

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Г. Є. Монастирський

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

(код і назва)

на тему: **Електромагнітна система вихрового обертального руху рідкого металу для відбивної печі: вплив приєднання напірного каналу під кутом $\Theta = 45^\circ$**

Виконав: студент 4 курсу, групи ФФ-83

Єлісеєв Іван Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник к.т.н., ст. в. каф. ПФ Доник Т.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант проф. н.с. ІЕД НАНУ, д.т.н. Гориславець Ю. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент доц. каф. ПФ, к.ф-м.н. Пономаренко С. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Національний Технічний Університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Науково-навчальний Фізико-технічний інститут
Кафедра прикладної фізики

Рівень вищої освіти — перший (бакалаврський)
Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

«ЗАТВЕРДЖЕНО»

В. о. завідувача кафедри

_____ Монастирський Г. Є.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
на бакалаврську роботу студенту

_____ Єлісєєву Івану Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

1. Тема роботи: Електромагнітна система вихрового обертального руху рідкого металу для відбивної печі: вплив приєднання напірного каналу під кутом $\Theta = 45^\circ$,
науковий керівник роботи _____ к.т.н., ст. в. каф. ПФ Доник Т.В. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 2022 р №
2. Термін подання студентом роботи « ____ » _____ 2022 р.
3. Об'єкт дослідження: вихровий обертальний рух металу у вихровій камері створений електромагнітним методом
4. Предмет дослідження: електромагнітні, гідродинамічні та теплові процеси при вихровому русі рідкого металу у відбивній печі і вихровому каналі
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести аналіз наявних методів для плавки та перемішування металу; побудувати та описати принципово нову схему створення вихрового обертального потоку рідкого металу для відбивної печі; зробити огляд особливостей мультифізичного моделювання; побудувати геометричну модель установки; побудувати математичну модель за допомогою програмного забезпечення COMSOLE Multiphysics 6.0.; проаналізувати отримані результати моделювання; зробити висновки
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація — n аркушів А4

7 Орієнтовний перелік публікацій: І.М.Єлісеєв, Т.О. Пеньковий – Моделювання електромагнітної системи вихрового обертального руху рідкого металу для відбивної печі / І.М. Єлісеєв, Т.О. Пеньковий, Т.В. Доник, А.А. Халатов // Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 118 – 121

8 Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
2	пров. н.с. ІЕД НАНУ, д.т.н. Гориславець Ю. М.		
3	пров. н.с. ІЕД НАНУ, д.т.н. Гориславець Ю. М.		

9 Дата видачі завдання « 10 » вересня 2021 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Опрацювання літератури за темою	13.09.2021 - 30.12.2021	Виконано
2.	Моделювання відбивної печі з вихровою камерою у 2D постановці	10.01.2022 - 24.02.2022	Виконано
3.	Написання другої частини дипломної роботи	24.02.2022 - 24.03.2022	Виконано
4.	Моделювання відбивної печі з вихровою камерою у 3D постановці	24.03.2022 - 21.04.2022	Виконано
5.	Підготовка тез	21.04.2022 - 01.05.2022	Виконано
6.	Написання третьої частини дипломної роботи	01.05.2022 - 28.05.2022	Виконано
7.	Написання висновків	28.05.2022 - 15.06.2022	Виконано
8.	Виступ на конференції	15.06.2022	Виконано
9.	Подання роботи на рецензування	16.06.2022	Виконано
10.	Підготовка доповіді та презентації	16.06.2022 - 22.06.2022	Виконано
11.	Подання роботи до захисту	23.06.2022	

Студент

(підпис)

І. М. Єлісеєв

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник роботи

(підпис)

Т.В. Доник

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломної роботи за обсягом становить 51 сторінок, містить 1 таблицю та 23 рисунка. Для дослідження було використано 21 бібліографічних найменувань.

Темою роботи є електромагнітна система вихрового обертального руху рідкого металу для відбивної печі: вплив приєднання напірного каналу під кутом $\Theta = 45^\circ$

Метою роботи є розглянути можливість використання електромагнітної системи перемішування металу для відбивної печі, та приєднання до такої системи вихрової камери. Проаналізувати можливість створення і використання такої системи на прикладі відбивної печі.

Об'єктом дослідження є вихровий обертальний рух металу у вихровій камері створений електромагнітним методом.

Предметом дослідження є електромагнітні, гідродинамічні та теплові процеси при вихровому русі рідкого металу у відбивній печі і вихровому каналі.

Методом дослідження обрано комп'ютерне моделювання з використанням комерційного пакета COMSOL Multiphysics 6.0.

Результати розрахунків показали, що підключення вихрової камери до відбивної печі під кутом $\Theta = 45^\circ$, потік в якому забезпечує шестиполосний дуговий індуктор створює необхідну воронку металу у камері печі, а також забезпечує належне перемішування рідкого металу у ванні відбивної печі. Швидкість потоку розплаву лінійно залежить від амплітудного значення сили струму в котушках, для досліджуваного діапазону.

Ключові слова: *числове моделювання, магнітогідродинаміка, відбивна піч, електромагнітний перемішувач, вихрова течія металу, натискний канал.*

SUMMARY

The diploma work explanatory note includes 51 pages of the text, 1 tables and 23 illustrations. At the problem modern state analysis, overall 21 references were used.

The theme of the work is Electromagnetic system of vortex circulating flow of liquid metal for reverberatory furnace: the influence of pressure channel with an angle $\Theta = 45^\circ$.

The aim of this work is to consider the possibility of using an electromagnetic metal stirring system for a reverberatory furnace and connecting a vortex chamber to such system. Analyze the possibility of creating and using such a system on the example of a reverberatory furnace.

The object of research is the vortex rotational motion of metal in a vortex chamber created by the electromagnetic method.

The subject of research is electromagnetic, hydrodynamic and thermal processes in the vortex motion of liquid metal in the chopper and vortex channel.

The method of research is computer simulation using the commercial package COMSOL Multiphysics 6.0.

The calculation results showed that the connection of the vortex chamber to the reverberatory furnace at an angle $\Theta = 45^\circ$, the flow in which provides a six-pole arc inductor creates the necessary metal funnel in the furnace chamber, and provides proper mixing of liquid metal in the bath furnaces. The flow rate of the metal linearly depends on the amplitude value of the current in the coils for the range under study.

Key words: *numerical simulation, magnetohydrodynamics, reverbetatory furnace, electromagnetic stirrer, circulating flow of metal, pressure channel.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. Теоретичні засади проблеми	7
1.1. Необхідність перемішування рідкого металу.	7
1.2. Проблематика перемішування рідкого металу.	8
1.3. Різновиди плавильних печей та агрегатів.	10
1.4. Різновиди перемішування розплаву.	17
1.5. Висновок до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2. Комп'ютерне моделювання вихрового потоку	22
2.1. Вибір програмного пакету	22
2.2. Геометрична модель	23
2.3. Математична та числова модель	26
2.3.1. Рівняння гідродинаміки	26
2.3.2. Рівняння електродинаміки	28
2.3.3. Рівняння енергії	30
2.4. Комп'ютерна модель	31
2.4.1. Спрощення і припущення.	31
2.4.2. Початкові та граничні умови	33
2.4.3. Розрахункова сітка	34
2.5. Висновки до розділу 2	36
РОЗДІЛ 3. Результати моделювання та їх аналіз	38
3.1. Дослідження впливу сили струму в котушках на перемішування металу	38
3.2. Дослідження теплового стану розплаву при електромагнітному перемішуванні	42
3.2.1. Дослідження потоку рідкого металу в об'ємі печі	43
3.2.2. Дослідження потоку рідкого металу у вихровій камері	44

3.3. Висновки до розділу 3	47
ВИСНОВКИ.	49
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	50

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Pr – число Прандтля;

CFD – Обчислювальна гідрогазодинаміка (галузь гідромеханіки);

RANS – моделювання на базі усереднених рівнянь Нав'є-Стокса;

2D – двовимірне математичне представлення об'єкту;

3D – тривимірне математичне представлення об'єкту.

ВСТУП

Алюміній в нинішньому світі використовується в багатьох сферах нашого життя, починаючи від алюмінієвих банок з під напоїв до літакобудівельної сфери і ракетобудівних проєктів. Потреба в алюмінієвих виробках щороку росте. Позитивною є властивість алюмінію на його вторинну переробку, тобто переплавлення в інші вироби. На даний момент виробництво вторинного алюмінію займає 35% від загального об'єму виготовленої сировини.

В Україні відсутнє виробництво первинного алюмінію, тому потреба в якісній переплавці алюмінієвих відходів стоїть особливо гостро. Найефективніший метод для плавки легковажної шихти можна вважати методом вихрового обертального руху ("vortex flow"). Його суть полягає в утворенні вихрової воронки рідкого металу, в яку засипається подрібнена алюмінієва стружка, або шихта. Наразі даний метод плавки потребує детального дослідження, адже це доволі нова розробка.

Для інтенсифікації процесу переплавки алюмінію в сучасних металургійних установках необхідно забезпечувати перемішування рідкого металу під час процесу плавки та позапічної обробки. На даний момент найбільш ефективним способом перемішування є електромагнітне перемішування. Воно реалізується завдяки індукторам.

Завдяки поєднанню методу вихрового обертального руху та електромагнітного перемішування можна досягти ефективного плавлення та перемішування алюмінію у плавильній печі. Такі системи в літературі не зустрічаються, тому потребують дослідження.

У цій роботі буде розглядатись можливість поєднання камери вихрового обертального руху металу разом з плавильною піччю, перемішування рідкого металу в якій, створюється за допомогою електромагнітного методу перемішування, та оцінка визначальних параметрів цієї системи.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРОБЛЕМИ

1.1. Необхідність перемішування рідкого металу.

Необхідність перемішування рідкого металу.

Не важко здогадатись, що процес плавлення є найбільш важливим та відповідальним з усіх процесів у ливарній справі й металургії під час виробництва будь-яких металевих виробів різного рівня складності. Часто, під час плавлення самого металу, це призводить до окислення та перегрівання рідкого металу, а це погіршує його якість. Для ефективного підвищення процесу плавлення металу, яке спрямовано на зменшення степені його перегрівання та зменшення часу його плавлення, застосовують інтенсифікацію теплообміну. Серед них може бути зміна геометрії або й навіть конструкції плавильного агрегату, підвищення інтенсифікації шляхом збільшення витрат електроенергії, або перемішування. Крім інтенсифікації теплообміну, інтенсифікуються інші теплові процеси, а також хімічні і дифузійні, які допомагають з: гомогенізацією складу металу (хімічного складу), забезпеченням однорідності в об'ємі розплаву, усередненням температури розплаву, видаленням непотрібних або шкідливих домішок та швидкості плавлення твердих легуючих добавок.

Зараз, у металургійному виробництві, перемішування розплавленого металу є найефективнішим методом підвищення та покращення його якості. Після проведення цієї необхідної й успішної процедури технологічного плавлення, над металом буде здійснена низка інших технологічних процесів, таких як: виготовлення литих композиційних матеріалів, рафінування, формування різних видів заготовок, модифікування, легування та багато інших. Цікавим є те, що перемішування рідкого металу у ливарній справі, впливає на мікроструктуру

сплавів та металів, для тих які кристалізуються, а це, в свою чергу, покращує якість металевих виробів.

На рис.1.1 [1] зображено вплив перемішування на тепловий стан рідкого металу в металургійному плавильному агрегаті.

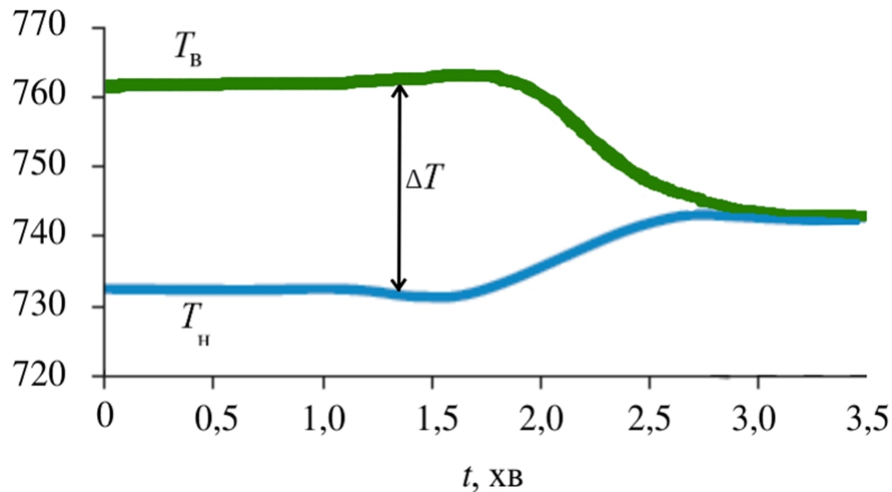


Рис. 1.1. Значення температури на поверхні та дні металевого розплаву (Алюмінію) при перемішуванні у металевій ванні/ковші [11]

Де: T — температура розплаву у металургійному плавильному агрегаті, $T_{\text{в}}$ — температура на верхній поверхні розплаву у металургійному плавильному агрегаті, $T_{\text{н}}$ - температура на нижній поверхні розплаву у металургійному плавильному агрегаті, ΔT — різниця температур $T_{\text{в}}$ і $T_{\text{н}}$, що відповідає перегріву, t — час. Процес перемішування починається, приблизно, при $t=1.5$ хв, і у 2.5-3 хв досягається однорідність рідкого металу за температурою, тобто ΔT є мінімальною. Тобто цей процес допомагає нам уникнути перегріву у різних шарах рідкого металу під час плавлення й усереднює його температуру.

1.2. Проблематика перемішування рідкого металу.

На даний час для покращення якості розплаву, що широко використовується в ливарній і металургійній промисловості, є розробка технологій, та їх впровадження, які найбільш ефективно будуть дозволяти перемішувати рідкий

метал. В свою чергу перемішування, покращує та пришвидшує дифузійні(хімічні) та теплові процеси, які покращують гомогенізації розплаву, майбутнього сплаву, пришвидшують розчинення інших твердих добавок, краще усереднює температуру розплаву та очищає розплав від шкідливих домішок [2].

