

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
ННІ «ДНІПРОВСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
ННІ «ДНІПРОВСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ЩЕРБАЧОВ ВАДИМ РОДІОНОВИЧ**

УДК 669.162.262.4 : 669.162.21

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ВДОСКОНАЛЕННЯ УПРАВЛІННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯМ ДОМЕННОЇ  
ПЕЧІ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЮ ШИХТОЮ НА ОСНОВІ  
ІНФОРМАЦІЇ ПРО ПАРАМЕТРИ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ**

136 – *Металургія*

13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Щербачов В.Р.

Науковий керівник – Муравйова Ірина Геннадіївна, доктор технічних наук,  
професор

Дніпро – 2026

## АНОТАЦІЯ

Щербачов В.Р. Вдосконалення управління завантаженням доменної печі багатокомпонентною шихтою на основі інформації про параметри пластичної зони. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю спеціальністю 136 – «Металургія». Дніпровський металургійний інститут Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, 2026.

Метою роботи є підвищення ресурсо- та енергоефективності технології доменної плавки за рахунок наукового обґрунтування управляючих впливів на хід печі шляхом вибору та корегування параметрів режиму завантаження шихтових матеріалів, що реалізують формування раціональної структури стовпа шихти у доменній печі.

В основу дисертації покладені результати наукових досліджень, що отримані у ході виконання науково-дослідних робіт за тематичними планами Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України:

Виконано аналіз відомих методів визначення форми та положення пластичної зони в доменній печі та показані актуальність і перспективність розробки нових математичних моделей та методів оперативного визначення параметрів пластичної зони у змінних умовах плавки з використанням різних засобів контролю розподілу шихти та газового потоку.

Запропоновано новий метод визначення параметрів пластичної зони (форми, товщини та положення) у доменній печі, оснащених термовимірювальними зондами над поверхнею засипу або іншими засобами контролю розподілу температури газового потоку та/або поверхні засипу.

Метод базується на систематизованій сукупності математичних моделей:

- комплексної математичної моделі завантаження компонентів в бункер завантажувального пристрою, вивантаження з нього, руху по тракту ЗП та розподілу на поверхні засипу;

- математичних моделей визначення температур плавлення та розм'якшення залізвмісних компонентів шихти в зонах печі;

- математичної моделі визначення площі поверхні плавлення, удосконаленої шляхом розрахунку тепла у нижній зоні печі, які поєднуються з новим способом визначення меж пластичної зони поверхонь розм'якшення та плавлення.

Показана можливість визначення координат ліній розм'якшення та плавлення в доменній печі та візуалізації пластичної зони у доменній печі за допомогою розробленого метода в різних умовах її роботи, що досліджувались у чотирьох визначених періодах. Обґрунтованість та адекватність запропонованого методу визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі підтверджена результатами факторного аналізу впливу технологічних умов доменної плавки на положення пластичної зони. Розроблено критерій оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі для оцінки раціональності параметрів пластичної зони доменної печі у поточних технологічних умовах плавки. Виконані дослідження з встановлення взаємозв'язків параметрів пластичної зони з температурою газу над поверхнею засипу шихти, рудним навантаженням та складом залізорудної суміші у кільцевих зонах доменної печі. Показана можливість корегування параметрів пластичної зони шляхом зміни розподілу рудного навантаження у кільцевих зонах по радіусу колошника доменної печі, а також характеристик розподілу компонентів, зокрема, відношення кількості окатишів і агломерату у цих зонах шляхом управління параметрами формування залізорудних порцій шихти. Отримані формули для визначення уставки розташування дози компонента в об'ємі порції при заданих вмісті компонента у кільцевій зоні та вмісті його у шихті. На основі встановлених нових зв'язків параметрів пластичної зони з показниками розподілу шихтових матеріалів по радіусу

колошника доменної печі (рудне навантаження та вміст компонентів шихти в зонах колошника) розроблено спосіб обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі з метою поліпшення техніко – економічних показників доменної плавки та підвищення її ефективності. Новий спосіб має перспективу використання у складі експертних систем підтримки прийняття рішень з управління ходом доменної плавки.

**Ключові слова:** доменна піч, розподіл компонентів шихти, суміш, хімічний склад, температура, відновлення оксидів заліза, математична модель, структура стовпа шихти, когезія, пластична зона, пиловугільне паливо, корегування характеристик, термовимірювальні зонди, режим завантаження.

### ABSTRACT

Shcherbachov V.R. Improvement of control of loading of a blast furnace with a multicomponent charge based on information about the parameters of the cohesive zone

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 136 – «Metallurgy».

Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2026.

The aim of the work is to increase the resource and energy efficiency of blast furnace smelting technology through the scientific substantiation of control influences on the furnace operation by selecting and adjusting the parameters of the burden charging regime, which ensure the formation of an optimal burden column structure in the blast furnace.

The dissertation is based on the results of scientific research obtained during the implementation of research projects according to the thematic plans of the Z.I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine.

An analysis of known methods for determining the shape and position of the cohesive zone in the blast furnace was carried out, and the relevance and prospects of developing new mathematical models and methods for operational determination of cohesive zone parameters under variable smelting conditions were demonstrated, using various means of monitoring the distribution of burden and gas flow.

A new method for determining the parameters of the cohesive zone (shape, thickness, and position) in a blast furnace equipped with thermometric probes above the burden surface or other means of monitoring the temperature distribution of the gas flow and/or burden surface is proposed.

The method is based on a systematized set of mathematical models:

- a complex mathematical model of the charging of components into the hopper of the charging system, their discharge, movement along the chute, and distribution on the burden surface;
- mathematical models for determining the melting and softening temperatures of iron-containing burden components in furnace zones;
- a mathematical model for determining the melting surface area, improved by calculating heat in the lower furnace zone, combined with a new method for determining the boundaries of the cohesive zone at the softening and melting surfaces.

The possibility of determining the coordinates of the softening and melting lines in the blast furnace and visualizing the cohesive zone under different operating conditions, studied in four defined periods, is demonstrated. The validity and adequacy of the proposed method for determining the shape and position of the cohesive zone in the blast furnace are confirmed by the results of a factor analysis of the influence of blast furnace operating conditions on the cohesive zone position.

A criterion for assessing the shape and position of the cohesive zone in the blast furnace was developed to evaluate the rationality of cohesive zone parameters under current smelting conditions. Studies were carried out to establish the relationships between cohesive zone parameters and the gas temperature above the burden

surface, the ore burden distribution, and the composition of the iron ore mixture in the blast furnace's ring zones.

The possibility of adjusting the cohesive zone parameters by changing the distribution of ore burden in the ring zones along the furnace bosh radius, as well as the characteristics of component distribution—particularly the ratio of pellets to sinter in these zones—through the control of the formation parameters of the iron ore portions of the burden, was demonstrated. Formulas were obtained for determining the setpoint of component placement within a portion for a given component content in a ring zone and in the total burden.

