретично розраховано створюваний у МДУ напір, який становить від 1 до 1,68 м та загалом відповідає заявленим технічним характеристикам існуючих моделей магнітодинамічної установки МДН-6А.

7. Розраховано основні електричні параметри електромагнітних систем магнітодинамічної установки МДН-6А-0,63М для розливання алюмінієвих сплавів та визначено двома методами (розрахунковим та експериментальним) потужність теплових втрат у МДУ. За допомогою експериментального методу, що не був застосований для МДУ раніше, визначено: швидкість зміни температури розплаву в «коридорі» системи регулювання (710-730 °С); встановлено параметри нагріву розплаву при його регулюванні одним індуктором, двома індукторами та при їх почерговому включенні; теплові втрати МДУ в режимі «зберігання» з закритою кришкою тигля при постійному рівні розплаву (масою 133,5 кг) склали $P=21,92$ кВт. Стало можли-

вим замінити дискретне (на базі ступінчатих автотрансформаторів) управління роботою електромагнітних систем МДУ на аналогове (наприклад, на основі тиристорних регуляторів), що дозволить суттєво скоротити енерговитрати при виготовленні лиття.

8. Визначено раціональний інтервал співвідношення маси розливаної порції металу та миттєвого значення масової витрати при її розливанні та відповідний інтервал напруги живлення електромагніта МДУ, що дозволяє контролювати витрату рідини на вагодозувальному жолобі, з метою мінімізувати вплив пульсацій струменя на точність дозування за рахунок зменшення їх амплітуди. Похибка дозування не перевищує 1,5% від маси дози при розливанні малих порцій розплаву (маса 1,5-3 кг).

9. Розроблено принципову схему новітньої САУ МДУ для приготування і розливання алюмінієвих сплавів на основі безперервного контролю за допомогою ІВВС динамічних характеристик процесу лиття для підвищення якості литої металопродукції та загалом техніко-економічних показників ливарних і металургійних технологій.

10. Запропоновано принципову схему САУ для безперервного розливання металевих розплавів на основі створюваного двокамерного магнітодинамічного проміжного ковша, що забезпечить: керований індукційний перегрів розплаву безпосередньо перед видачею до кристалізаторів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ); безконтактне управління рухом рідкого металу (його перемішування та видача до кристалізатора МБЛЗ) під дією електромагнітних сил; можливість малонапірного розливання сплавів із регульованою масовою витратою і підведення розплаву по всій ширині кристалізатора МБЛЗ.

11. Порівняння розроблених елементів САУ МДУ з традиційними технологіями управління приготуванням та розливанням сплавів свідчить, що запропонований спосіб і агрегати для його реалізації дозволяють за рахунок скорочення кількості різних окремих видів технологічного обладнання (які не завжди добре адаптуються один до одного і синхронізуються між собою, не є взаємозамінними та важко інтегруються до єдиної системи) забезпечити розвиток сучасних процесів лиття. При цьому загальний очікуваний економічний ефект від застосування запропонованих розробок складе у середньому 65,6 \$ на 1 т лиття з алюмінієвих сплавів (при середній вартості 1 т якісного алюмінієвого лиття у розмірі 4700 \$), у т. ч. за рахунок збільшення виходу придатного лиття у розмірі 23,67 \$/1 т, за рахунок скорочення енерговитрат – до 42 \$/1 т. Додаткова економія може бути досягнута за рахунок вказаних статей і окремих статей капітальних витрат, зокрема, при скороченні числа тензометричних датчиків (з чотирьох до одного, що змонтовано під зливним жолобом) у складі ІВВС та/або при заміні дискретної системи управління МДУ на аналогову.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, що включені до міжнародних науково-метричних баз:

1. V. Dubodelov, A. Semenko, K. Bogdan, M. Goryuk. Development of Principles to Control the Processes of Continuous Casting of Alloys Using Magnetodynamic Equipment // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. –

Vol. 4, No.1 (100) 2019. – PP. 69-75. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.172051>.
– Цитується у базі Scopus.

Статті у наукових фахових виданнях:

2. **Кизилова А.Ю.** Обоснование концептуальных подходов реализации динамического контроля технологических параметров работы магнитодинамической установки // Процессы литья. – 2014. – № 5 (107). – С. 54-65.