Ця проблема стосується багатьох видів печей, а особливо стосується тих печей, яким притаманне поверхнєве нагрівання рідкого металу, та в яких повністю відсутні штучні або природні механізми передачі теплообміну між різними шарами рідкого металу, а саме від сильно перегрітих верхніх шарів до нижніх. Розташування перегрітих шарів може змінюватись від технологій плавлення або архітектури самої печі. Тобто, якщо не забезпечувати ретельне перемішування розплаву - це може призвести до погіршення фізичних та хімічних властивостей майбутньої заготовки, вона може бути не придатна для цілі використання, бо не відповідає очікуваному результату та якостям, які повинні бути їй притаманні. До заготовки можна віднести майбутній продукт або виріб, для якого ще необхідно провести у певну обробку.

При сильному нагріванні заготовки, для подальшої обробки, у ній можуть з'являтися дефекти різної природи, такі як чад або окалиноутворення, великі витрати самого матеріалу, зневуглецьовування.

Чад або окалиноутворення - це утворення оксидів при нагріванні металу або заготовки. Окалина - нетривка та досить крихка речовина, яка складає тільки 30 % заліза. Чад - у результаті утворення окалини сягає від 4 до 5 % від маси заготовки. Зневуглецьовування - відбувається водночас з окисленням ті виражається у вуглецю, при нагріванні наприклад сталі, який вигорає і заготовка втрачає свою міцність.

1.3. Різновиди плавильних печей та агрегатів.

Плавильні агрегати або печі можуть працювати по-різному, залежить саме від типу технологічного процесу, який повинен бути виконаний: в режимі видачі, тобто коли метал виходить з печі для подальшої обробки, плавлення або просто накопичення розплаву [3].

Крім того, розрізняють такі плавильні печі, що можуть бути використані безпосередньо для плавлення або позапічної обробки рідкого металу при отриманні різних виливок з кольорових або й чорних металів і їх сплавів:

- шахтні печі (вагранки та доменні печі)
- електронно-променеві
- електрошлакові та електродугові печі
- плазмові печі
- індукційні печі (канальні та тигельні печі)
- відбивні печі (рідкопаливні полум'яні та газові печі, електричні печі опору)

Перемішування розплаву здійснюється у майже у всіх визначених типах печей. У деяких печах перемішування виникає примусово, бо у них може не бути механізмів, які б спричиняли рух рідкого металу, а у деяких це відбувається автоматично, без застосування інших спецпристроїв, або можуть бути особливістю технологічного процесу плавки металу.

Детальніше про печі **шахтного типу**: у цих агрегатах процес перемішування розплаву не має практичного інтересу, бо перемішування розплаву відбувається у накопичувачах, але частіше за все з цих печей буде подаватись до установки позапічної обробки металу, де і буде організовуватися процес перемішування [4].

Перемішування розплаву в **електронно-променевих** агрегатах відбувається електромагнітним способом. У електронно-променевих печах плавлення

відбувається за допомогою перетворення кінетичної енергії електронів, які прискорені у електростатичному полі, в теплову енергію, бо при їх зіткненні з об'єктом – він нагрівається. Глибина ванни розплаву є не глибокою, це відбувається внаслідок відсутності примусового перемішування й поверхневого нагрівання [5].

Цікавим є те, що при збільшенні потужності нагрівання може спостерігатися тільки зростання витрати енергії, тобто не отримується більшого об'єму розплаву, це пов'язано з випаровуванням і випроміненням металу. Це і є головним мінусом даної установки. Схематичне зображення електронно-променевого агрегату можна подивитись на рис.2 [6], де: 1 - електронна гармата; 2 - електронний промінь; 3 - злиток, що розплавляється; 4 - водоохолоджуема гарнісажна піч; 5 - рідка сталь; 6 - патрубок; 7 - патрубок.

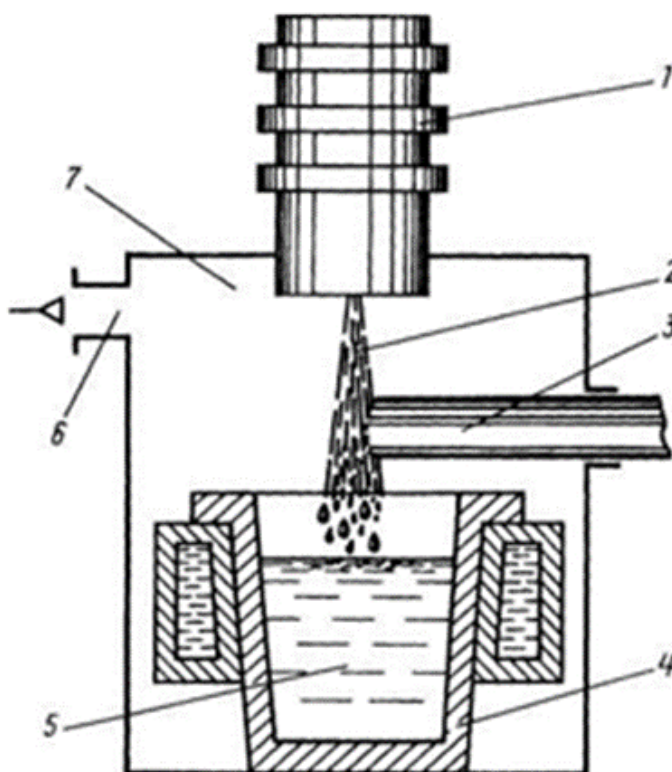


Рис. 1.2. Схема електронно-променевої печі з горизонтальною подачею злитка.

У електродугових та електрошлакових печах рідкий метал виступає у вигляді провідника електричного струму. У електродугових печах джерелом тепла є електрична дуга, що горить між металом і електродом, у електрошла-

кових печах – це робочий струм, який може проходити через шар шлаку. Ця відмінність технологічної плавки полягає у тому, що взаємодіючий з власним магнітним полем, струм, який протікає у об'ємі рідкого металу і приводить його до руху. Характер руху розплаву відрізняється один від одного у цих печах тим, що азимутальний рух притаманний тільки для електродугової печі, а осьовий - для електрошлакової печі. Крім того значний вплив може створювати явище термогідравлічної конвекції на інтенсивність і характер руху в електродугових та електрошлакових печах. Схему руху рідкого металу у електрошлакових(б) та електродугових(а) печах зображено на рис.1.3 [7].

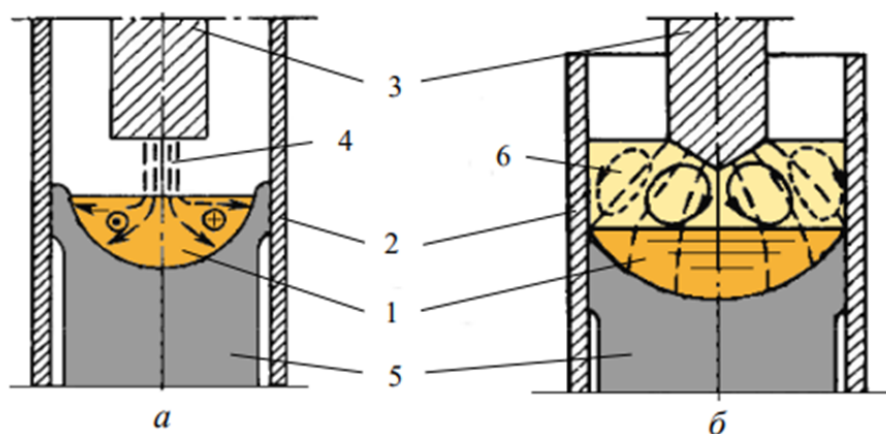


Рис. 1.3. Схема руху рідкого металу у електродугових(а) та електрошлакових(б) печах, де: 1 – рідкий метал; 2 – ємність (тигель, кристалізатор); 3 – електрод; 4 – дуга; 5 – злиток; 6 – рідкий шлак.

Плавлення у електродугових печах достатньо сильно схоже з плавленням сплавів або металів за технологією **плазмової плавки**. Основна різниця лиш у тому, що при плазмовій плавці, під час самого процесу плавлення відсутнє будь-яке перемішування. Тобто виходить, що необхідним є штучний або природний механізм перемішування, його циркуляції у установці. Воно може бути досягнуто за рахунок електромагнітних сил, майже так само як відбувається перемішування у електронно-променевих печах. Існують такі плазмові печі, у яких метал, що знаходиться у тиглі, який буде піддаватись

подальшій обробці, є оточеним індуктором. Індуктор використовується для нагрівання і перемішування розплаву.

У **індукційних тигельних печах** тепло виділяється внаслідок індукованих струмів, тобто їх протікання в об'ємі розплаву [7]. Первинний струм у цих печах, що протікає в самому індукторі, утворює магнітне поле, що індукує в об'ємі рідкого металу вихрові струми. Вторинні вихрові струми і результуюче магнітне поле взаємодіють, внаслідок чого здатні викликати циркуляцію розплаву за допомогою виникаючої об'ємної сили Лоренца. Оскільки індукційні тигельні печі живляться однофазним струмом, то в об'ємі рідкого металу будуть виникати радіальні електромагнітні сили, внаслідок чого відбувається двоконтурний рух розплаву тороїдної форми. Схема індукційної тигельної печі з однофазним живленням представлена на рис.1.4 [8], де 1 - рідкий метал; 2 - соленоїд з водоохолоджуваної трубки; 3 - стяжки; 4 - тигель.

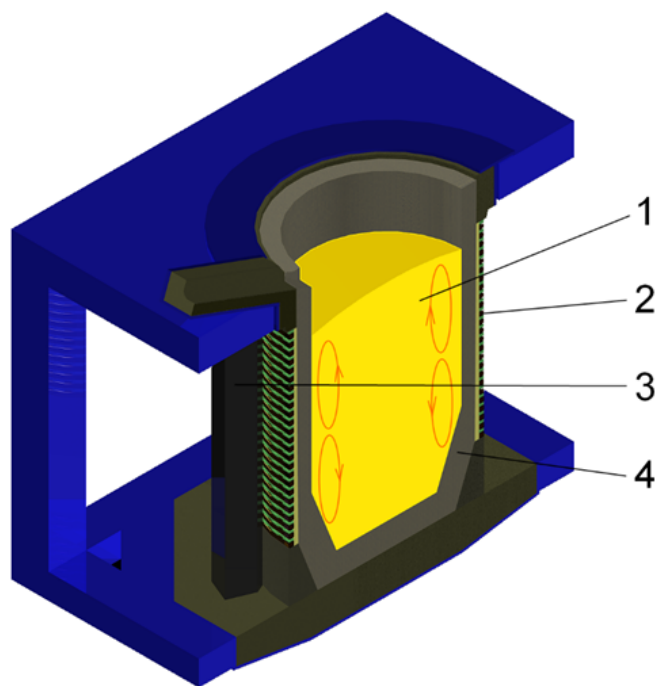


Рис. 1.4. Схема індукційної тигельної печі та характер руху розплаву.

Як видно з рисунку, виникають два, верхній та нижній, контури вихрового руху рідкого металу в процесі плавлення. При чому цей рух має турбулентний

характер і є дуже інтенсивним, крім того сила струму пропорційна швидкості руху розплаву. Так, наприклад, розплав під час інтенсивної поверхневої циркуляції, коли плавиться алюміній, сильно забруднюється та окислюється, що вимагає зменшити його інтенсивну циркуляцію за допомогою переміщення індуктора відносно тигля.

Індукційні каналні печі працюють як силові трансформатори у режимі короткого замикання. Тобто, струм, який протікає по ланцюгу викликає нагрівання металу. Метал нагрівається за рахунок теплообміну між ванною та каналом. Переміщення металу відбувається за рахунок електродинамічних сил, які виникають спочатку у каналі, та за рахунок конвекції, яка виникає під час перегріву металу. Стабільна робота печі потребує постійно замкнутого ланцюгу, тому метал повністю й не зливають, а лиш частину, після чого відбувається дозавантаження. Усі індукційні каналні печі працюють з залишковою кількістю металу, ця кількість може становити від 20% до 50% від повної ємності печі, крім того вона забезпечує постійне заповнення каналу розплавом.

Конструктивні особливості даної печі полягають у тому, що у об'ємах, де знаходиться метал і виділяється тепло – роз'єднані. У каналах виділяється основна частина тепла, а безпосередньо у ванні відбувається плавлення, що призводить до зменшення температури металу у ванні. Основною задачею цих печей є забезпечення та створення умов для ефективного теплообміну між ванною та каналами, для уникнення перегріву. При малій інтенсивності теплообміну метал у каналах буде перегріватись, а це може призвести до поламки печі.