Based on the newly established relationships between cohesive zone parameters and the distribution indicators of burden materials along the furnace bosh radius (ore burden and component content in bosh zones), a method for justified adjustment of the burden charging regime characteristics was developed. This method ensures the formation of rational cohesive zone parameters in the blast furnace to improve the technical and economic performance of blast furnace smelting and increase its efficiency. The proposed method has the potential for use in expert decision support systems for blast furnace operation management.

**Keywords:** blast furnace, burden distribution, mixture, chemical composition, temperature, reduction of iron oxides, mathematical model, burden column structure, cohesion, cohesive zone, pulverized coal fuel, adjustment of characteristics, thermometric probes, charging regime

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Публікації в зарубіжних фахових виданнях або виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних*

1. Повышение энергоэффективности доменной плавки за счет выбора рациональных параметров режима загрузки многокомпонентной шихты / Muraviova I.G., Ivancha N.G., Vishniakov V.I., Shcherbachov V.R., Ermolina K.P. // Проблемы региональной энергетики. – 2022. – N2 (54). –

- P. 53-62. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.05>,  
<https://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni-jurnal-254-2022>
2. Improvement of the Burden Column Structure by Controlling the Multicomponent Burden Loading Mode into the Blast Furnace / Ivancha N.G., Murav'yova I.G., Vishnyakov V.I., Shcherbachov V.R., Ermolina E.P. // PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE (Moldova). – 2023. – V.2 (58). – P. 138-149. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.05>,  
<https://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni-jurnal-258-2023>

*Публікації у наукових фахових виданнях України*

3. Метод визначення положення і форми пластичної зони доменної печі з використанням показників розподілу температури газового потоку / Muravyova I.H., Ivancha M.H., Shcherbachov V.R., Vishnyakov V.I., Ermolina K.P., Biloshapka O.O., Khodotova N.Ye. // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2022. – № 36. – P. 95-107.  
[https://jrn.isi.gov.ua/wp-content/uploads/2023/02/sb36\\_2022.pdf?](https://jrn.isi.gov.ua/wp-content/uploads/2023/02/sb36_2022.pdf?),  
 DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-95-108>
4. Удосконалення технологічних вимог до розподілу шихтових матеріалів та газового потоку при роботі доменних печей з низьким вмістом кремнію у чавуні та оцінка можливості їх реалізації на сучасних доменних печах / Ivancha M.H., Nesterov O.S., Muravyova I.H., Garmash L.I., Vishnyakov V.I., Shcherbachov V.R., Ermolina K.P. // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2023. – № 37. – P. 76-103. [https://jrn.isi.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/Sb2023\\_37-2.pdf?](https://jrn.isi.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/Sb2023_37-2.pdf?),  
 DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-76-104>
5. Узагальнення результатів досліджень впливу збільшення вмісту водню в дутті та його розподілу по радіусу доменної печі на технологічний режим доменної плавки / Muravyova I.H., Chaika O.L., Ivancha M.H., Kornilov B.V., Merkulov O.Ye., Nesterov O.S., Garmash L.I., Vishnyakov V.I., Shcherbachov V.R., Ermolina K.P. // Фундаментальні та прикладні

- проблеми чорної металургії. – 2024. – № 38. – Р. 59-102.  
[https://jrn.isi.gov.ua/sb/sb38/Sb2024\\_38.pdf?](https://jrn.isi.gov.ua/sb/sb38/Sb2024_38.pdf?), DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-59-102>
6. Удосконалення методів розрахунку розподілу компонентів шихти в об'ємі доменної печі / Ivancha M.H., Vishnyakov V.I., Muravyova I.H., Biloshapka O.O., Shcherbachov V.R., Ermolina K.P. // Теорія і практика металургії.– 2025 –№ 2.<https://tpm.ust.edu.ua/article/view/343325/335140> ?, DOI: <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2025.14>
7. Методи розрахунку та математичні моделі розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі, що застосовуються у технологічній та дослідній практиці / Ivancha M.H., Vishnyakov V.I., Muravyova I.H., Garmash L.I., Shcherbachov V.R., Biloshapka O.O., Ermolina K.P. // // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2026. – № 40.
- Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації*
8. Метод визначення положення і форми пластичної зони доменної печі з урахуванням показників розподілу температур газового потоку по радіусу колошника / Muravyova I.G., Ivancha M.G., Shcherbachov V.R., Vishnyakov V.I. // XIX Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія 2023». – Харків, НТУ «ХП», 2023 р.  
<https://repository.kpi.kharkov.ua/items/a95db2dd-b6ab-40e4-8115-98daf58d2d33>
9. Комплексна математична модель процесу завантаження багатокомпонентної шихти в доменну піч / Ivancha M.G., Vishnyakov V.I., Muravyova I.G., Shcherbachov V.R. // Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні 2024». – Дніпро, Інститут промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій.  
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/1768>
10. Експертна система вибору оптимального складу багатокомпонентної

шихти на основі закономірностей фізико-хімічних перетворень з урахуванням розподілу компонентів в доменній печі / Muravyova I.G., Togobytska D.M., Byelkova A.I., Ivancha M.G., Vishnyakov V.I., Stepanenko D.A., Shcherbachov V.R. // XX Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2024». – Харків, НТУ «ХП», 2024 р. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/98cbea2e-ee53-43a5-b2bd-f8d2b9b471a5>

11. Аналіз відомих методів визначення форми та положення пластичної зони в доменній печі / Muravyova I.G., Ivancha M.G., Vishnyakov V.I., Shcherbachov V.R. // XX Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2024». – Харків, НТУ «ХП», 2023 р.
12. Технологія завантаження багатокомпонентної шихти в сучасні доменні печі з безконусними завантажувальними пристроями / Ivancha M.G., Muravyova I.G., Vishnyakov V.I., Shcherbachov V.R., Ermolina K.P. // Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства», 2024 р. – Кривий Ріг, Криворізький національний університет. <https://www.knu.edu.ua/konferencii/mizhnarodna-naukovo-tehnichna-konferenciya-rozvytok-promyslovosti-ta-suspil-stva-2024-r>

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	12
1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМИ ТА ПОЛОЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ ТА ЗАСНОВАНИХ НА ЦІЙ ІНФОРМАЦІЇ СПОСОБІВ УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ.....	21
1.1. Аналіз відомих методів визначення форми та положення пластичної зони в доменній печі.....	21
1.2 Аналіз відомих способів управління доменною плавкою на основі інформації про форму та положення пластичної зони в доменній печі .....	33
Висновки до розділу 1 .....	50
2 РОЗРОБКА НОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ І ФОРМИ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ, ЗАСНОВАНОГО НА ПОКАЗНИКАХ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВОГО ПОТОКУ ПО РАДІУСУ КОЛОШНИКА.....	51
2.1 Основні положення та структурні складові методу.....	51
2.2 Новий спосіб визначення меж пластичної зони.....	62
Висновки до розділу 2 .....	65
3 РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМИ І ПОЛОЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ, ОСНАЩЕНОЇ ТЕРМОВІМІРЮВАЛЬНИМИ БАЛКАМИ НАД ПОВЕРХНЕЮ ЗАСИПУ ШИХТИ, ЗА ДОПОМОГОЮ НОВОГО МЕТОДУ .....	66
3.1. Вибір дослідницьких періодів роботи доменної печі у різних технологічних умовах для визначення форми і положення пластичної зони за допомогою нового методу .....	66
3.2 Розрахункові дослідження щодо визначення площі поверхні плавлення в доменній печі.....	70
3.3 Визначення положення кореня пластичної зони.....	74