3. Богдан К.С., Санкин А.А., Слажнев Н.А., **Кизилова А.Ю.** Экспериментальные исследования пружинно-тензометрических весовых устройств с пондеромоторным узлом силовведения для литейных материалов// Процессы литья. – 2014. – № 6. – С. 59-63.

4. Слажнев Н.А., Богдан К.С., Дубоделов В.И., Моисеев Ю.В., **Кизилова А.Ю.** Индукционный контроль и диагностика состояния каналов литейных МГД-установок в процессе их эксплуатации // Процессы литья. – 2014. – № 4 (106). – С. 22-29.

5. Слажнев М.А., Богдан К.С., **Кизилова А.Ю.**, Горшков А.О. Исследование закономерностей электромагнитных силовых взаимодействий в магнитодинамических установках для алюминиевых сплавов. Сообщение 1 // Процессы литья. – 2015. – № 5. – С. 11-21.

6. **Кизилова А.Ю.** Математическое моделирование в процессах проектирования литейной технологии. // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. -№5/2(7) С. 57-58.

7. Богдан К.С., **Кизилова А.Ю.**, Терновой С.А. Заливочная МГД-установка с весодозирующим сливным жолобом для алюминиевых расплавов // Процессы литья. – 2016. – № 3. – С. 42-48.

8. К.С. Богдан, М.С. Горюк, С.А. Терновой, **А.Ю. Кизилова.** Магнитовесовая литейная установка с микропроцессорной САУ электрофизической обработкой и дозированием алюминиевых расплавов. // Процессы литья. – 2017. – №2. – С. 63-69.

9. К.С. Богдан, В.Н. Фикссен, **А.Ю. Семенко**, М.С. Горюк. Автоматическое управление процессом заполнения литейных форм при литье под низким электромагнитным давлением. // Процессы литья. – 2017. –№5. –С. 48-55.

Матеріали наукових конференцій:

10. **A.Yu. Kizilova**, M.A. Slazhniev, K.S. Bogdan, Kyung Hyun Kim, Hyun Suk Sim. Dynamic control of operational characteristics in magneto-weighting casting installation (MWI) for aluminium alloys // Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – SIMAP Laboratory – EPM Group: 2015, ISBN 978-2-9553861-0-1. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – P. 609-612.

11. M. Slazhniev, **A. Kizilova**, K. Bogdan. Developing of pragmatic models of the ponderomotive interactions in magnetodynamic installations for aluminum alloys MDN-6A // Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – SIMAP Laboratory – EPM Group: 2015, ISBN 978-2-9553861-0-1. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – P. 593-596.

12. M. Slazhniev, **A. Kizilova**, K. Bogdan, Kyung Hyun Kim, Hyun Suk Sim. New concept of a modern magnetodynamic installation based on the principle of superpo-

sition of pulsating electromagnetic forces // Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – SIMAP Laboratory – EPM Group: 2015, ISBN 978-2-9553861-0-1. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – P. 155-158.

13. V. Dubodelov, O. Smirnov, M. Goryuk, V. Pogorsky, **A. Kizilova**. MHD control of flows of cast iron and steel in casting and metallurgical magnetodynamic aggregates // Abstract No. 80 of the 10th PAMIR International Conference – Fundamental and Applied MHD, June 20-24, 2016, Cagliari, Italy.

14. В.И. Дубоделов, В.Н. Фиксен, В.А. Середенко, А.В. Ященко, А.О. Горшков, **А.Ю. Кизилова**, М.С. Горюк, А.А. Паренюк. Использование МГД-оборудования при получении алюминиевого литья для высокотехнологичной техники // 6-я Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее» (23-26 мая 2017 г., г. Днепр, Украина). – С. 71-72; V. Dubodelov, V. Fikssen, V. Seredenko, O. Yashchenko, A. Gorshkov, **A. Kizilova**, M. Goryuk, O. Parenjuk. Application of MHD-equipment production of aluminium casting for high-technology engineering // 6th International Conference “Space Technologies: Present and Future” (May 23-26, 2017, Dnipro City, Ukraine). – P. 164.