Створення транзитної течії розплаву у каналі печі є одним з найефективніших методів інтенсифікації зазначених процесів, за якою метал з ванни потрапляє в канал через одне гирло і залишає його через інше. Схема індукційної каналної печі буде зображено на рис.1.5 [9], де: 1 - стержень замкнутого магнітопроводу; 2 - футерований ванни; 3 - маса металу; 4 – індуктор; 5 - плавильний канал; 6 - подовий камінь; 7 - циліндричний отвір;

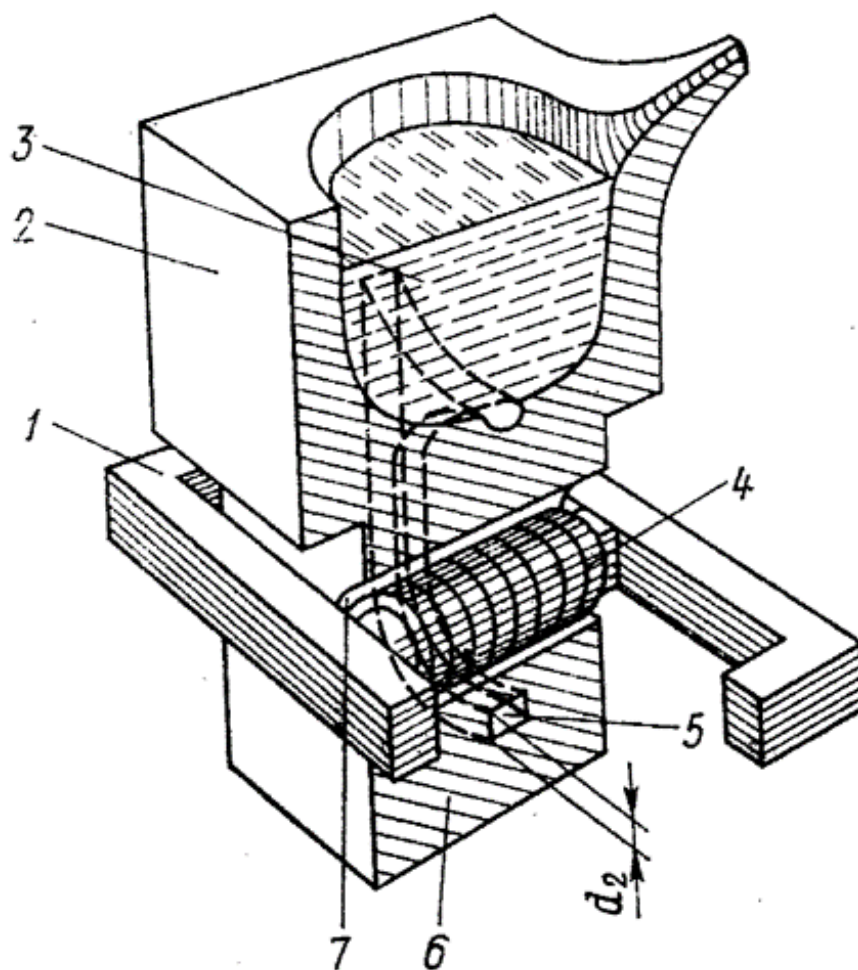


Рис. 1.5. Схема індукційної каналної печі.

Наступним методом для підвищення ефективності перемішування є застосування додаткової електромагнітної системи з розімкненим магнітопроводом, між полюсами, в зазорі якого є канал з рідким металом. Магнітний потік створює електромагнітний тиск, що і призводить до циркуляції розплаву. Магнітний потік у свою чергу пронизує канал з металом та взаємодіє зі струмом у каналі.

Металургійні агрегати, де сировина піддається обробці та плавленню та відсутній прямий контакт з джерелом нагрівання називаються **відбивними печами**. Вони бувають безперервної та періодичної дії. У періодичних відбивних печах шихта подається періодично, у кінці процесу вся плавка виходить з агрегату, а у безперервній відбивній печі завантаження та плавка відбувається протягом всієї плавки.

Тепло, у таких установках надходить до сировини, тобто металу, від нагрівальних елементів шляхом випромінювання, яке може прямо до нього надходити або й відбиватися від стінок самого агрегату. Крім того дана піч вважається агрегатом підвищеного об'єму й майже завжди працює у режимі позапічної обробки розплаву. Недоліками відбивних печей є їх велика площа, яка контактує з навколишнім середовищем, що в свою чергу підвищує інтенсивність процесів окиснення та поверхневе нагрівання.

Технологія відбивних печей зроблена таким чином, що у них абсолютно відсутні шляхи теплообміну між шарами рідкого металу, від самих верхніх шарів до найнижчих. Тому в цих печах необхідне перемішування, щоб уникнути негативних чинників.

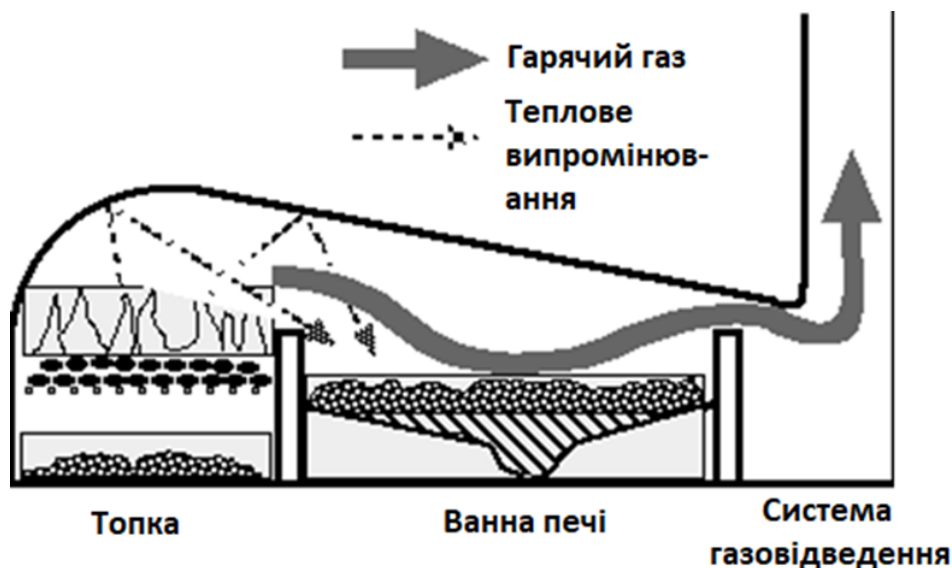


Рис. 1.6. Схематичне зображення відбивної печі.

Сплав у відбивних печах починає нагріватись лише біля поверхні, це говорить про те, що треба нагріти й інші шари металу, які знаходяться нижче. Оскільки виникає така необхідність, то ванну печі роблять неглибокою та з широкою поверхнею. Але це призводить до значного вигорання рідкого металу. Гази у печі стискаються з рідким металом, тому він може виходити забрудненим через місцеве перегрівання. Тому у цьому місті і виникає необхідність перемішування розплаву. Схему відбивної печі буде зображено на рис.1.6 [10].

Сучасним і прогресивним напрямком в плавці металу є, так звана, **вихрова система** плавки металу (англ. «vortex flow») [Fluid modeling of the flow and free surface parameters in the Metallurgical LOTUSS system]. Головною відмінністю даного методу є можливість плавки легковажкої шихти (металева стружка, алюмінієві банки тощо). Ідея полягає в тому, щоб плавити подрібнені частки металу у воронці, яка утворюється в циліндричній камері, внаслідок швидкого руху металу. В результаті роботи менше металу вигорає при плавці, а також зменшується шанс утворення оксидного шару. Така система є зовсім нова і потребує детального вивчення та вдосконалення.

1.4. Різновиди перемішування розплаву.

Далі будуть розглянуті різні способи перемішування рідкого металу або розплаву в металургійних та ливарних агрегатах:

- механічні;
- газодинамічні;
- електромагнітні.

При **механічному перемішуванні** використовують занурювальні мішалки різної геометрії та насос, який забезпечує роботу мішалок. Різновиди геометрії мішалок зображено на рис.1.7 [11]. Перемішування відбувається безпосередньо з контактної взаємодії перемішуючих елементів і металу. Така система перемішування, механічні насоси і мішалки, були найпоширенішими пристроями перемішування, до сьогодні для перемішування різних сплавів та рідких металів, наприклад алюмінію.

Головною перевагою даного методу є невисока ціна, мобільність, універсальність, тобто змога використовувати більше ніж для однієї печі. Застосування цього методу супроводжуються з труднощами щодо їх установки. Оскільки

механічні насоси мають прямий, контакт з рідким металом, то це призводить до частого ремонту та заміни деталей.

Особливу увагу приділяють контролю роботи насосу, щоб уникнути попадання повітря, шлаку, окислювальних продуктів, а також контролю рівня рідкого металу, що переміщується, контроль попереднього прогрівання обладнання перед установкою та перемішування тугоплавких металів. У більшості випадків механічні насоси використовують для агрегатів плавлення відкритого типу, для агрегатів плавлення закритого типу використовують зовсім інше обладнання.

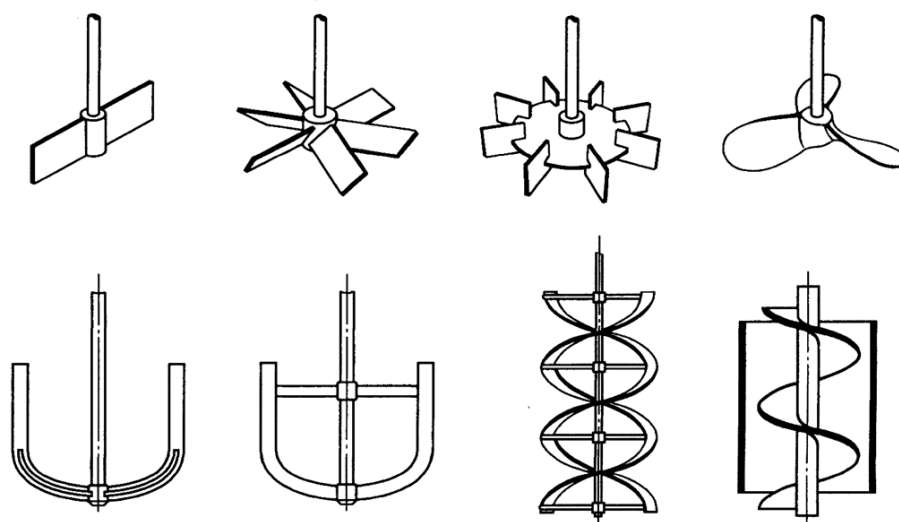


Рис. 1.7. Різновиди геометрії мішалок.

За допомогою інжектування активних, інертних газів (наприклад, метану) через пористі блоки, сопла, вставки, фурми, трубки у рідкий метал, у плавильному агрегаті, реалізується спосіб перемішування рідкого металу, який називається **газодинамічним**. Приклади установок, що використовують газодинамічний спосіб перемішування рідкого металу буде зображено на рис.1.8 [12]. Принцип дії цього способу полягає у виштовхуванні з газових каналів бульбашок газу у товщу розплаву, далі під дією механічних сил змушують рідкий метал рухатись вгору. Важливим є те, що виштовхування газу у рідкий метал буде відбуватися для дефосфоризації або десульфуризації та його

дегазації, перемішування є другорядним ефектом. Цей спосіб перемішування широко відомий та розповсюджений при позапічній обробці рідкого металу в електродугових плавильних агрегатах.

Перевагами даного методу є можливість видалити шлак, шкідливі домішки або якихось інших небажаних мікрочлукень з рідкого металу та отримати велику інтенсивність циркуляції розплаву, користуючись таким способом перемішування.

Недоліками газоподібного методу перемішування рідкого металу є сильне вдування газу у рідкий метал, що призводить до вздуття верхньої поверхні металу, а та в свою чергу може оголитися від окислів, шлаків шкідливих домішок і мікрочлукень, що призведе до повторного окислення та всмоктування їх назад у рідкий метал. Характер руху розплаву у плавильному агрегаті може значно змінюватись, це залежить від типу каналу, по якому вдується газ.

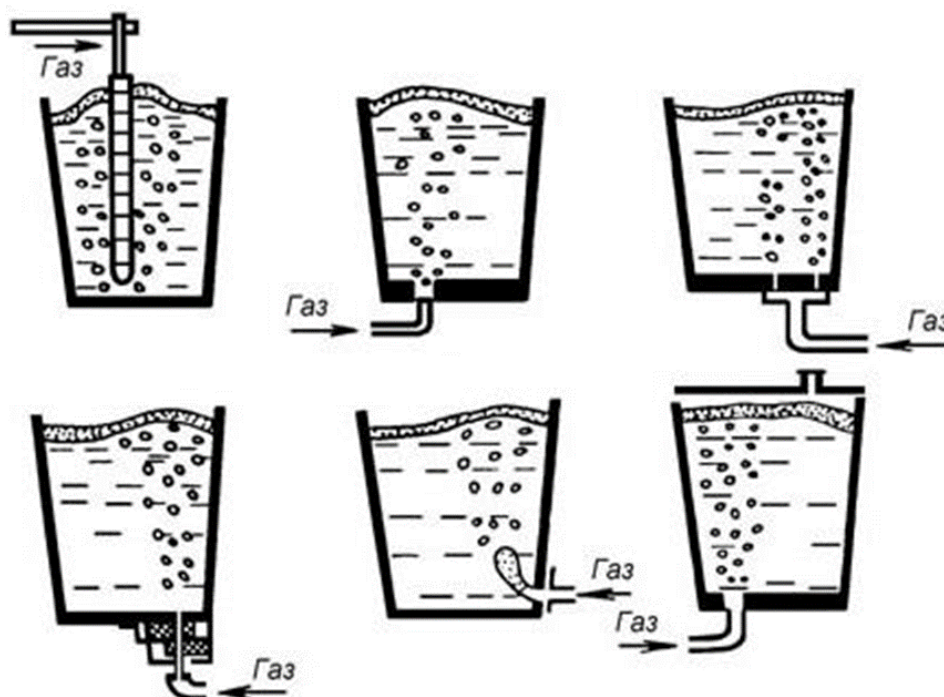


Рис. 1.8. Схема газодинамічного способу перемішування чавуну.

Електромагнітне перемішування рідкого металу є найефективнішим способом перемішування на сьогоднішній день, яке працює за допомогою складних електромагнітних систем, де достатньо широко почали використовуватись

індукційні системи, що базуються на основі лінійних індукторів біжучого магнітного поля [2].

Воно ґрунтується на періодичній силовій дії біжучого і пульсуючого магнітних полів, які створені універсальними індукторами при їх живленні багатofазними та однофазними струмами. Якщо встановити такий індуктор до бокової стінки плавильної печі, то дія, для біжучого магнітного поля, може призвести до створення одноконтурної вихрової течії розплаву у ванні печі. Крім того пульсуюче поле створює двоконтурну течію. За рахунок почергової зміни структури течії розплаву металу, суттєво збільшується ефективність перемішування.