3.4 Визначення координат положення ліній розм'якшення та плавлення у доменній печі.....	78
3.5 Візуалізація розрахованих за допомогою запропонованого методу меж пластичної зони доменної печі.....	83
3.6 Факторний аналіз впливу технологічних умов доменної плавки на положення пластичної зони у доменній печі.....	93
Висновки до розділу 3 .....	102
<b>4 РОЗРОБКА КРИТЕРІЮ ОЦІНКИ ФОРМИ І ПОЛОЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ, ЯКА ОСНАЩЕНА ЗАСОБАМИ КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗПОДІЛУ ГАЗОВОГО ПОТОКУ .....</b>	<b>104</b>
Висновки до розділу 4 .....	108
<b>5 РОЗРОБКА СПОСОБУ ОБҐРУНТОВАНОГО КОРИГУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШИХТИ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ .....</b>	<b>110</b>
Висновки до розділу 5 .....	135
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	139
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	143

## ВСТУП

**Актуальність.** Ефективність доменної плавки та якість чавуну, який виплавляється, багато в чому визначаються характеристиками структури стовпа шихтових матеріалів, що формується у процесі завантаження доменної печі. Аналіз результатів, отриманих провідними спеціалістами світу, та досвід досліджень доменної плавки показав, що розробка нових науково обґрунтованих способів управління процесом плавки, які забезпечують досягнення високої її ефективності, повинна у максимально можливій мірі враховувати закономірності та особливості формування структури стовпа шихти у доменній печі, одним з найважливіших елементів якої є пластична зона (ПЗ). В залежності від розподілу шихтових матеріалів, їх якості та параметрів дуттєвого режиму, у доменній печі формується пластична зона різного профілю, від якого залежить техніко - економічна ефективність доменної плавки, експлуатаційні показники та тривалість кампанії доменної печі. Безпосередньо контролювати формування пластичної зони у доменній печі не представляється можливим, тому актуальною є розробка аналітичних методів визначення форми та положення пластичної зони. У зв'язку з оснащенням доменних печей термовимірювальними балками над поверхнею засипу, які дозволяють здійснювати контроль розподілу газового потоку у кільцевих зонах колошнику, актуальність набуває розробка методу визначення параметрів пластичної зони, заснованого на цій інформації.

Відомо, що пластична зона, будучи важливим структурним елементом доменної печі, який, головним чином, формується під впливом режиму завантаження доменної печі, визначає розподіл газового потоку та основні показники доменної плавки. Як правило, вибір параметрів режиму завантаження доменної печі здійснюється на основі оцінки показників розподілу шихтових матеріалів за допомогою розрахункових методів та наступного аналізу результатів у сукупності з параметрами та показниками доменної плавки. Ряд вчених-дослідників керувались допущенням про тісний

зв'язок розподілу рудних навантажень на колошнику печі з конфігурацією пластичної зони. Це допущення коректне тільки для умов завантаження у піч моношихти, яка характеризується однаковими високотемпературними властивостями матеріалів у різних перетинах печі. Разом з тим, сучасна доменна шихта є багатокомпонентною. Прогнозувати високотемпературні властивості залізовмісних шихтових матеріалів у різних зонах печі до недавнього часу не представлялося можливим. В ІЧМ розроблено комплексну модель, яка дозволяє розрахунковим методом визначати розподіл компонентів шихти по радіусу колошника доменної печі, що дозволяє визначити температури початку розм'якшення (які характеризують положення лінії розм'якшення) та початку плавлення (які характеризують положення лінії плавлення) у різних зонах печі.

Спрямоване варіювання розподілу рудних навантажень та компонентів шихти на колошнику доменної печі дозволить сформувати пластичну зону потрібної конфігурації, в найбільшій ступені відповідної поточним технологічним вимогам плавки. Тому особливу актуальність набуває розробка нового підходу до обґрунтування вибору ефективних параметрів режиму завантаження з урахуванням характеристик пластичної зони.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

В основу дисертації покладені результати наукових досліджень, що отримані у ході виконання науково-дослідних робіт за тематичними планами Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України: «Створення експертної системи вибору оптимального складу багатокомпонентної шихти на основі закономірностей фізико-хімічних перетворень з урахуванням розподілу компонентів в доменній печі» (№ держ. реєстрації 0117U004154); «Аналітичні дослідження впливу параметрів розподілу багатокомпонентної шихти на колошнику доменної печі на формування пластичної зони» (№ держ. реєстрації 0120U101188).

**Мета і задачі дисертаційної роботи.** Мета роботи – підвищення ресурсо- та енергоефективності технології доменної плавки за рахунок

наукового обґрунтування управляючих впливів на хід печі шляхом вибору та корегування параметрів режиму завантаження шихтових матеріалів, що реалізують формування раціональної структури стовпа шихти у доменній печі.

Для досягнення наведеної мети в роботі були поставлені та вирішені такі основні задачі:

- виконати аналіз відомих методів визначення форми та положення пластичної зони в доменній печі та заснованих на цій інформації способів управління доменною плавкою;

- удосконалити математичну модель визначення площі поверхні плавлення;

- розробити новий метод визначення положення і форми пластичної зони у доменній печі, оснащений термовимірювальними зондами над поверхнею засипу;

- виконати аналіз технологічних показників роботи доменної печі у чотирьох дослідних періодах, які відрізняються технологічними умовами плавки, та обґрунтувати вибір базових режимів;

- виконати розрахункові дослідження щодо визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі;

- виконати факторний аналіз впливу технологічних умов доменної лавки на положення пластичної зони у доменній печі;

- розробити критерій оцінки форми та положення пластичної зони в поточних умовах плавки;

- встановити зв'язки вертикальних координат точок лінії плавлення з температурою газу над поверхнею засипу та рудним навантаженням у рівних за площею кільцевих зонах доменної печі;

- встановити зв'язки значень вертикальних координат точок перетину середніх ліній кільцевих зон з лініями розм'якшення та плавлення та різності температур розм'якшення та плавлення з відношенням кількості окатишів і агломерату у цих зонах;

- отримати формули для визначення уставки розташування дози компонента в об'ємі порції при заданих вмісті компонента у кільцевій зоні та вмісті його у шихті;

- розробити спосіб обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі.