15. **A.Yu. Kizilova**, O.V. Yashchenko. MHD control of the heating and the movement of the melt in magnetodynamic aggregates for casting and metallurgy // Proceedings of the 9th International Conference of young scientists on Welding and Related Technologies, ISBN 978-617-7015-58-0. – May 23-26, 2017. – Kyiv, Ukraine. – P. 163-167.

16. В.И. Дубоделов, Н.А. Слажнев, К.С. Богдан, Ю.В. Моисеев, **А.Ю. Кизилова**. Автоматический контроль и диагностика состояния индукционных каналов литейных МГД-установок в процессе их эксплуатации // Материалы Юбилейной X Международной научно-практической конференции – 27-29 мая 2014 г., г. Запорожье, ЗТПП. – С. 63-66.

17. **А.Ю. Кизилова**. Обґрунтування концептуальних підходів реалізації динамічного контролю технологічних параметрів роботи магнітодинамічної установки // Материалы Юбилейной X Международной научно-практической конференции – 27-29 мая 2014 г., г. Запорожье, ЗТПП. – С. 269-272.

18. В.И. Дубоделов, А.Н. Смирнов, М.С. Горюк, В.К. Погорский, Ю.П. Скоробагатько, **А.Ю. Кизилова**, А.П. Верзилов, Ю.Ю. Кулиш. МГД-управление течением железоуглеродистых расплавов в литейных и металлургических магнитодинамических агрегатах // «Литье. Металлургия. 2016»: Материалы XII Международной научно-практической конференции (24-26 мая 2016 г., г. Запорожье, Украина). – С. 78-79.

19. В.И. Дубоделов, М.С. Горюк, В.Н. Фиксен, **А.Ю. Кизилова**, А.В. Ященко. МГД-управление нагревом и движением расплавов в литейных и металлургических магнитодинамических агрегатах // «Литье. Металлургия. 2017»: Материалы XIII Международной научно-практической конференции (23-25 мая 2017 г., г. Запорожье, Украина). – С. 57-58.

20. В.И. Дубоделов, В.Н. Фиксен, А.Н. Смирнов, М.С. Горюк, А.О. Горшков, А.В. Ященко, **А.Ю. Семенко**. Специализированные МГД-устройства для

управления движением расплавов при их обработке и разливе // «Литье. Metallургия. 2018»: Материали XIV Международной научно-практической конференции (22-24 мая 2018 г., г. Запорожье, Украина). – С. 78-79.

21. **А.Ю. Семенко.** Визначення потужності теплових втрат у магнітодинамічній установці для алюмінієвих сплавів // «Литво. Metallургія 2018»: Материали XIV Міжнародної науково-практичної конференції (22-24 травня 2018р., м. Запоріжжя, Україна). – С. 173-174.

22. **А.Ю. Семенко.** Оцінка потужності теплових втрат ливарного магнітодинамічного обладнання // «Нові ливарні технології і матеріали у машинобудуванні»: Материали VII Науково-практичної конференції молодих вчених України (29-30 травня 2018 р., м. Київ, Україна). – С. 47-49.

23. В.И. Дубоделов, А.В. Наривский, В.Н. Фиксен, А.Н. Смирнов, М.С. Горюк, К.С. Богдан, А.П. Верзилов, В.К. Погорский, **А.Ю. Семенко.** Новые разработки в области применения электромагнитных полей и магнитогидродинамических воздействий для получения сплавов и литых заготовок из них // Литво. Metallургія. 2019: Материали XV Міжнародної науково-практичної конференції (21-23 травня 2019 р., м. Запоріжжя) / Під заг. ред. д. т. н., проф. Пономаренко О.І. – Запоріжжя, АА Тандем. – С. 73-74.

Патенти:

24. Патент України № 111675. Магнітодинамічний спосіб нагріву і розливання металевих розплавів // МПК В22D39/00, Н05В6/02, Н05В6/06, Н05В6/20 // Заявл. 12.03.2015 р. № а201502162 // Слажнев М.А., Дубоделов В.І., Богдан К.С., **Кізілова А.Ю.** // (ФТІМС НАН України). – Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

АНОТАЦІЯ

Семенко А.Ю. Розробка принципів енергоресурсозберігаючого управління робочими параметрами ливарних магнітодинамічних установок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – «Ливарне виробництво». – Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого наукового завдання, яке полягає у підвищенні ефективності багатофункціонального ливарного магнітодинамічного обладнання за рахунок безперервного контролю його керуючих параметрів та управління основними технологічними процесами.