Перевагами цього способу можна назвати індукційну взаємодію з рідким металом, яка є безконтактно, що в залежності від геометричних параметрів печі та конфігурації електродів він може відбуватися без додаткових пристроїв, тобто без застосування контактуючих механізмів, таких як фурми, каналів та мішалок, з розплавом, крім того надійність цього способу перемішування, виділення енергії у самому розплаві й додаткова можливість його підігріву, здатність комбінувати його з іншими методами та способами, наприклад комбінування фізико-хімічного впливу на розплав, тобто обробка різними реагентами, нагрівати іншими джерелами, можливо зовнішніми, продування рафінуючими газовими середовищами, вакуумування, також зміна та регулювання напрямку руху рідкого металу в об'ємі плавильного агрегату та його інтенсивності. Таке перемішування добре себе зарекомендувало й широко використовується у дугових та індукційних каналних печах.

Однак недоліком даного методу перемішування є його обмеженість у застосуванні, тобто цей спосіб є ефективним лише у печах з великим робочим струмом, який може протікати у об'ємі рідкого металу, наприклад як у плазмових, електродугових та електрошлакових печах.

1.5. Висновок до розділу 1

Існує проблема отримання якісних металів та їх сплавів, вона стосується не тільки методів плавки металів, а і їх ефективного перемішування, що є одним з найбільш ефективним методом, у сучасному металургійному виробництві. Це, насамперед потрібно для того, щоб отримувати якісний продукт який виробляється із різних металів і їх сплавів та не витратити на це велику кількість ресурсів. Один із сучасних методів одночасно і плавки, і перемішування металу є створення вихрової воронки («vortex flow»), в яку засипається подрібнена шихта, або легуючі матеріали. Такий метод дозволяє, в тому числі, перероблювати металеву стружку, так легковажні частки металу, який зазвичай вважають відходами виробництва. Для створення вихрового потоку в плавильних печах в нинішній час використовують відцентрові механічні насоси, у яких низький строк служби, через їх роботу в агресивному середовищі розплавленого металу. Цей насос є вкрай важливою складовою установки, адже він виконує дві функції: створює вихровий потік металу, та забезпечує циркуляцію металу в об'ємі печі.

Для вирішення проблеми ненадійності і короткого строку служби лопатей відцентрового насоса, можна використовувати в цих цілях системи електромагнітного перемішування металу, які є більш надійними і довговічними. В наш час використання електромагнітних уставок для плавки і перемішування металу потребують більш детального вивчення, та удосконалення. Актуальним постає питання розробки нових або вдосконалення старих електромагнітних перемішувачів.

Метою даної бакалаврської роботи є розглянути можливість використання електромагнітної системи перемішування металу для створення вихрового обертального руху металу. Проаналізувати можливість створення і використання такої системи на прикладі відбивної печі.

РОЗДІЛ 2.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИХРОВОГО ПОТОКУ

Аналіз першого розділу дає змогу зрозуміти, що електромагнітна система вихрового обертального руху раніше не була представлена в літературі. Тому потрібно дуже уважно перейти до побудови комп'ютерної моделі, щоб зробити детальний опис усіх процесів та нюансів такої установки. Для першочергової оцінки можливості використання відбивної печі у поєднанні з вихровим каналом було використано математичну модель для перевірки основних закономірностей і конструктивних рішень.

2.1. Вибір програмного пакету

В наш час, з розвитком персональних електронно-обчислювальних машин, стало можливим використання комп'ютерних методів для моделювання фізичних процесів за допомогою спеціальних алгоритмів. Такий досвід вже дуже відомий в світі, і допомогло в багатьох дослідженнях, адже має набагато нижчу собівартість, ніж проведення реальних експериментів. У випадку магніто-гідродинамічних задач метод математичного моделювання є доцільним, адже розплавлений метал є агресивним середовищем та дослідження деяких параметрів вимагає дорогих вимірювальних приладів, а іноді навіть не виявляється можливим.

Магніто-гідродинамічні установки, як правило, складаються з збуджувача магнітного поля та об'єму рідкого металу. У нашому випадку система збудження поля – це універсальний індуктор, який в залежності від системи електроживлення створює біжуче магнітне поле. Таким чином, на відміну від традиційних електромагнітних систем, що використовуються в електротехніці, системи електромагнітного перемішування мають у своєму складі елемент

у вигляді металу в розплавленому стані, що значно ускладнює дослідження (розрахунків) таких систем.

Для побудови математичної (числової) моделі системи електромагнітного переміщення металу потрібно зв'язати між собою рівняння з різних сфер фізики. Таку задачу прийнято називати *мультифізичною*. Для успішного моделювання таких задач є дуже багато вимог до програмного забезпечення, адже воно має в себе включати не тільки рівняння електродинаміки, гідромеханіки і термодинаміки, а й мати можливість поєднати між собою всі вище зазначені процеси та розрахувати це все як одну задачу.

Мультифізичне моделювання фізичних процесів представлено в багатьох пакет сучасних програм, наприклад:

- ANSYS Multiphysics [13];
- Flux [14];
- LSDyna [15];
- COMSOL Multiphysics [16].

Саме COMSOLE Multiphysics найновішої, на момент написання диплому, версії 6.0. було вибрано в якості програмного середовища, де проводилися необхідні розрахунки. Цей програмний комплекс з успішністю використовують для розрахунку задач з багатьох областей фізики. Завдяки своїй оптимізації і великому функціоналу за допомогою цього пакету можна моделювати багато задач.

2.2. Геометрична модель

Виходячи з першого розділу можна зрозуміти, що ідея створення вихрового обертального руху рідкого металу для відбивної печі електромагнітним методом зовсім нова і не була представлена в літературі і на практиці до цього, але є дуже революційною і актуальною в світі та Україні. Конструювання такого

вихрового каналу проводилось виходячи з логічних міркувань та наявності вже готових досліджень в області електромагнітних систем для рідкого металу.

За основу було взято типову відбивну піч, до якої було прилаштовано вихрову камеру. З'єднання об'єму печі та «кишені» відбувалось шляхом приєднання двох каналів (напірний і всмоктуючий відповідно). Рух металу у запропонованій камері було реалізовано завдяки половини від електричного двигуна, таким чином, щоб у нас утворився шестиполосний індуктор, через котушки якого, тече змінний струм заданих параметрів. Принципово нову та революційну схему такої відбивної печі зображено на рис. 2.1.

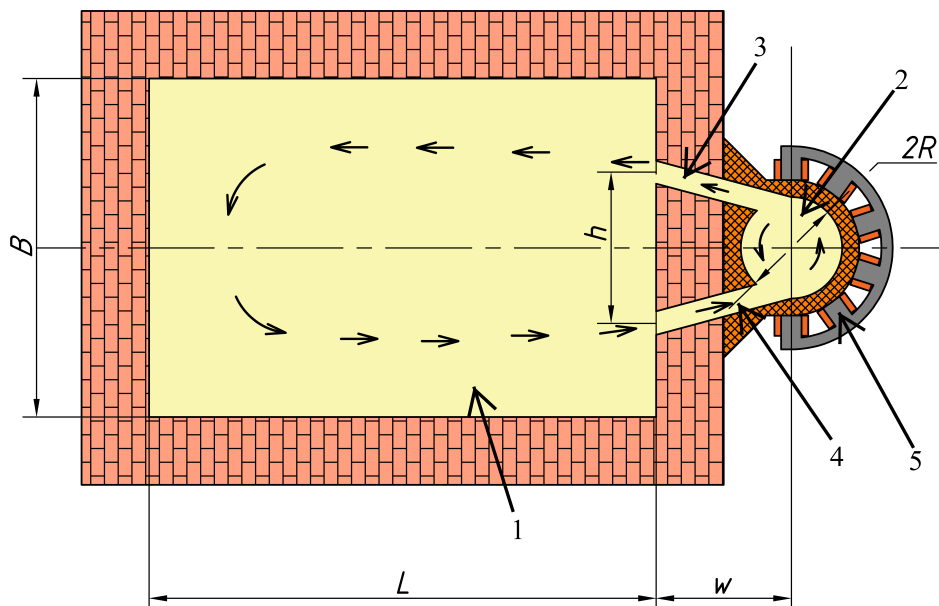


Рис. 2.1. Відбивна піч з плавленням металу у вихровому потоці, створеного електромагнітною системою (1 – ванна печі, 2 – вихрова камера, 3 – натискний канал, 4 – всмоктуючий канал, 5 – дуговий індуктор).

Змінюючи кут, під яким натискний (напірний) канал стикується з циліндричною поверхнею бокової стінки камери, можна за потребою змінювати співвідношення між витратою рідкого металу, що поступає з камери у ванну печі, і витратою металу, який циркулює (обертається) в кармані. На рис.2.2 показано три приклади під'єднання натискного каналу до камери з різними кутами Θ між віссю цього каналу і дотичною до циліндричної камери поверхні. Цілком ймовірно, що максимальна витрата металу, що поступає у ванну печі,

буде при $\Theta = 0$, а мінімальна – при $\Theta = 90^\circ$. В цій роботі і представлено дослідження зміщення напірного каналу під кутом $\Theta = 45^\circ$.

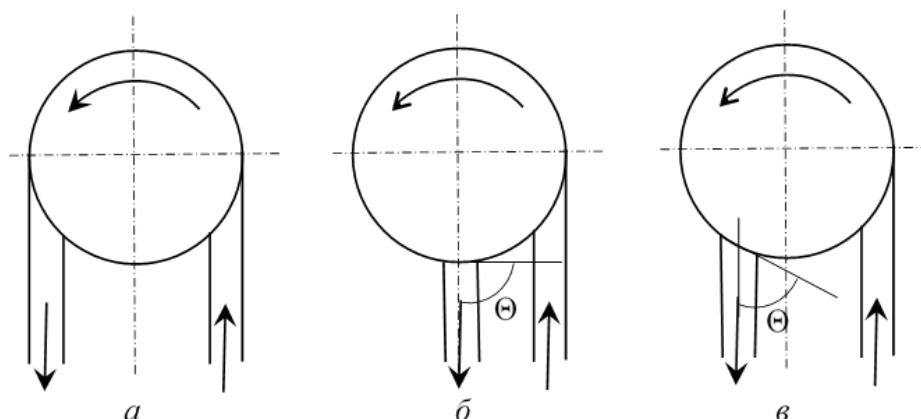


Рис. 2.2. Варіанти під'єднання натискного каналу до циліндричної камери ($a - \Theta = 0^\circ$; $b - \Theta = 90^\circ$; $v - 0^\circ < \Theta < 90^\circ$).

Змінювати зазначене співвідношення витрат на практиці можна за рахунок переміщення циліндричної камери відносно ванни, залишаючи фіксованим натискний канал, так як це показано на рис. 2.3 Положення камери в цьому випадку можна характеризувати геометричним параметром a/R , де розміри a і R позначені на цьому рисунку.

«Серцем» установки можна назвати дуговий шестиполосний індуктор, який представлений на рис.2.4. Він має шість намотаних котушок товщиною $b_c = 0,04$ м та шириною $l_c = 0,12$ м, сам магнітопровід складається з нашарованих феромагнетних матеріалів в висоту він $h_c = 0,2$ м, довжина одного осердя $b = 0,2$ м та його ширина $B_r = 0,12$ м. Розміщений цей індуктор по середині висоти камери.

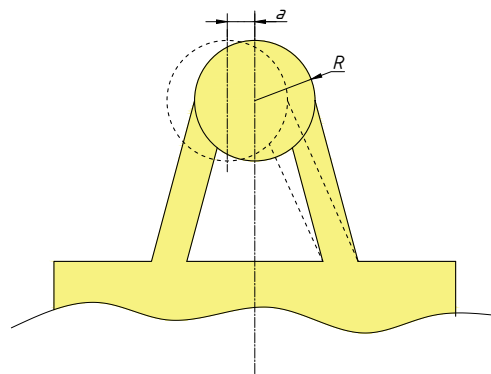


Рис. 2.3. Вихрова камера відбивної печі.

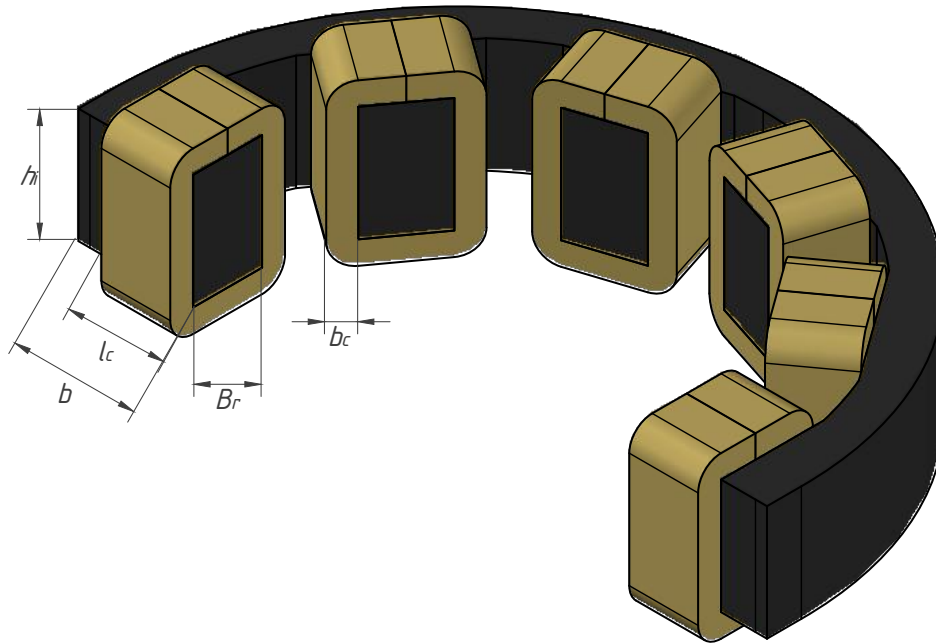


Рис. 2.4. Дуговий індуктор з котушками.