**Методи дослідження.** Робота є комплексним дослідженням, що ґрунтується на використанні сучасних методів математичного та фізико-хімічного моделювання. Розроблений метод визначення положення та параметрів пластичної зони ґрунтується на синтезі математичних моделей визначення розподілу компонентів шихти на колошнику печі, формування структури стовпа шихти, визначення площі поверхні плавлення та прогнозних моделей високотемпературних перетворень залізородних матеріалів. Адекватність методу підтверджується результатами виконаного факторного аналізу впливу технологічних умов доменної плавки на положення пластичної зони у доменній печі.

**Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:**

Виконано наукове обґрунтування використання інформації о параметрах пластичної зони в доменній печі для вибору характеристик режиму завантаження багатокомпонентної шихти, включаючи програму розподілу порцій та параметри їх формування, які забезпечують раціональний розподіл компонентів шихти по радіусу колошника.

1. Вперше для визначення параметрів пластичної зони в доменній печі застосовано підхід, який заснований на комплексному використанні інформації про розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу шихти (або температур поверхні засипу) та математичних моделей процесу завантаження доменної печі, температурно – відновлювальної обробки шихти з утворенням розплавів та моделі поверхні плавлення, що дозволило розробити новий метод визначення параметрів пластичної зони у доменній печі. На відміну від відомих методів запропонований враховує розподіл

компонентів шихти по кільцевим зонам колошника, відмінності складу сумішей компонентів у різних зонах колошника та обумовлену цим різницю температурних умов агрегатних перетворень по перерізу печі. Адекватність запропонованого методу підтверджена виконаними аналітичними дослідженнями, в результаті яких встановлені (виявлені) зв'язки параметрів пластичної зони, розрахованих на основі запропонованого методу, з основними технологічними параметрами процесу плавки.

2. Вперше встановлені зв'язки рудного навантаження в кільцевих зонах колошника доменної печі з координатами положення точок лінії плавлення у цих зонах та показано, що залежність цих параметрів може бути представлена степеневою функцією. Встановлено, що зміна рудного навантаження на одну й ту ж величину у різних зонах доменної печі може обумовлювати зміщення лінії плавлення, яке відрізняється у 3 – 5 рази: для заданої зміни вертикальної координати лінії плавлення в осьовій та приосьовій зонах потрібна, як правило, значно менша зміна рудного навантаження, ніж у проміжній та периферійній зонах.

3. Вперше встановлені особливості зміни координат лінії плавлення при зміні рудного навантаження в різних кільцевих зонах колошника при роботі доменної печі з використанням пиловугільного палива – зміна координати лінії плавлення на одиницю зміни рудного навантаження в осьовій та приосьовій зонах в 1,7, а у проміжній та периферійній зонах – в 2,2 рази менше, ніж при роботі доменної печі без використання пиловугільного палива.

4. Вперше встановлені зв'язки величини вмісту залізовмісних компонентів шихти в кільцевих зонах печі з параметрами пластичної зони. Показано, що величина температурного інтервалу пластичної зони у будь якій кільцевій зоні печі прямо пропорційна співвідношенню кількості окатишів та агломерату у даній кільцевій зоні. Встановлено, що зміна співвідношення кількості окатишів та агломерату у кільцевій зоні печі на 0,1 обумовлює в ній зміну температурного інтервалу пластичної зони на 5 – 7 °С.

5. Для підвищення ефективності плавки запропоновано та обґрунтовано новий підхід до вибору характеристик режиму завантаження багатокомпонентної шихти, оснований на формуванні раціональних параметрів пластичної зони шляхом корегування розподілу рудних навантажень та компонентів залізородної частини шихти в об'ємі печі.

#### **Практичне значення результатів роботи.**

Практичне значення мають розроблені новий метод визначення параметрів пластичної зони у доменній печі та спосіб обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі. Ці розробки можуть бути використані у технологічній практиці для вибору характеристик режиму завантаження багатокомпонентної шихти, включаючи програму розподілу порцій та параметри їх формування, які забезпечують раціональний розподіл компонентів шихти по радіусу колошника для підвищення ефективності доменної плавки.

Для корегування та досягнення раціональних геометричних параметрів зони розм'якшення – плавлення без корегування розподілу рудного навантаження запропоноване використання зміни співвідношення основних залізовмісних компонентів – агломерату та окатишів у кільцевих зонах колошника.

Для доменних печей з різними структурами систем завантаження отримані формули для визначення уставки розташування дози компонента в об'ємі порції при заданих вмісті компонента у кільцевій зоні та вмісті його у шихті. Визначена уставка може використовуватися у якості управляючого параметру для регулювання розподілу конкретного компонента змішаної залізородної порції та направленою формування складу сумішей шихтових матеріалів у різних зонах колошника.

Практичне значення для корегування положення лінії плавлення має встановлена різниця її зміщення у різних зонах доменної печі, яке при зміні рудного навантаження на одну й ту ж величину, може відрізнятись у 3 – 5 рази:

для заданої зміни вертикальної координати лінії плавлення в осьовій та приосьовій зонах потрібна, як правило, значно менша зміна рудного навантаження, ніж у проміжній та периферійній зонах, що повинно враховуватися технологом при зміні параметрів режиму завантаження.

Для застосування запропонованого способу визначення та корегування параметрів пластичної зони у сучасних технологічних умовах встановлені особливості зміни координат лінії плавлення при роботі доменної печі з використанням пиловугільного палива - зміна координати лінії плавлення на одиницю зміни рудного навантаження в осьовій та приосьовій зонах в 1,7, а у проміжній та периферійній зонах – в 2,2 рази менше, ніж при роботі доменної печі без пиловугільного палива.

Розроблені методи є складовими інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень по управлінню доменною плавкою та експертної системи вибору оптимального складу шихти, які розроблені в ІЧМ НАНУ.

Розроблені методи можуть бути реалізовані у складі АСУ ТП доменних печей, оснащених системами контролю температури газового потоку та поверхні засипу шихти на колошнику.

Подана заявка до Українського національного офісу інтелектуальної власності та інновацій на державну реєстрацію винаходу «Спосіб визначення параметрів пластичної зони у доменній печі» (заявка U 2026 00325 від 20.01.26 р.).

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в рамках виконання науково-дослідницьких робіт та впроваджені в навчальний процес Українського державного університету науки і технологій при підготовці магістрів за спеціальністю 136-Металургія.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувач брав участь на всіх етапах досліджень, формулюванні мети і задач досліджень, проведенні розрахункових досліджень та встановленні зв'язків параметрів пластичної зони з характеристиками завантаження шихти, аналізі та узагальненні отриманих результатів.