Розроблено та експериментально підтверджено методи дослідження роботи магнітодинамічної установки (МДУ) для алюмінієвих сплавів та визначення раціональних параметрів живлення її електромагнітних систем. На основі використання інтегрованої ваговимірювальної системи (ІВВС), були розроблені оригінальні методи з застосуванням інженерних розрахунків, математичного та фізичного моделювання, натурних експериментів, проведені дослідження комплексу електромагнітних силових взаємодій у МДУ при приготуванні та розливанні алюмінієвих сплавів.

В роботі встановлено та експериментально підтверджено пондеромоторні електромагнітні силові взаємодії в МДУ для алюмінієвих сплавів, досліджена динамі-

ка зміни теплових та гідродинамічних характеристик МДУ в різних режимах роботи та пов'язаними з ними параметрами ливарних технологічних процесів. Це дозволило оцінити співвідношення між складовими генерованої електромагнітної енергії, які витрачаються ефективно (теплова (65-80%) та гідродинамічна складова (8-11%)) або втрачаються безповоротно з різних причин (наприклад, реакція з конструкцією МДУ, що складає 5-6% загальної генерованої енергії). Це дає змогу в перспективі при створенні нових магнітодинамічних агрегатів враховувати особливості конструкції як окремих вузлів, так і всього пристрою в цілому.

Зроблено перерахунок вимірних пондеромоторних взаємодій в ефективну електромагнітну силу, що створює тиск та напір. Прорахована ефективна електромагнітна сила для створення електромагнітного тиску на рівні 30-35 кПа, який на 10-20% вище від паспортних даних існуючих серійних МДУ. Вона складає 23,55-31,84 Н.

Розраховано основні електричні параметри електромагнітних систем магнітодинамічної установки МДН-6А-0,63М для розливання алюмінієвих сплавів та визначено потужність теплових втрат у МДУ. Експериментально визначено: швидкість зміни температури розплаву в діапазоні системи регулювання (710-730 °С); встановлено параметри нагріву розплаву одним індуктором, двома індукторами та при їх почерговому включенні; теплові втрати МДУ в режимі «зберігання» розплаву масою 133,5 кг склали $P=21,92$ кВт. Стало можливим замінити дискретне управління роботою електромагнітних систем МДУ на аналогове, що дозволить суттєво скоротити енерговитрати при виготовленні лиття.

Проведені експериментальні дослідження на фізичній моделі МДУ з вагодуючим зливним жолобом. Визначено раціональний інтервал співвідношення маси розливаної порції металу та миттєвого значення масової витрати при її розливанні (2,20-2,25) та відповідний інтервал напруги живлення електромагніта МДУ з метою мінімізувати вплив пульсацій струменя на точність дозування за рахунок зменшення їх амплітуди. Похибка дозування не перевищує 1,5% від маси дози при розливанні малих порцій розплаву (маса 1,5-3 кг).

Розроблено принципові підходи та запропоновано оригінальні технічні рішення щодо системи автоматичного контролю для безперервного розливання металевих розплавів на основі створюваного двокамерного магнітодинамічного проміжного ковша.

Порівняння розроблених елементів САУ МДУ з традиційними технологіями управління приготуванням та розливанням сплавів свідчить, що запропонований спосіб і агрегати для його реалізації дозволяють за рахунок скорочення кількості різних окремих видів технологічного обладнання забезпечити розвиток сучасних процесів лиття. При цьому загальний очікуваний економічний ефект від застосування запропонованих розробок складе у середньому 65,6 \$ на 1 т лиття з алюмінієвих сплавів (при середній вартості 1 т якісного алюмінієвого лиття у розмірі 4700 \$), у т. ч. за рахунок збільшення виходу придатного лиття у розмірі 23,67 \$/1 т, за рахунок скорочення енерговитрат – до 42 \$/1 т. Додаткова економія може бути досягнута за рахунок вказаних статей і окремих статей капітальних витрат, зокрема, при скоро-

ченні числа тензOMETричних датчиків у складі ІВВС та/або при заміні дискретної системи управління МДУ на аналогову.