2.3. Математична та числова модель

2.3.1. Рівняння гідродинаміки

Для опису руху рідкого металу використовують рівняння Нав'є-Стокса та замикає систему закон збереження імпульсу [17]:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{p} + \nu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (2.2)$$

де \mathbf{u} - швидкість, ρ - густина рідини, p - тиск, ν - кінематична в'язкість, \mathbf{f} - сила Лоренса та гравітаційні сили.

Для математичного моделювання найбільш доцільним використовувати систему усереднених Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, яка має наступний вигляд:

$$\rho \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} = -(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} - \nabla(\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \bar{\mathbf{p}} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \nu (\nabla \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \bar{\mathbf{u}})^T) + \mathbf{f} \quad (2.4)$$

Но для замыкания системы необходимо ввести додаткове рівняння запропоноване Буссіненком:

$$\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} = \frac{2}{3} \rho k + \mu_T (\nabla \bar{\mathbf{u}} + (\nabla \bar{\mathbf{u}})^T) \quad (2.5)$$

де μ_t - турбулентна в'язкість, k - кінетична енергія турбулентності. Моделі, що ґрунтуються на даній гіпотезі, називаються моделями турбулентної в'язкості.

Отже, моделювання турбулентного руху – це знаходження Рейнольдсових напруженостей через відомі величини.

Для моделювання турбулентних течій в рідкому металі найбільш придатна модель турбулентності є $k - \varepsilon$ моделі. Ця модель турбулентності вирішує для двох змінних: k – турбулентної кінетичної енергії; та ε – швидкості розсіювання турбулентної кінетичної енергії. В цій моделі використовуються пристінкові функції, потік в ламінарній та перехідній підобластях не моделюється, а розраховується аналітично. Формульно це має вигляд:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}} \quad (2.7)$$

Після простих математичних операцій з рівнянням (2.4) та (2.3) з урахуванням припущення про градієнтний механізм турбулентної дифузії, прийнятого А.М. Колмогоровим [18], це рівняння набуває вигляду:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (2.8)$$

де $\sigma_k = const$, P_k - визначає генерацію турбулентної енергії, обумовлену нерівномірністю поля швидкостей усередненого руху, і представляється таким чином:

$$P_k = 2\mu_i S_{ij} S_{ij} \quad (2.9)$$

де S_{ij} - компоненти тензору швидкості деформації осередненого руху.

Для ε можна провести аналогічні розрахунки за аналогією до (2.8):

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon P_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2}{k} \quad (2.10)$$

де $\sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ - емпіричні константи.

Моделльні константи для k - ε моделі турбулентності: $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.30$.

2.3.2. Рівняння електродинаміки

Як зазначалось вище, для розв'язання рівняння гідродинаміки необхідною складовою є сила Лоренса. Для її знаходження потрібно вирішити електромагнітну задачу, яка описується законом Фарадея, законом Ампера-Максвела, законом Гауса для електричного і магнітного поля та рівняння неперервності струму, в диференцій формі ці закони мають вигляд:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.11)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f, \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho_f}{\partial t} \text{ або } \nabla \cdot \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right), \quad (2.15)$$

де \mathbf{E} – напруженість електричного поля або електрорушійна сила, \mathbf{B} – густина магнітного потоку, \mathbf{H} – напруженість магнітного поля, \mathbf{J} – густина струму провідності, \mathbf{D} – електричне зміщення або густина електричного потоку, ρ_f – густина вільних електричних зарядів.

На сьогодні в роботах багатьох авторів векторний магнітний \mathbf{A} та φ скалярний електричний потенціали [19] використовуються у вигляді допоміжних функцій, які в деяких випадках спрощують пошук рішення задачі за рахунок зменшення кількості невідомих при розрахунках. В той же час надання їм фізичного змісту дозволяє більш повно та прозоро інтерпретувати електромагнітні явища. Зрозуміло, що в таких випадках система рівнянь для опису електромагнітних полів повинна бути сформульована таким чином, щоб містити вказані потенціали та відображати їхній зв'язок з іншими фізичними величинами. В диференціальній формі разом з матеріальними співвідношеннями ((2.11)-(2.15)) вона має вигляд:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.16)$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}, \quad (2.17)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0, \quad (2.18)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f, \quad (2.19)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi + \mathbf{u} \times \mathbf{B} \quad (2.20)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho_f}{\partial t} \text{ або } \nabla \cdot \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right), \quad (2.21)$$

де \mathbf{A} – векторний магнітний потенціал, φ – скалярний електричний потенціал, \mathbf{u} – швидкість руху середовища.

Для розрахунку змінних в часі гармонічних полів рівняння ((??)-(??)) приймає вигляд:

$$\nabla \times \frac{\nabla \times \dot{\mathbf{A}}}{\mu} + (\sigma - i\omega\varepsilon)\mathbf{u} \times (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (i\omega\sigma + \omega^2\varepsilon)\dot{\mathbf{A}} = \dot{\mathbf{J}}_e, \quad (2.22)$$

$$\nabla \left(-(\sigma + i\omega\varepsilon)\mathbf{u} \times (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) - (i\omega\sigma + \omega^2\varepsilon)\dot{\mathbf{A}} + \dot{\mathbf{J}}_e \right) \quad (2.23)$$

де $\dot{\mathbf{J}}_e$ - густина зовнішнього струму.

Сила Лоренса визначається наступним чином:

$$\mathbf{f} = 0,5\text{Re}(\dot{\mathbf{J}} \times \dot{\mathbf{B}}) \quad (2.24)$$

2.3.3. Рівняння енергії

Для опису теплових процесів у запропонованій установці використовують рівняння теплопровідності, в якому нехтується зміна температури при зміні

тиску. При турбулентному русі металу рівняння теплопередачі має наступний вигляд:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) + \nabla \cdot (-\lambda_{eff} \cdot \nabla T) = Q, \quad (2.25)$$

де ρ – густина, C_p – питома теплоємність, T – температура, t – час, \mathbf{u} – швидкість, λ_{eff} – ефективний коефіцієнт теплопровідності, Q – внутрішні джерела тепла.

Ефективний коефіцієнт теплопровідності вводиться для турбулентних потоків, та розраховується як:

$$\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_T, \quad (2.26)$$

де λ та λ_T - коефіцієнт молекулярної та турбулентної теплопровідності. В найпростішому випадку турбулентна обчислюється як:

$$\lambda_T = \frac{C_p \cdot \nu_T}{Pr_T}, \quad (2.27)$$

де Pr_T - число Прандтля, яке приймається константний в об'ємі всієї печі.

2.4. Комп'ютерна модель

2.4.1. Спрощення і припущення

Обмеження в електронно-обчислювальній техніці не дозволяють в повній мірі описувати всі реальні фізичні об'єкти, особливо при трьохвимірному моделюванні. Тому таке моделювання можливе тільки за прийняття деяких спрощень, які не впливають особливо на результати, але добре передають фізичну суть явища. В основному це стосується представлення гетерогенних структур, такі як магнітопровід і котушки на ньому.

Магнітопровід в індукторі (осердя) приймався за неелектропровідним середовищем з постійною магнітною проникністю. Втрати пов'язані з гістерезисом та вихровими струмами не враховувалися, через малий діапазон розрахунків електродинамічної задачі.

Неоднорідна структура котушок була представлена суцільним не провідним середовищем з рівномірно розподіленою густиною струму:

$$\mathbf{j} = \frac{\mathbf{I} \cdot w}{b_c \cdot l_c} \quad (2.28)$$

де I – струм в котушці, w і $b_c \cdot l_c$ – відповідно кількість витків і площа поперечного перерізу котушки.

В такому представленні джоулевий нагрів котушки не розраховувався і наведення вихрових струмів також, але зберігається основне, що цікавить нас при побудові моделі - розподіл електричних струмів та утворення магнітного поля.

При побудові гідродинамічної задачі також були прийняті деякі спрощення. Наприклад, фізичні характеристики розплавленого алюмінію не залежали від температури, бо особливих змін в досліджуваному діапазоні температур можна вважати сталим. В свою чергу, таке представлення дає змогу розглядати електродинамічну і гідродинамічну задачі *слабкозв'язними* [20] та розв'язувати їх послідовно, тобто окремо одна від одної.

Також розплавлений об'єм металу вважався слабкостиснувальним середовищем, це означає, що густина металу не залежить від тиску, але все ж таки залежить від температури, що також необхідно враховувати для дослідження термогравітаційного руху. Всі стінки печі вважались ідеально гладкими.

І саме головне припущення, що нехтувалося утворенням меніску в вихровій камері. Таке припущення є досить серйозним недоліком даної роботи. Але в першу чергу, оскільки це є новітньою розробкою, то для оцінки основних параметрів таке спрощення припустиме.

2.4.2. Початкові та граничні умови

При розв'язанні електромагнітної задачі в роботі використовувалися граничні умови електричної та магнітної ізоляції:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2.29)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \quad (2.30)$$

При рішенні гідродинамічної задачі використовувалися гранична умова відсутності проникнення потоку та гранична умова напруженості зсуву:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (2.31)$$

$$((\mu + \mu_T) \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) \cdot \mathbf{n} = -\rho \cdot u_\tau \cdot \frac{\mathbf{u}_{\text{tang}}}{u^+}, \quad (2.32)$$

$$\mathbf{u}_{\text{tang}} = \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}, \quad (2.33)$$

$$u_\tau = \max \left(\frac{|\mathbf{u}|}{\kappa_\nu^{-1} \ln(\delta_w^+) + B}, C_\mu^{1/4} \cdot \sqrt{k} \right), \quad (2.34)$$

$$\delta_w^+ = \frac{\rho \cdot u_\tau \cdot \delta_w}{\mu}, \quad (2.35)$$

де u_τ - швидкість тертя, яка приймається 11,06, B - константа, яка дорівнює 5,2.

Гранична умова Неймана для турбулентної кінетичної енергії k та гранична умова для ε записуються наступним чином:

$$\mathbf{n} \cdot \nabla k = 0, \quad (2.36)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot k^{3/2}}{\kappa_\nu \cdot \delta_w} \quad (2.37)$$

Гранична умова конвективного теплового потоку використовувалася при дослідженні процесів теплопередачі:

$$q_0 = h(T_{ext} - T), \quad (2.38)$$

де q_0 – тепловий потік через зовнішню границю розрахункової області, h – коефіцієнт тепловіддачі, T_{ext} – температура навколишнього середовища, T – локальна температура на границі.

2.4.3. Розрахункова сітка

Для побудови розрахункової сітки було використано вбудований в COMSOL Multiphysics 6.0. пакет для побудови сітки. Використано алгоритм, що дозволяє будувати неструктуровану комбіновану сітку, з використанням влучного поєднання тетрагональних і призматичних елементів. Для влучної побудови сітки з отриманням максимально достовірних результатів необхідно першочергово провести аналітичну оцінку досліджуваних фізичних параметрів.

Один з таких визначальних параметрів є скін-шар в області металу - це область, де знаходиться 63% струму, згенерованого на котушках, що протікає в ньому. Глибину скін шару відповідно можна розрахувати аналітично за формулою:

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.39)$$

Іншим важливим параметром є пристінкове згущення сітки для розв'язку гідродинамічної задачі. Відомо, що для турбулентного потоку середня нормальна компонента швидкість в певній точці є пропорційною до логарифму відстані від цієї стінки до точки [21]. Це є прийнятне рішення для потоків з великим

числом Рейнольдса, проте це припущення не діє у в'язкому пристінковому шарі в безпосередній близькості до стінки, як показано на рис.2.5.

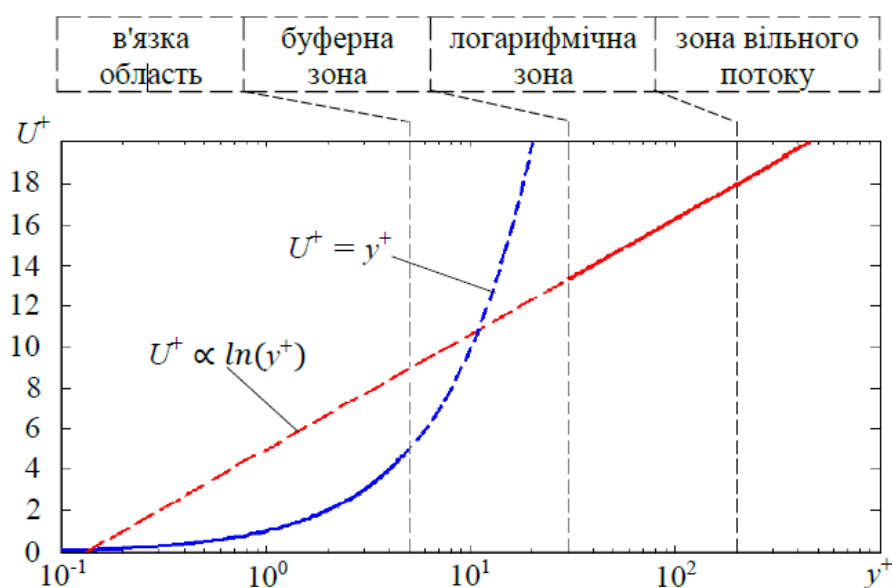


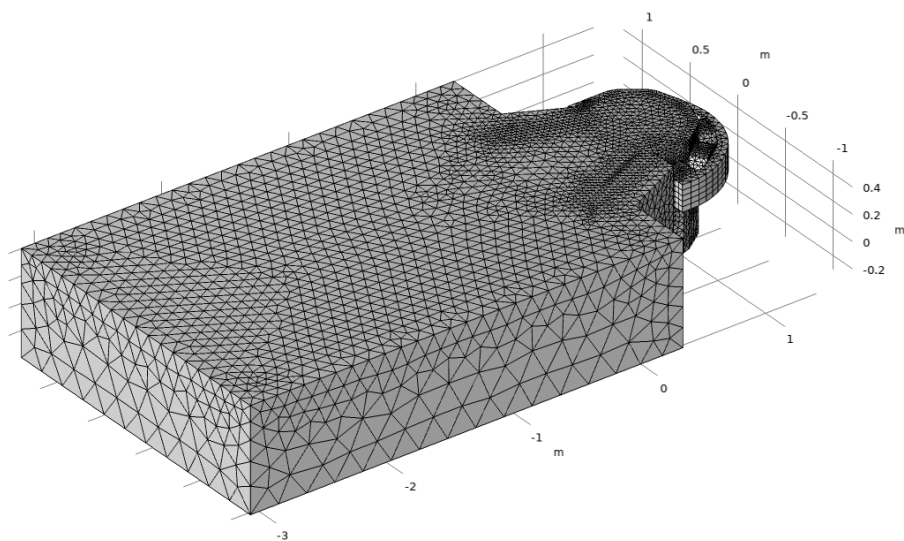
Рис. 2.5. Розподіл швидкості біля стінки при турбулентному русі.