Здобувачем розвинуті уявлення про формування пластичної зони у доменній печі, на основі чого розроблені нові методи визначення параметрів ПЗ та корегування параметрів процесу завантаження шихти. Здобувачем запропоновано критерій оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі та підтверджена його адекватність у різних умовах доменної плавки.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на наступних науково – інформаційних заходах: V, та VI International scientific congress «Society of ambient intelligence» (Kryvyi Rig, October 17-21, 2022 p., November 20-25, 2023 p.); XII Міжнародній науково-практичній конференції «Металургія 2023» (Київ-Харків, жовтень 2023 p.), Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (10, 11 квітня 2024 p.), XX Міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія. 2024. (28-30 травня 2024 p., м. Дніпро), Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (28 березня 2024 p., м. Кривий Ріг), Всеукраїнській науково-технічній конференції «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ» (Дніпро, «ІЧМ» ім. З.І. Некрасова НАН України. 14-16 листопада 2023 p., 19-20 листопада 2024), Міжнародній науково-практичній конференції «Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності і сталого розвитку» (22-25 квітня 2025p., м. Дніпро) та VIII International scientific congress «Society of ambient intelligence» (Kryvyi Rig, November-December 2025.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації опубліковано в 12 наукових працях: з них 2 статті в журналах, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та WoS; 5 статей у фахових виданнях, що відповідають переліку ДАК МОН України; 5 тез доповідей науково-практичних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з титульного аркуша, анотації, змісту, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст дисертації викладено на 122 сторінках. У розділах дисертації 26 рисунків і 18 таблиць. Список використаних джерел на 10 сторінках містить 83 найменування. Повний обсяг дисертації – 152 сторінки.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМИ ТА ПОЛОЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ ТА ЗАСНОВАНИХ НА ЦІЙ ІНФОРМАЦІЇ СПОСОБІВ УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ

#### **1.1. Аналіз відомих методів визначення форми та положення пластичної зони в доменній печі**

У виконаних нами раніше дослідженнях зроблено аналіз відомих способів визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі (ДП), результати якого опубліковані у статті [1]. Як показано у статті, найбільший об'єм досліджень щодо визначення положення пластичної зони виконаний на зарубіжних доменних печах з використанням наступних методів: із застосуванням індикаторів (радіоактивних або інертних газів, або радіоактивних ізотопів металу), вертикального або горизонтального зондування, рефлектометрії, вертикального розподілу теплового навантаження на футерівку печі, за інтенсивністю руху коксу у фурменій зоні, за допомогою акустичних методів [2]. Аналіз опублікованих результатів раніше виконаних досліджень показав, що основний об'єм робіт з вивчення особливостей формування пластичної зони у доменній печі було виконано у 70-х роках минулого століття [3]. Спрямованість їх визначили унікальні дослідження японських вчених, виконані на заморожених доменних печах, в результаті яких було встановлено, що стовп шихти в доменній печі є сукупністю структурних елементів, основним з яких є пластична зона. У наступні роки дослідження формування пластичної зони в доменній печі за допомогою математичних моделей активно продовжувалися у ФРН, КНР та Японії.

Найбільшого поширення на доменних печах Японії та інших зарубіжних доменних печах великого об'єму набули способи визначення параметрів зони плавлення за допомогою зондування стовпа шихти. Схема установки

горизонтальних зондів була аналогічна запропонованій раніше Інститутом чорної металургії та реалізованій в проектах доменних печей об'ємом 2000 м<sup>3</sup>, 2700 м<sup>3</sup> та 5000 м<sup>3</sup> меткомбінату «Криворіжсталь» і передбачала встановлення на рівні фурм, у середній та верхній частині шахти печей спеціальних горизонтальних зондів для відбору проб матеріалів та газів [4, 5].

Методи контролю зміни пластичної зони за допомогою зондів забезпечують лише точкові виміри та характеризуються недостатньою надійністю. Ці методи вимагають наявності спеціальних засобів контролю, які використовуються лише на деяких зарубіжних доменних печах. Слід зазначити, що визначення положення пластичної зони у доменній печі за допомогою зондування має дослідний характер і не дозволяє отримувати оперативну інформацію про зміну параметрів пластичної зони в процесі плавки.

При використанні радіоактивних індикаторів профіль зони плавлення визначається за величиною проміжку часу від моменту завантаження індикатора в піч до моменту реєстрації радіоактивності продуктів плавки або газу у газовідводах. Недоліки даного методу - неточне визначення часу перебування радіоактивного розплаву в горні, а при використанні контролю газів - можливість прориву оболонки індикатора замість плавлення оболонки, що істотно спотворює результати.

Фірма «Nippon Kokan» на доменній печі №2 об'ємом 4052 м<sup>3</sup> заводу в Огісімі (Японія) застосувала автоматизовану систему безперервного вимірювання рівня зони плавлення, розроблену на базі рефлектометричного методу (Time Domain Reflectometer – TDR). Відповідно до цього методу один або кілька коаксіальних або багатожильних кабелів вводять у піч через труби на колошнику і опускають разом із шихтою до пластичної зони. За допомогою пристрою TDR досліджували динаміку зони плавлення та вплив її положення на показники роботи доменної печі. Результати вимірів за допомогою цієї системи показали хорошу збіжність з даними, отриманими іншими методами (наприклад, вимірювання температури і втрат напору газового потоку).

Фірмою «Shin nippon seitetsu» розроблено та випробувано на доменній печі №4 об'ємом 2950 м<sup>3</sup> у Хірохаті (Японія) спосіб, згідно з яким положення пластичної зони визначали за допомогою термодатчиків, розміщених у вертикальних трубках з вогнетривкого та зносостійкого матеріалу, які закріплювались на горизонтальній балці та опускались у піч [6]. Інформація термопар оброблялась комп'ютером і відображалася на дисплеї. При визначенні меж пластичної зони виходили з припущення, що зверху вона обмежена ізотермою 1000°C, а знизу—1400°C.

Аналогічно зондуванню запропоновано спосіб визначення конфігурації пластичної зони за допомогою штанги, яку вводять у піч через спрямовуючу трубу [7]. Форма та розміри пластичної зони визначалися на основі аналізу швидкості руху штанги у різних точках по периферії та висоті печі, яка різко уповільнюється на межі пластичної зони.

Профіль пластичної зони визначають за даними вертикального розподілу температур плитових холодильників. Так, фірмою «Kobe Seikose» (Японія) у дослідженнях на доменній печі встановлено залежність між характером розподілу температури плитових холодильників за висотою та формою пластичної зони.

Фірма «Shin nippon seitetsu» розробила спосіб визначення положення кореневої частини зони плавлення шляхом вимірювання температури стінки у кількох точках по висоті печі. Положення кореня пластичної зони визначають по межі різкої зміни теплового навантаження на футерівку.

Для визначення положення пластичної зони фірма «Nippon Steel Corp.» використовує два і більше мікрохвильових вимірювальних пристроїв, розташованих на різних рівнях у заплечиках печі [8].

Пластичну зону оцінюють також за інтенсивністю руху коксу перед фурмами у зоні циркуляції. Для цього у фурменій прилад вводять горизонтальну трубку з оптичним волокном або системою лінз. За фотографіями підраховують кількість темних і світлих кусків коксу, що пройшли через зону горіння за певний проміжок часу. Спосіб заснований на

залежності між інтенсивністю руху коксу у фурменій зоні та об'ємом пластичної зони. Свідченням нормального об'єму зони плавлення є частка темних кусків коксу, що становить близько 25-50%. Збільшення або зменшення кількості темних кусків коксу є результатом зростання, або скорочення об'єму пластичної зони та сигналізує про необхідність корекції теплового стану печі та режиму завантаження.