Ключові слова: ливарне магнітодинамічне обладнання, інтегрована ваговимірювальна система, алюмінієві сплави, температура, розливання, режими роботи, математичне та фізичне моделювання, система автоматичного контролю та управління.

ABSTRACT

Semenko A. Development of energy and resources saving principles to control of working parameters of casting magnetodynamic installations. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis on acquisition of scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.16.04 – Foundry production. – Physico-technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of important scientific task, which is increasing with efficiency of multifunctional casting magnetodynamic equipment by continuous control of its control parameters and of the basic technological processes.

The methods of studying the work of of magnetodynamic installation (MDI) for aluminum alloys and determination of rational power parameters of its electromagnetic systems has been developed and experimentally confirmed. On the basis of the use of the integrated weighing system (IWS), original methods were developed using engineering calculations, mathematical and physical modeling, field experiments, studies of the complex of electromagnetic force interactions in MSU during the preparation and casting of aluminum alloys.

In this work, ponderomotor electromagnetic force interactions in MDI for aluminum alloys were established and experimentally confirmed, dynamics of change of thermal and hydrodynamic characteristics of MDI in different modes of operation and related parameters of foundry technological processes were investigated. This made it possible to estimate the ratio between the components of the generated electromagnetic energy, which are efficiently consumed (thermal (65-80%) and hydrodynamic component (8-11%)) or lost irreversibly for various reasons (for example, reaction with the design of MDI, which is 5-6 % of total energy generated). This makes it possible to take into account the design features of both individual aggregates and the whole device in the future when creating new magnetodynamic aggregates.

The measured ponderomotor interactions are converted into effective electromagnetic force, which creates pressure and liquid metal head. The effective electromagnetic force was calculated for generation of electromagnetic pressure up the level of 30-35 kPa, which is 10-20% higher than the passport data of the existing series of MDI. It is 23.55-31.84 N.

The basic electrical parameters of electromagnetic systems of magnetodynamic installation MDN-6A-0,63M for casting of aluminum alloys are calculated and the power of thermal losses in MDI was determined. Experimentally determined: the rate of change of the melt temperature in the range of the control system (710-730 °C); the parameters of heating of the melt by one inductor, two inductors are set and at their alternate switching

on; MDI thermal losses in the "holding mode" of the melt weighing 133.5 kg amounted to $P = 21,92$ kW. It became possible to replace the discrete control of MDI electromagnetic systems for the analog, which will significantly reduce the energy consumption in the casting.

Experimental model surveys were carried out on the physical model of MDI with a mass dispensing inclined chute. The rational interval of the ratio of the mass of the cast portion of the metal and the instantaneous value of the mass flow rate during its casting (2.20-2.25) and the corresponding interval of the supply voltage of the electromagnet of MDI were determined in order to minimize the influence of the ripple of the jet on the metering accuracy by reducing their amplitude. The dosage error does not exceed 1.5% by weight of the dose when pouring small portions of the melt (weight 1.5-3 kg).

Principal approaches have been developed and original technical solutions for the automatic control system for continuous casting of metallic melts based on the created two-chamber magnetodynamic tundish ladle have been proposed.

Comparison of the developed elements of the ACS MDI with the traditional control technologies of preparation and casting of alloys shows that the proposed method and units for its implementation allow for the reduction of the number of different types of technological equipment to ensure the development of modern casting processes. In this case, the total expected economic effect from the application of the proposed developments will average \$ 65.6 per 1 ton of casting of aluminum alloys (at an average cost of 1 ton of quality aluminum casting in the amount of \$ 4700), including by increasing the yield of suitable casting in the amount of \$ 23.67 / 1 ton, by reducing energy consumption - up to \$ 42/1 ton. Additional savings can be achieved by the specified articles and separate capital expenditure items, in particular, by reducing the number of strain gauges in the IWS and / or when replacing discrete systems and control of MDI on analog.

Keywords: foundry magnetodynamic equipment, integrated weighing system, aluminum alloys, temperature, casting, operating modes, mathematical and physical modeling, automatic control system.