Отже моделювання гідродинаміки також вимагає достатньо точної постановки при розбитті об'єкта на сітку. Ідеальним випадком є той, коли значення $y^+ = 11,06$. Інша складність полягає у тому, що безрозмірна відстань y^+ залежить від локальної швидкості, яка є наперед невідомою величиною.

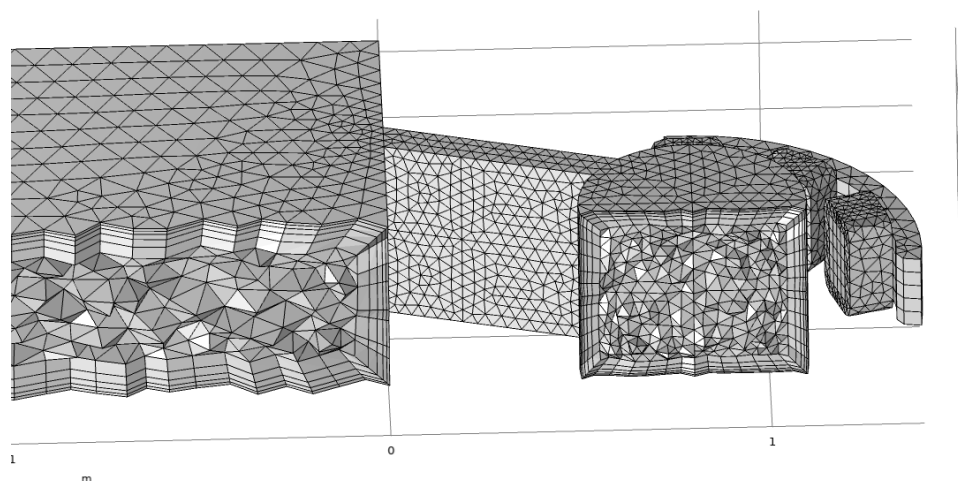
Для перевірки правильності побудови сітки необхідно робити її валідацію, тобто порівняння результатів з реальним експериментом, але у випадку цієї роботи проводилась попередня оцінка можливостей і характеристик використання такої магніто-гідродинамічної системи. Після затвердження всіх параметрів установки необхідно буде провести експеримент.

Розрахункова сітка, яка використовувалась в цій дипломній роботі представлено на рис.2.6а.

Згущення сітки біля границь розрахункової області гідродинамічної задачі зображено на рис.2.6б



(а)



(б)

Рис. 2.6. Розрахункова сітка: а - всієї моделі відбивної печі, б - згущенням сітки в пристінкових областях.

2.5. Висновки до розділу 2

Побудована геометрична модель відбивної печі з приєднаною до неї вихровою камерою, напірний канал був під'єднаний під кутом $\Theta = 45^\circ$. Для розрахунку і оцінки можливості використання такої системи на практиці було обрано метод математичного моделювання.

Математична модель була побудована за допомогою програмного пакету COMSOLE Multiphysics 6.0. що є найкращою на ринку серед програмного забезпечення для мультифізичного моделювання.

Записані основні рівняння для опису гідродинамічних, електродинамічних та термодинамічних процесів, а також встановлено мультифізичні зв'язки таких задач. Через те, що розглянуті процеси електродинаміки та гідродинаміки з термодинамікою є слабкозв'язними їх вирішення проводилось послідовно.

При побудові неструктурованої комбінованої сітки математичної моделі було враховано основні фізичні параметри, які потребують належно побудованої сітки і виконано відповідне згущення сітки в таких регіонах.

РОЗДІЛ 3.

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

У першому розділі 1 цієї роботи було продемонстровано, що у вихровому обертальному русі металу плавлення подрібнених часток алюмінію («vortex flow»)

3.1. Дослідження впливу сили струму в котушках на перемішування металу

Для дослідження електромагнітної системи вихрового обертального руху металу з кутом приєднання напірного каналу $\theta = 45^\circ$ спочатку потрібно розглянути, як збільшення струму на котушках індуктора вплине на витратні характеристики для рідкого металу. Такий розрахунок потребує значних затрат по часу та потужностям електронно-обчислювальної техніки, тому моделювання було проведено у двохвимірній (2D) постановці, з урахуванням усіх наближень вказаних у другому розділі дипломної роботи.

Двохвимірною постановкою задачі є умовним наближенням в нескінченно глибокої висоти установки. Вона дає змогу визначити основні закономірності впливу електромагнітної задачі на гідродинамічну. Розрахунок теплового поля, в даному випадку не враховувався, а температура алюмінію вважалась сталою під час всього процесу та становила $T_r = 933K$. Розрахунок електромагнітного поля був представлений в лінійній постановці, структура котушок приймалася однорідною з рівномірним розподілом заданої густини струму. Сила струму в котушках для двох варіантів був заданий в діапазоні $A_w = 5, 10, 15, 20$ кА витків (амплітудне значення), даний діапазон є припустимим для використання його на практиці в реальних промислових агрегатах.

У результаті моделювання було отримано розподіл електромагнітних сил у металі, рушійною силою, яка створює потік металу, була сила Лоренца. На рис. 3.1 представлено розподіл рушійної сили для рідкого металу на стінці вихрової камери, вздовж якої розміщені котушки індукторів, θ - кут полярної системи координат, центр якої знаходиться в центрі вихрової камери. Видно, що розподіл рушійної сили має не рівномірний характер, з максимумами в місцях накладання магнітних полів створюваних сусідніми котушками.

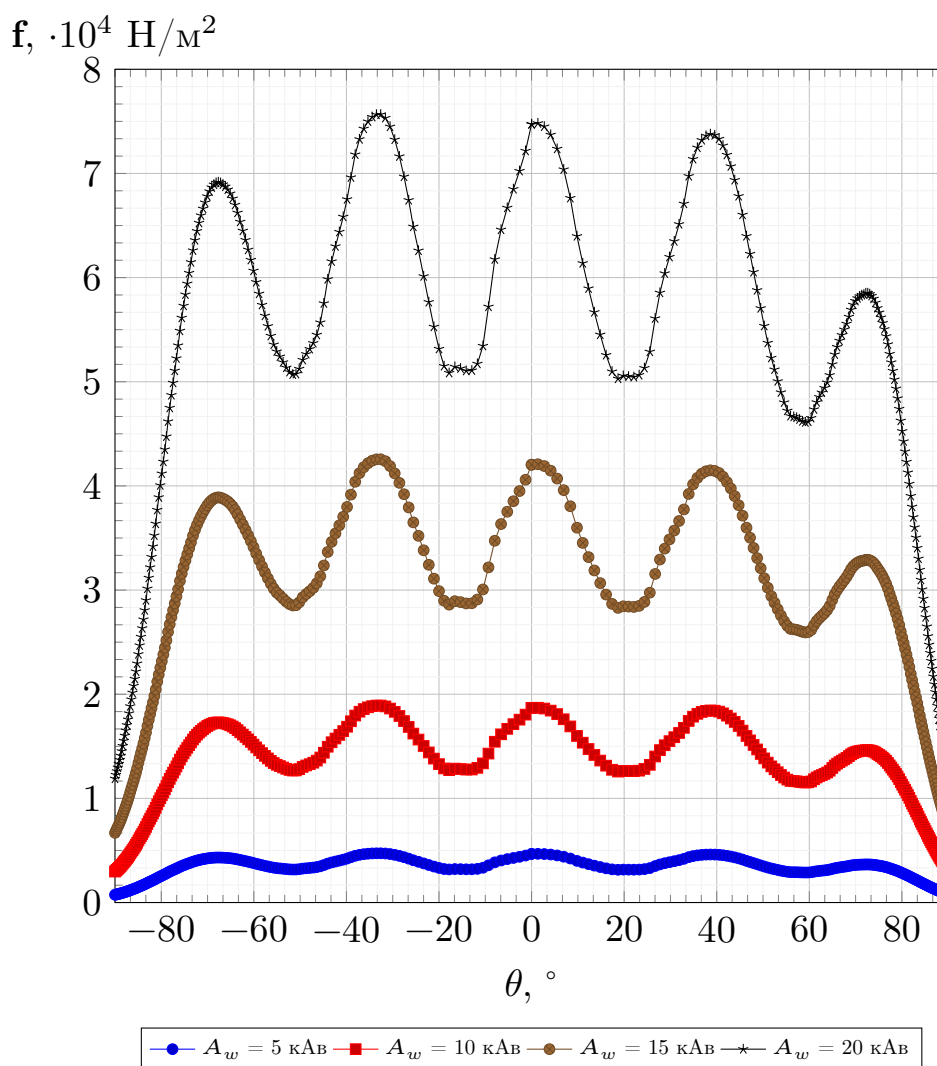


Рис. 3.1. Розподіл сили Лоренца на стінці вихрової камери.

Вплив електромагнітного поля на гідродинамічну задачу був розрахований чисельним вирішенням рівнянь Нав'є-Стокса усереднених Рейнольдсом. На

рис. 3.2а - 3.2г представлені течії рідкого металу для різних значень сили струму в котушках.

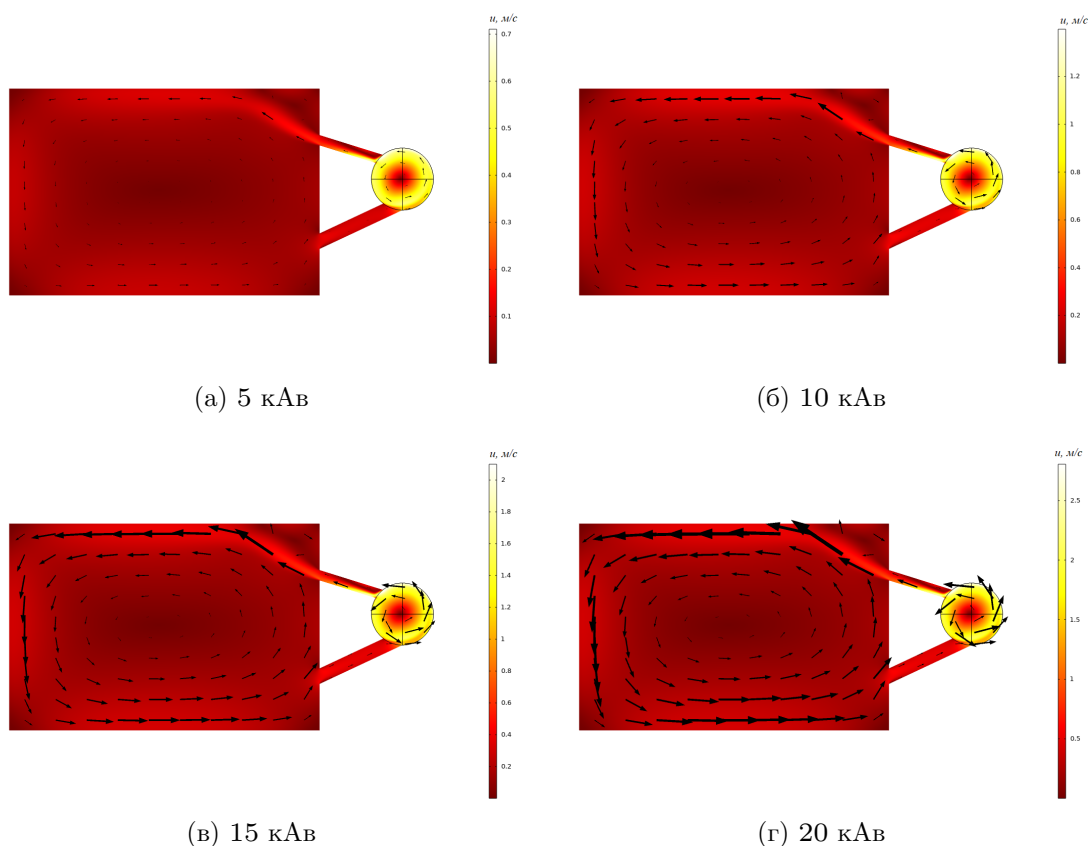


Рис. 3.2. Розподіл швидкостей у відбивній печі разом з вихровою камерою.

Візуально спостерігається зріст швидкості в об'ємі циліндричної камери та в області печі та утворення одноконтурного руху металу у відбивній печі. Для наочного прикладу порівняємо за допомогою об'ємної витрати металевого розплаву через різні поперечні перерізи системи для різних значень I_w в діапазоні 5, 10, 15 та 20 кАв.

На рис.3.3 наведено, як змінюється витрата металу зі збільшенням сили струму. Переріз «1» визначає витрату рідкого металу, що поступає із камери у ванну печі і назад, переріз «2» характеризує витрату металу, що циркулює в камері, а переріз «3» визначає сумарну витрату, створену електромагнітною системою. Для визначення витрат приймалося, що висота рідкого металу в усій системі однакова і складає $h = 0,5$ м. Отримані залежності показують,

що витрата металу через поперечний переріз «3» дорівнює сумі витрат через перерізи «1» і «2» в межах похибки $\pm 20\%$.