Становлять інтерес способи контролю положення зони плавлення, що базуються на вимірі акустичних коливань, що виникають у доменній печі. Відомий спосіб контролю стану пластичної зони, що передбачає вимірювання рівня шуму газового потоку, який обумовлений миттєвими локальними змінами швидкості і тиску газу, що фільтрується через шар кускових матеріалів, і знаходиться у лінійній залежності від швидкості газового потоку [7]. Положення пластичної зони визначають у точці, рівень шуму в якій більше, ніж у два рази нижче заданого середнього рівня, вимірюваного у шахті та в заплечиках, тобто, вище та нижче меж пластичної зони.

Японські дослідники форму пластичної зони визначають наступними способами.

1. За температурою та складом газу, що визначається у декількох точках за допомогою зонду, який вводять у піч радіально в області колошника. При цьому виходять із того, що знаходиться в тому місці, де температура газу становить  $1000^{\circ}\text{C}$ , а вміст вуглекислого газу наближається до нуля [7].

2. За результатами вимірювань втрат напору по висоті печі [9-11].

Г.М. Нікітіним показана можливість визначення конфігурації пластичної зони за величиною проміжку часу від моменту завантаження в піч індикативного шару шихти до моменту відповідної зміни нижнього перепаду тиску газу в печі [12].

Особливістю перерахованих вище способів визначення положення та форми пластичної зони у доменній печі є те, що вони мають характер «точкових» вимірювань у дослідницьких цілях і не можуть бути використані у процесі оперативного контролю.

Альтернативою безпосереднім вимірам є математичні моделі для визначення положення та параметрів ПЗ у доменній печі.

Фірма «Kobe Seikose» (Японія) розробила модель тепло- та масопереносу, яка базується на даних вимірювань товщини шарів коксу та рудної частини шихти, їх крупності та порізності, розподілу температур та складу газу над та під рівнем засипу [13]. При умовному поділі печі на п'ять вертикальних концентричних зон з приблизно однаковими швидкостями газових потоків за допомогою моделі послідовно розраховували температуру шихти кожної подачі у напрямку зверху донизу та визначали положення пластичної зони (по верхній межі – ізотермі 1200°C). Відома також розроблена цією фірмою теплова модель печі, що базується на даних вертикального зондування [14]. Оцінка форми пластичної зони проводиться за тепловими навантаженнями на футерівку печі, що розраховуються за допомогою моделі.

Відома також модель визначення положення пластичної зони, яка покладена в основу управління доменним процесом на печах заводу фірми «Italsider» (Таранто, Італія), вхідними даними для якої є температура газів по радіусу колошника, параметри завантаження, характеристики шихтових матеріалів і технологічні параметри роботи печі [15].

Найбільшого ефекту при використанні математичної моделі пластичної зони досягли на доменній печі фірми «ThyssenKrupp» у Швельгерні [16]. Модель базується на даних контролю хімічного складу та технологічних параметрів шихтових матеріалів, температури та складу газів над і під рівнем засипу, а також на результатах вертикального зондування. Модель дозволяє розрахувати процеси, які відбуваються над пластичною зоною, тобто. визначити межі сухої зони, і навіть межі зони плавлення.

Фірмою «Nippon Kokan» (Японія) розроблено математичну модель, в якій профіль пластичної зони розраховується за допомогою диференціальних рівнянь теплопередачі газ – шихта та матеріального балансу [17]. Вхідними параметрами моделі, отриманими в результаті вимірювань, є параметри газу та товщини шарів шихти, отримані за допомогою газовідбірних зондів та

магнітометрів. Цією ж фірмою розроблена ще одна модель визначення форми пластичної зони, заснована на інформації, що одержана в результаті вимірювань товщин коксових і залізорудних шарів і параметрів газу на рівні колошника [18]. Задовільні результати використання моделі значною мірою залежать від точності вхідної інформації. Адекватність математичної моделі підтверджувалася шляхом зіставлення розрахункових профілів температури та складу газу з профілями, отриманими при вимірах за допомогою горизонтального зонда за методом TDR, розробленим фірмою «Nippon Kokan».

На основі оцінки газового потоку та розрахунку теплообмінних процесів між шихтою та газом фірмою «Shin nippon seitetsu» розроблено математичну модель пластичної зони, що враховує розподіл матеріалів на колошнику та профіль коксової насадки [19]. За допомогою моделі розраховують розподіл тиску газу в шахті та за цими даними визначають конфігурацію пластичної зони.

На одній із японських печей фірмою «Kobe Seikose» на колошнику та в шахті були встановлені газозабірні труби, забезпечені термopарами, трубками Піто у поєднанні з тепловими витратомірами газу та механічними зондами для визначення профілю шахти. За даними вимірювань розроблено математичну модель стану кускової зони та профілю пластичної зони, за допомогою якої прогнозували тепловий стан печі (за вмістом кремнію у чавуні) [20].

В основу математичної моделі розподілу газового потоку в зоні плавлення, розробленої австралійською фірмою «Australian Iron and Steel», покладено гіпотезу про газонепроникність шарів розм'якшених матеріалів, а також дані про подрібнення шихти в доменній печі. Модель дозволяє визначати вплив розташування та профілю зони плавлення на розподіл тиску та потоку газу по висоті печі.

Докладний аналіз методів визначення параметрів пластичної зони представлений також у статті В.М. Паршакова [21, 22]. Особливий акцент зроблено на розробленій під керівництвом автора двомірної математичної

моделі, що описує процеси, що протікають по висоті та перерізу печі від рівня засипу до чавунної льотки. Двовимірна математична модель дозволяє визначити розподіл температур матеріалів та газів за висотою у умовно виділених кільцевих частках шахти печі та положення пластичної зони, як простір між двома ізотермами – початку та кінця плавлення залізородних матеріалів. Модель функціонує у складі автоматизованої системи оперативного визначення зони плавлення в доменній печі та дозволяє здійснювати безперервний автоматичний контроль у реальному часі.

Публікації останніх років свідчать про подальший розвиток досліджень з розробки математичних моделей для визначення параметрів пластичної зони, в тому числі, моделей, що враховують нестационарні процеси в печі. У цьому напрямі продовжує дослідження фірма "Nippon Steel Corp.", співробітниками якої розроблено метод визначення та візуалізації положення кореня пластичної зони при допущенні, що корінь впирається в центри тяжкості фігур, визначених за результатами оцінки зміни ряду контрольованих параметрів у часі [3]. У [23] запропоновано метод визначення положення кореня пластичної зони на підставі аналізу характеру зміни температур вогнетривкої кладки шахти та охолоджувальної води, а також ступеня використання CO по висоті печі та інших параметрів. [24] містить описання методу визначення характеристик пластичної зони в доменній печі, основу якого складають рівняння збереження маси і рівняння збереження теплоти, яким, на думку авторів, підпорядковуються хімічні реакції, що відбуваються в печі. Виходячи з цього припущення, розділивши горизонтальний переріз доменної печі на ряд концентричних кіл, автори визначають температурні поля печі, а потім, залежно від плавкості залізовмісних шихтових матеріалів, прогнозуються форма і положення пластичної зони.

У [25] викладено результати розробки математичної моделі, що описує перебіг рідини, тепло- та масоперенесення, а також хімічні реакції в доменній печі. На відміну від попередніх моделей, запропонована розглядає три варіанти структури шарів пластичної зони – шаруваті, ізотропні неслоїсті та

анізотропні. Авторами виконано дослідження впливу цих трьох варіантів на процеси розподілу газового потоку в печі. Показано, що розрахункова оцінка параметрів пластичної зони, представлені у виді шарів залізовмісних матеріалів і коксу, які чергуються відповідно до пошарового завантаження шихти, дозволяє прогнозувати (моделювати) проходження газового потоку через «коксіві вікна».

Для визначення форми пластичної зони [26] розглядають масо - і теплообмін в трьох окремих зонах печі. У якості початкової інформації задаються показання зонда, що вимірює склад і температуру газу і розташованого нижче рівня засипу шихти. Розраховані, як ізотерми, лінії початку розм'якшення та плавлення визначають розташування пластичної зони в печі.

Відомий також підхід до визначення форми та положення пластичної зони доменної печі, запропонований дослідниками «Tata Steel Ltd.» (Індія) [27,28], які використовують комбінований підхід до визначення форми та положення пластичної зони, що передбачає використання математичної моделі у вигляді диференціальних рівнянь, у сукупності з показниками роботи печі, та інформації, отриманої за допомогою різних зондувальних пристроїв.

Дослідники США та Канади при моделюванні процесів у шахті доменної печі [29] розглядали, у тому числі, формування пластичної зони. Верхня межа пластичної зони визначається, як постійна температура, а нижня межа – лінія плавлення визначається, як температура ліквідусу. Причому, температура ліквідусу встановлена як функція хімічного складу шлаку. Для отримання такої функції авторами виконано регресійний аналіз на основі даних, представлених у літературних джерелах, та отримано поліноміальну регресію 3-го порядку для розрахунку температури ліквідусу:

$$T_{liq} = s + a_1 \cdot (Al_2O_3) + b_1 \cdot (CaO) + c_1 \cdot (MgO) + a_2 \cdot (Al_2O_3)^2 + b_2 \cdot (CaO)^2 + c_2 \cdot (MgO)^2 + d_2 \cdot (SiO_2)^2 + a_3 \cdot (Al_2O_3)^3 + b_3 \cdot (CaO)^3 + c_3 \cdot (MgO)^3 + d_3 \cdot (SiO_2)^3, \quad (1.1)$$

де

$s, a_{1-3}, b_{1-3}, c_{1-3}, d_{2-3}$ , – чисельні коефіцієнти;

$(Al_2O_3), (CaO), (MgO), (SiO_2)$  – вміст компонентів шлаку, %.

Значення коефіцієнтів представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнтів рівняння поліноміальної регресії 3-го порядку

$s$	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$d_2$	$a_3$	$b_3$	$c_3$	$d_3$
19230,7	-203,96	-167,45	-220,31	-0,6061	-1,4049	1,83228	-5,668	0,02512	0,01752	-0,0394	0,04935

Для оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі дослідники активно використовують моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD). У [30] наведено результати вдосконалення моделі доменної плавки, яка раніше розроблена фірмою «Nippon Steel Corp.» На додаток до існуючих приватних моделей (масоперенесення, реакцій та теплообміну в сухій та пластичній зонах печі) розроблено моделі для оцінки розподілу рудних навантажень на колошнику, модель фурменого вогнища, а також модель для оцінки порізності зони малорухливих матеріалів. Всі ці моделі, що описують потокові процеси доменної печі, інтегровані в модель, використовувану для розрахунку параметрів пластичної зони. Аналогічний математичний апарат використовується у роботах інших дослідників [31-34]. У [31] модель докладно описує шарувату структуру пластичної зони.

В [33] представлена розроблена авторами модель, що включає опис динаміки газового потоку, руху шихти, хімічних реакцій, тепло - і масопереносу між газовою фазою і шихтою. Шихта в доменній печі представляється у вигляді шарів залізної руди і коксу, що чергуються. Багатошарова модель CFD, на думку авторів, досить точно оцінює форму та розташування пластичної зони, які визначаються ітераційним методом на основі розподілу температури плавлення рудної частини шихти. З робіт, в яких також використовуються CFD методи моделювання для визначення форми та положення пластичної зони в доменній печі, слід зазначити [35], де досліджено вплив програми завантаження шихти на положення пластичної

зони – її кореня та вершини. При цьому положення кореня пластичної зони визначається за змінами температури води, що охолоджує нижню частину шахти печі.

Відома також робота з прогнозування положення та конфігурації пластичної зони, в якій для вирішення цього завдання об'єднані модель обчислювальної гідродинаміки (CFD) та метод опорних векторів (SVM) [36]. Авторами створено осесиметричну двовимірну стаціонарну CFD - модель для опису процесів перебігу рідини, тепло- і масопереносу в шахті доменної печі. Прогноз положення пластичної зони здійснюється за допомогою SVM.

У розробках моделей визначення положення пластичної зони в доменній печі використовується також метод дискретних елементів (DEM) [37]. Особливістю застосування для умов доменної плавки цього методу є дискретизація шихти в об'ємі печі на її окремі елементи, що передбачає використання численних припущень про їх взаємодію.

В останні роки при розробці математичних моделей доменної плавки, зокрема моделі визначення пластичної зони, дослідники поєднують континуальну та дискретну моделі. Об'єднана таким чином модель отримала термінологію CFD - DEM модель [38-40]. Модель CFD - DEM підходить для моделювання систем «рідина – тверде тіло» або «рідина – частинки». У типовій моделі CFD - DEM фазовий рух дискретних твердих тіл або частинок описується за допомогою методу дискретних елементів (DEM), що передбачає використання законів Ньютона до руху кожної частинки, а потік суцільної рідини описується локальним усередненим рівнянням Нав'є-Стокса, яке вирішується за допомогою методів традиційної обчислювальної гідродинаміки DEM – CFD. У дослідженнях, описаних у [39], характеристики плавлення залізної руди і структура шарів при роботі печі з низькою витратою коксу були введені в модель DEM - CFD, а потім змодельовано поведінку газу і шару, що рухається, в доменній печі. В результаті розрахунку продемонстровано вплив товщини коксових вікон у пластичній зоні на витрату газу.