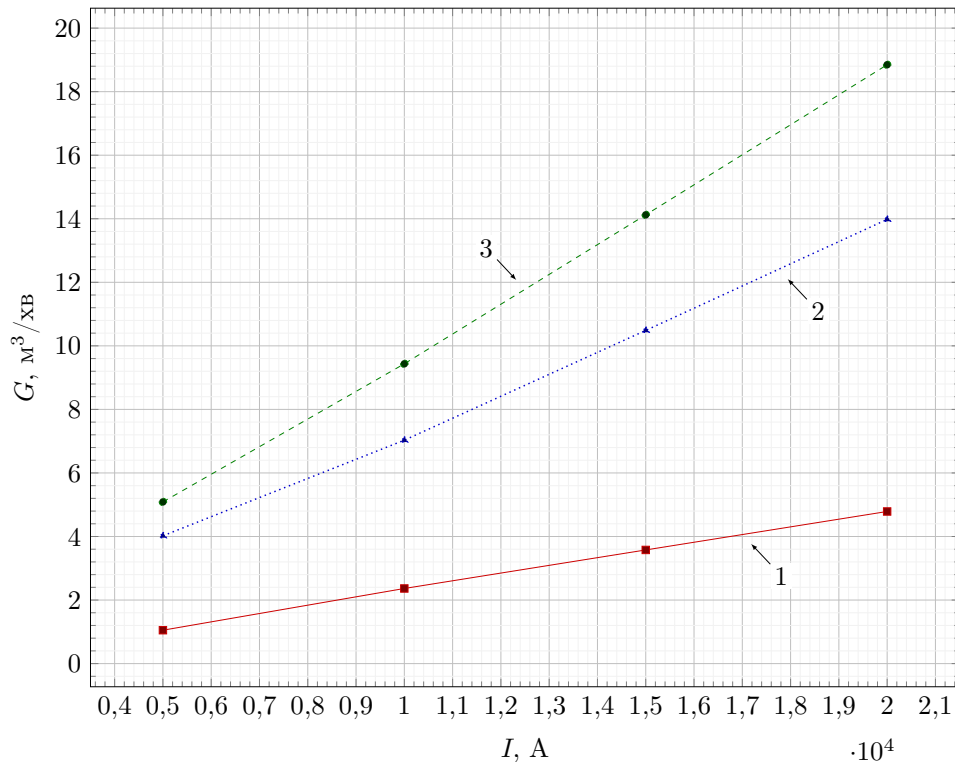


Рис. 3.3. Об'ємна витрата рідкого металу в поперечних перерізах

Інша кількісна оцінка системи у вигляді швидкості руху металу представлена в Таб. 3.1. На ньому в залежності від сили струму в котушках наведена середня кутова швидкість металу у камері ω_c та середня швидкість металу V_c в об'ємі печі.

Таблиця 3.1

Середня лінійна швидкість у ванні печі та середня кутова швидкість в циліндричній камері

I_w кАВ	ω_c 1/с	V_c м/с
5	0,344	0,061
10	0,630	0,137
15	0,934	0,209
20	1,258	0,280

Отримані результати дають змогу зробити висновок, що при збільшенні сили струму в котушках відповідно лінійно збільшуються витратні характери-

стики металу для відбивної печі і вихрової камери. Якщо виходити з результатів двохвимірного моделювання, то для досягнення найефективнішого перемішування слід використовувати максимальні можливості індуктора, але при цьому зниження сили струму буде мати лінійний вплив на швидкість і не матиме впливу на розподіл швидкостей в об'ємі установки. Ці данні є корисними, бо на практиці не завжди виходить утримувати силу струму в котушках, через вплив зовнішніх факторів.

3.2. Дослідження теплового стану розплаву при електромагнітному перемішуванні

Вище було зазначено силова дія електромагнітного поля на витратні характеристики та швидкості руху розплаву. Але оскільки це система для перемішування рідкого металу визначальним критерієм є розподіл температури в плавильному агрегаті. Отримання такого критерію є важливим показником для металургійної промисловості.

Попередньо слід зазначити, що розрахунок проводився для вже розплавленого алюмінію, який підігрівався зверху тепловим потоком $P_h = 600$ кВт. Початковий розподіл температури стінок печі визначався шляхом попереднього розрахунку стаціонарної теплової задачі із заданою температурою внутрішніх поверхонь стінок, що дорівнює початковій температурі розплаву.

Моделювання проводилося в три етапи шляхом розв'язання рівнянь зазначених в розділі 2 цієї дипломної роботи. На першому етапі моделювалась електромагнітна задача, що дає змогу отримати розподіл електромагнітних сил, які є рушійною силою рідкого металу. На другому етапі - розраховувався нестационарний рух алюмінію шляхом розв'язання рівнянь гідродинаміки. На третьому етапі виконувався розрахунок розподілу температури металу у ванні печі при його нагріванні з врахуванням поля швидкості та її пульсацій.

Всі розрахунки виконувалися при живленні котушок струмом промислової частоти (50 Гц). Було прийнято, що амплітудне значення ампер-витків кожної котушки складає 20 кАв. Дослідження проводилось протягом 10 хвилин.

3.2.1. Дослідження потоку рідкого металу в об'ємі печі

На рис.3.4 наведено зміну середньої температури на поверхні рідкого металу у відбивній печі T_{t-av} . Як видно з часом температура збільшується, тим самим втрати тепла через ізоляційний шар та саму вихрову камеру не заважають нормальній роботі агрегата. Для оцінки якості перемішування розглянемо різницю середньої та максимальної температури алюмінію під час всього експерименту ΔT_{s-av} (рис.3.5). Аналізуючи дані можна побачити, що установка виходить на свій робочий режим після 30 с експерименту, після чого різниця температур знаходиться в діапазоні $18\text{K} \pm 20\%$. Це є хорошим показником для печей такого типу

На рис.3.6 в якості ілюстрації стрілками продемонстровано рух металу в середині печі, а також розподіл температури на поверхні в кінці експерименту. Як видно, у центрі утворюється застійна зона, що і обумовлює значне збільшення температури в цьому регіоні, а також зростання температури біля всмоктуваного каналу.

На рис.3.7 представлена середня швидкість алюмінію впродовж всього експерименту. Бачимо, що максимальне значення не перевищує 0,5 м/с, що може позитивно впливати на якість вихідного металу, адже тоді окиснена плівка не потрапляє в глибину розплаву.

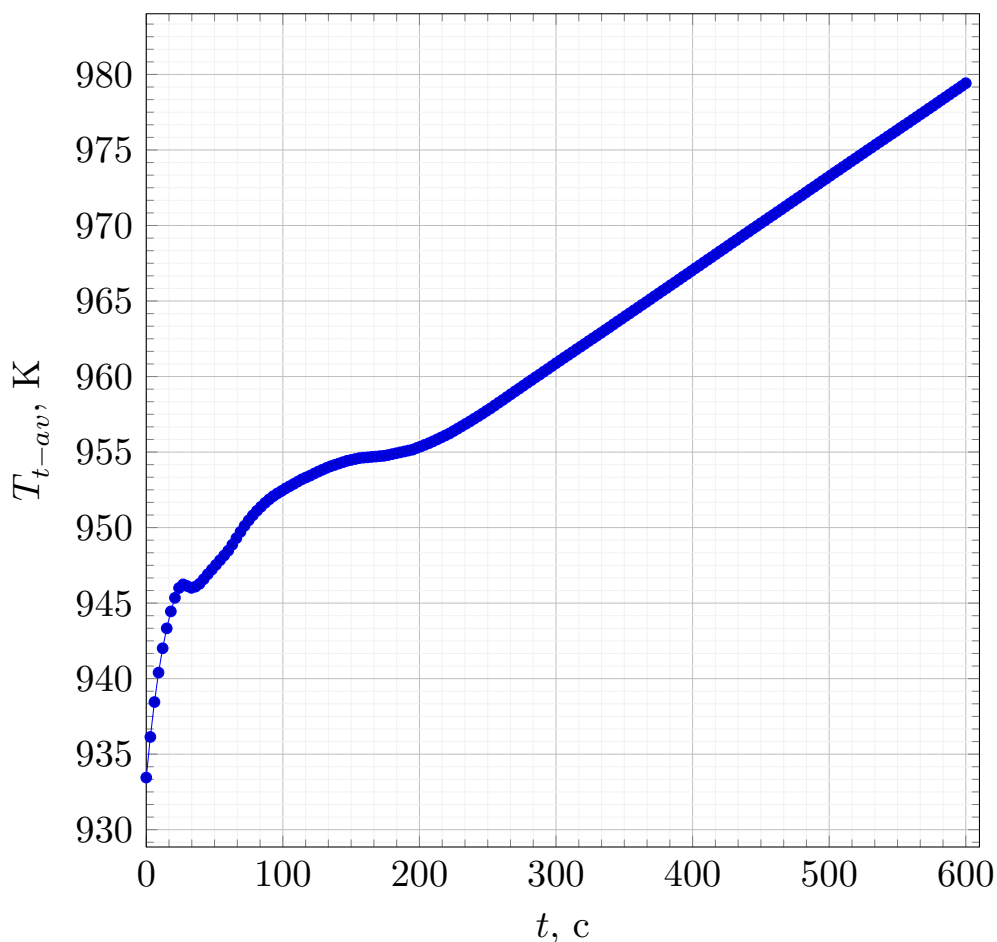


Рис. 3.4. Середня температура на поверхні металу в печі

3.2.2. Дослідження потоку рідкого металу у вихровій камері

Не менш важливою частиною установки є вихрова камера, адже саме в неї засипаються подрібнені шматочки алюмінію, або легуючі матеріали. На рис.3.8 представлено температуру в перерізі вихрової камери. Зліва присутня зона, де «гарячий» метал всмоктується з печі, а праворуч можна помітити, що температура у вихровому потоці зберігається достатньо високою, що дозволяє зробити висновок про можливість розплавлення шихти в цій камері.

Кутова швидкість рідкого металу у вихровій камері зображено на рис.3.9. Помітно, що рідкий метал стабільно обертається вже після 60 с після початку експерименту.

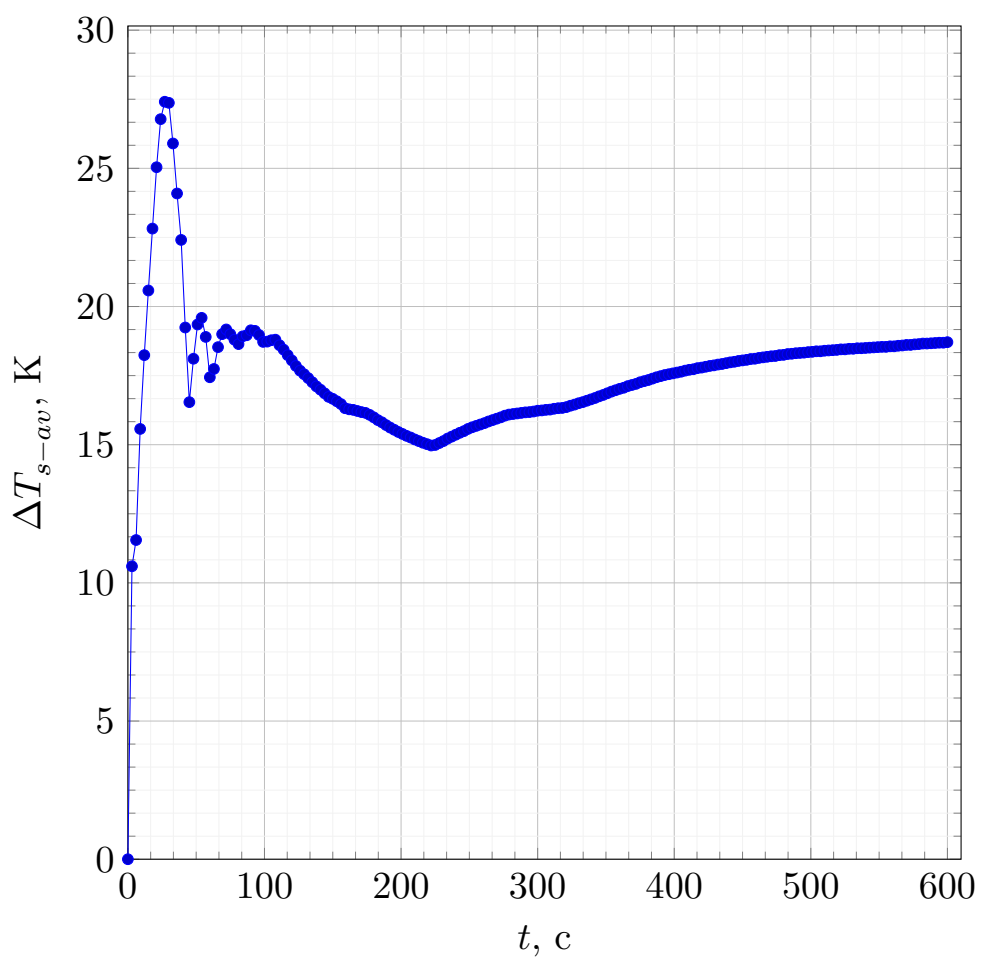


Рис. 3.5. Різниця між максимальною та середньою температурою в печі

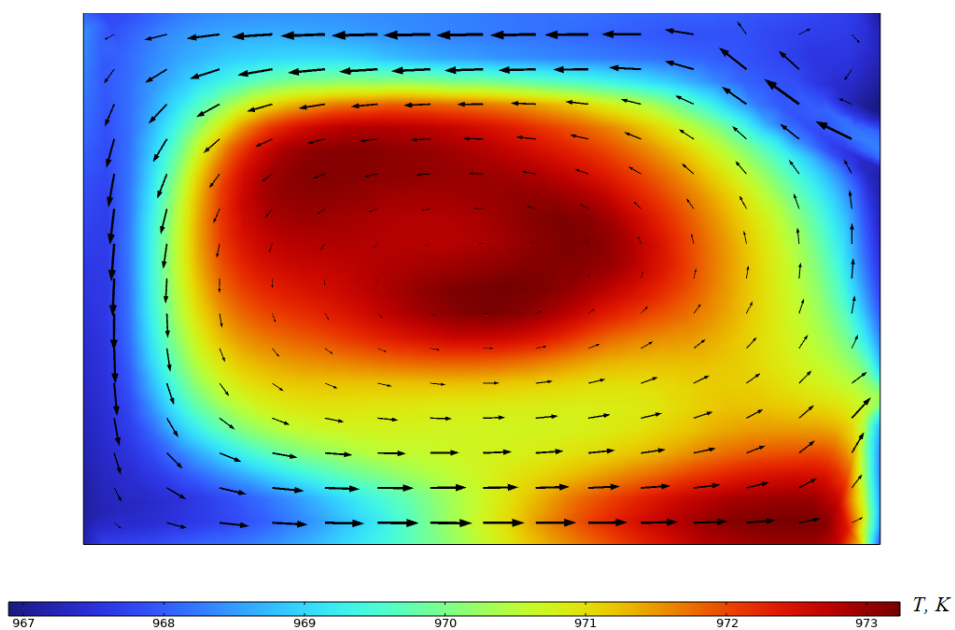


Рис. 3.6. Розподіл температури в середині печі а також напрямок руху розплаву.

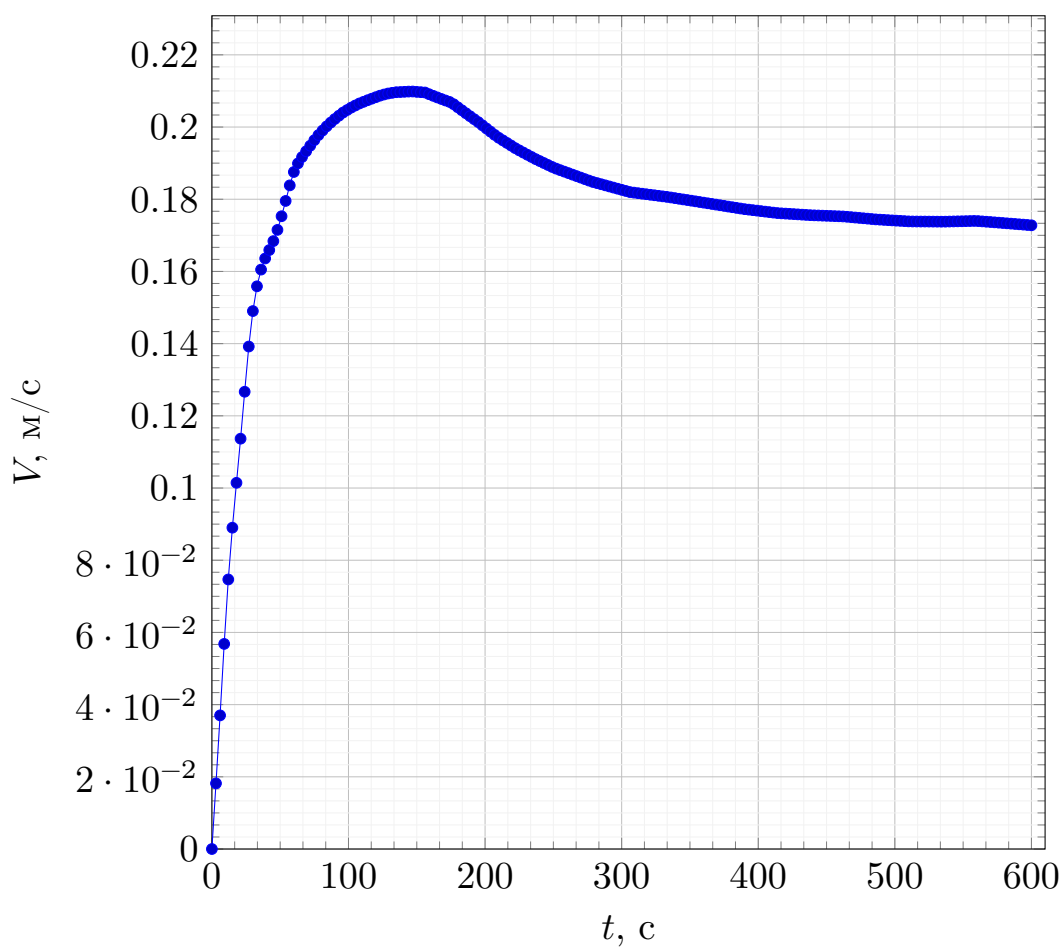


Рис. 3.7. Середня швидкість розплаву у печі

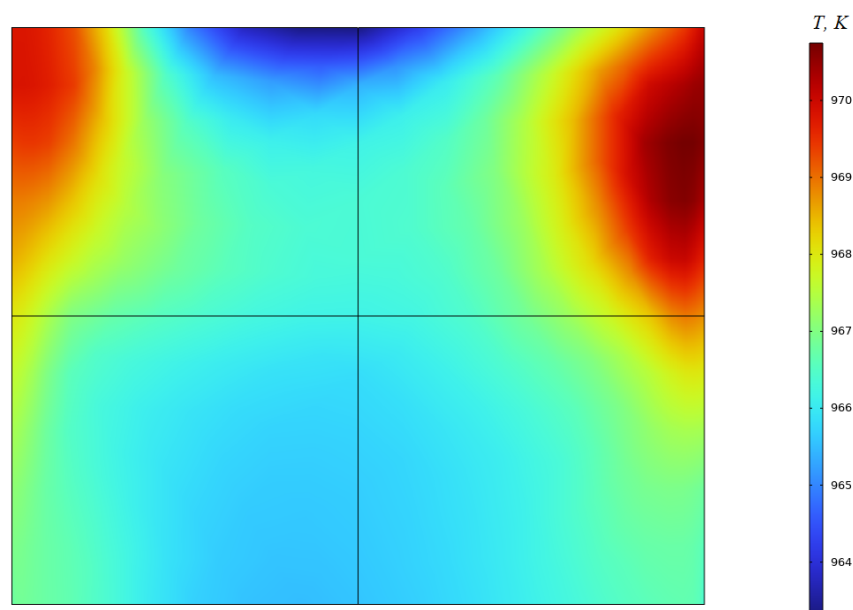


Рис. 3.8. Розподіл температури в перерізі вихрової камери.

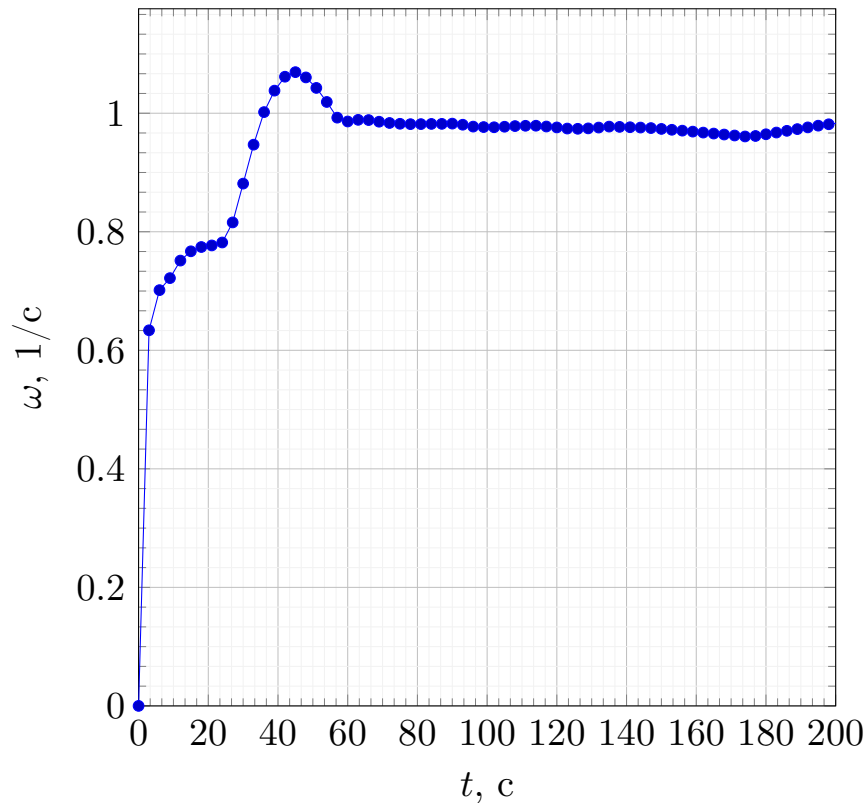


Рис. 3.9. Кутова швидкість металу в камері

Для детальної оцінки вихрової камери необхідно ще провести дослідження для рухомої сітки на поверхні металу циліндричної камери, щоб взяти до уваги утворення меніску.

3.3. Висновки до розділу 3

У розділі 3 представлені результати дослідження електромагнітної системи вихрового обертального руху рідкого металу для відбивної печі з приєднаним напірним каналом під кутом $\Theta = 45^\circ$. Аналіз отриманих результатів показав:

1) Розподіл сили Лоренса в пристінковій області вихрової камери має нерівномірний характер з максимумами в місцях накладання магнітних полів від сусідніх котушок. Об'ємна витрата металу та кутова швидкість металу у вихровій камері має лінійну залежність від амплітудного значення сили струму на котушках. Розподіл швидкостей за

2) Тепловий розподіл у ванні печі має застійну зону в центрі печі. Різниця середньої та максимальної температури в об'ємі печі, після виходу установки на робочий режим, складає $18\text{K} \pm 20\%$.

3) У об'ємі відбивної печі утворюється одноконтурний рух металу. Максимальна швидкість в об'ємі ванни печі не перевищує 0,5 м/с це значить окиснена плівка не потрапляє всередину рідкого металу та значно підвищує якість вихідного розплаву.

4) Тепловий розподіл у циліндрі вихрового каналу дає змогу стверджувати, що плавка подрібнених часток алюмінію, для чого він і створений, можливе. Кутова швидкість дає змогу сказати про утворення на поверхні металу меніску, яки потрібно урахувувати для наступних розрахунків.

ВИСНОВКИ

Для підвищення ефективності системи електромагнітного перемішування металу та плавлення у вихровому потоці рідкого металу у відбивній печі було досліджено під'єднання камери вихрового руху металу під кутом приєднання $\Theta = 45^\circ$. Було обрано теоретичний підхід для першочергової оцінки закономірностей та вхідних параметрів.

За допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics 6.0. було побудовано математичну модель мультифізичної задачі з урахуванням усіх фізичних величин, що вимагають згущення сітки в певних підобластях.

Дослідження впливу електродинамічних процесів на гідродинамічні показало лінійні залежності в робочому діапазоні індуктора, який використовувався в установці. Зі збільшенням амплітудного значення сили струму одноконтурний рух металу в ванні відбивної печі зберігається, а об'ємна витрата та кутова швидкість руху металу зростає. Для детального розрахунку гідродинамічної задачі необхідно, в майбутньому, враховувати в моделі утворення меніску на поверхні рідкого металу у вихровій камері.

Розв'язок термодинамічної задачі дав виключно позитивний результат, як у об'ємі ванни відбивної печі, так і у вихровій камері, для детальної оцінки можливості плавлення подрібнених частинок рідкого алюмінію в печі існує необхідність проведення експерименту на готовій установці.

Установку можна рекомендувати для перевірки її на практиці для удосконалення електромагнітних методів перемішування металу та методів плавлення легковажних частинок металів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Stål R., Hanley P. Electromagnetic stirring in aluminum ladles // ABB Value Paper. — 2009. — С. 182.
2. Современные устройства для электромагнитного перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах повышенной емкости. / В. Дубоделов [та ін.] // Металл и литье Украины. — 2008. — С. 12—17.
3. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. / J. Grzella [та ін.] // Metallurgical furnaces. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. — 2003. — DOI: 10.1002/14356007.b04_339.
4. Г.Ю. К. Конспект лекцій з дисципліни «Металургійні печі» для студентів підготовки напряму 6.050401 Металургія. — Кам'янське; ДДТУ, 2016. — 36 с.
5. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. / С. Ладохин [и др.]. — К.: Сталь, 2007. — 626 с.
6. Губинский В. Металлургические печи: Учеб. пособие. — Днепропетровск: НМетАУ, 2006. — 85 с.
7. Тир Л. Л., Столов М. Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией металла в электропечах 2-е изд. — Москва: Металлургия, 1991. — 280 с. — ISBN 978-985-06-2365-2.
8. Моисеев Ю., Личак А., Слажнев Н. Перемешивание и циркуляция жидкого металла при его индукционной плавке и разливке. // Процессы литья. №2(98). — 2013. — С. 32—39.
9. Spitz W. Eckenbach C. Channel-type versus coreless induction furnaces. // Aluminium. — 2013. — С. 46—49.

10. Некрасов Г. Б., Одарченко И. Б. Основы технологии литейного производства. Плавка, заливка металла, кокильное литье. — Минск: Вышэйшая школа, 2013. — 223 с. — ISBN 978-985-06-2365-2.
11. Clark P. Mechanical pumps for high-temperature liquid metal. // Mechanical Engineering. — 1953. — С. 246—252.
12. Schwarz M. Simulation of gas injection into liquid melts. // Applied Mathematical Modelling. Volume 20, issue 1. — 1996. — С. 41—51.
13. Explore Pervasive Engineering Simulation. — URL: <https://www.ansys.com/>.
14. Altair Flux. — URL: <http://magsoft-flux.com/products/flux>.
15. LS-DYNA A combined Implicit/Explicit solver. — URL: <http://www.ls-dyna.com/>.
16. Multiphysics simulation just got better, faster, more accessible. — URL: <https://www.comsol.com/>.
17. Batchelor G. An Introduction To Fluid Dynamics. — 1967.
18. Колмогоров А. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости Т.6. — 1942. — С. 56—58.
19. Maxwell J. A treatise on electricity and magnetism. — Clarendon Press., 1873.
20. Подольцев А., Кучерявая И. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств // Технічна електродинаміка. — 2015. — С. 3—15.
21. Pope S. Turbulent flows. — Cambridge University Press, 2000. — С. 806.