На увагу заслуговує розроблена в ІЧМ д.т.н. Товаровським Й.Г. багатозонна математична модель процесів доменної плавки, яка включає методику оцінки параметрів пластичної зони з урахуванням впливу ступеня відновлення заліза та приходу лужних оксидів, що сприяє підвищенню системності та повноти аналізу процесів та дозволяє кількісно оцінити вплив параметрів пластичної зони на кінцеві показники плавки [41].

З аналізу публікацій останніх років випливає, що розвиток методів визначення параметрів пластичної зони здійснюється у напрямі створення математичних моделей, які розроблені з урахуванням низки припущень і не описують динаміку процесу плавки. Ці особливості не дозволяють використовувати моделі в оперативному процесі вибору управляючих впливів на хід плавки. Винятком (згідно з відомостями, що наведені в літературних джерелах) є модель пластичної зони, розроблена під керівництвом В.М. Паршакова, яка функціонує у складі автоматизованої системи оперативного автоматичного визначення зони плавлення у доменній печі та дозволяє здійснювати безперервний автоматичний контроль її параметрів у реальному часі. Ефективність цієї моделі оцінити неможливо у зв'язку з відсутністю опублікованих даних.

Незважаючи на розширення можливостей визначення положення та параметрів пластичної зони у доменній печі за допомогою математичного моделювання, актуальними залишаються питання створення методів оцінки та оперативного контролю параметрів цієї зони та їх змін безпосередньо у процесі плавки. В останні роки за результатами освоєння на ДП №9 ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» першої вітчизняної системи контролю поверхні засипу шихти ІЧМ розроблено метод визначення положення пластичної зони в доменній печі, що ґрунтується на оцінці варіації швидкості опускання поверхні шихти на колошнику [42]. Відповідно до цього методу розраховані у кожній контрольованій зоні на основі встановлених часових інтервалів між максимальними середньоквадратичними відхіленнями швидкості ( $t_{max}$ ), що перевищують середнє значення, та усередненими за ці

інтервали швидкостями опускання шахти ( $V_{max}$ ) відстані ( $H_{пл}$ ) від «технологічного нуля», характеризують точку початку утворення рідких фаз у шарі залізородних матеріалів, тобто положення пластичної зони по висоті та радіусу доменної печі. Положення пластичної зони у кожній з контролюємих зон по радіусу печі визначається за допомогою виразу:

$$H_{пл} = Y^{вих} - V_{серmax} \cdot t_{max} , \quad (1.1)$$

де  $H_{пл}$  – відстань від «технологічного нуля» до межі пластичної зони, м;  $Y^{вих}$  – початковий рівень засипу шихтових матеріалів (перед вивантаженням чергової порції шихти), м;  $V_{серmax}$  – середнє значення швидкості опускання шихти за періоди між максимальними середньоквадратичними відхиленнями швидкості, що перевищують середнє його значення, м/хв;  $t_{max}$  – тимчасовий інтервал між циклами, що характеризуються максимальними середньоквадратичними відхиленнями швидкості по відношенню до середнього його значення, хв.

Як показали дослідження, визначене за допомогою запропонованого методу положення пластичної зони ДП №9 задовільно узгоджується з загальними показниками ходу плавки. Запропонований метод дозволяє оцінити положення пластичної зони в печі в реальному часі, що може бути застосоване для управління ходом доменної плавки, а також оцінити вплив програми завантаження та технологічних параметрів на формування зони плавлення [42]. Реалізація цього методу можлива тільки на доменних печах, які оснащені системами контролю рівня поверхні засипу у різних зонах печі.

Резюмуючи аналіз відомих методів визначення параметрів пластичної зони в доменній печі, можна зробити висновок, що найбільшу перспективу подальшого використання для вирішення поставлених завдань мають два напрямки досліджень – розробка математичних моделей та нових методів оперативного визначення параметрів пластичної зони з використанням різних засобів контролю розподілу шихти та газового потоку. При цьому, слід відмітити, що у всіх відомих моделях і способах лінії розм'якшення та плавлення визначаються, як ізотерми, оскільки розподіл компонентів по

радіусу печі приймається рівномірним і, відповідно, склад їх суміші по радіусу колошника приймається постійним. Разом з тим, сучасна технологія доменної плавки характеризується багатокомпонентністю шихти, що значно знижує наукову та практичну цінність відомих розробок. У зв'язку з наведеним, однією з актуальних задач даної дисертаційної роботи стало врахування нерівномірності розподілу компонентів шихти у робочому просторі доменної печі, оскільки це істотно впливає на розподіл температур плавлення та розм'якшення сумішей шихтових матеріалів, що утворюються у різних зонах колошника при завантаженні печі.

## **1.2 Аналіз відомих способів управління доменною плавкою на основі інформації про форму та положення пластичної зони в доменній печі**

Сучасний рівень пізнання процесів доменної плавки, який знайшов свій відбиток у роботах зарубіжних і вітчизняних вчених, свідчить про те, що одним з основних завдань удосконалення технології доменної плавки є розробка способів впливу на форму пластичної зони у печі.

В результаті досліджень, виконаних вітчизняними та зарубіжними вченими, встановлено, що цільові параметри доменної плавки – продуктивність, витрата палива, склад чавуну та шлаку в значній мірі визначаються формою та структурою пластичної зони, оскільки від її профілю залежать втрати напору, розподіл газового потоку за поперечним перерізом печі та ступінь його використання [43-51]. Основними факторами, під впливом яких у доменній печі формується пластична зона, є режим завантаження шихтових матеріалів та параметри дуття (управління «зверху» та «знизу»).

Результати раніше виконаних робіт дозволяють зробити висновок про єдність думок дослідників щодо підходу до управління параметрами пластичної зони: основний вплив на формування пластичної зони надає режим завантаження шихтових матеріалів, який визначає величину площі поверхні плавлення залізовмісних матеріалів (нижню поверхню пластичної зони) і

товщину «кокових» вікон», що забезпечують газопроникність стовпа шихти у печі [43, 49]. Наприклад, результати виконаних В.М. Ковшовим експериментальних досліджень підтвердили думку про те, що використання різних режимів завантаження можна домогтися раціональної конфігурації пластичної зони, що в свою чергу тягне за собою зміну газорозподілу.

А.А. Гришкова з колегами також дотримується думки про те, що керувати положенням, формою та розмірами пластичної зони можливо шляхом зміни режиму завантаження та розподілу матеріалів на колошнику [50].

Дослідження, виконані М.П. Сисоєвим, показали, що вирішальний вплив на пластичну зону має радіальний розподіл шихти, зміною якого можна досягти будь-якої форми пластичної зони від  $\Lambda$ -подібної до  $W$ -подібної, регулювати її товщину, газопроникність і розташування по висоті печі. Це зумовлено тим, що розподіл матеріалів дозволяє змінювати кількість газу, що проходить у тій чи іншій зонах, у досить широких межах, змінюючи тим самим у бажаному напрямку співвідношення потоків шихти та газу, що визначають інтенсивність теплообміну та температурне поле по радіусу та висоті печі [51].

На думку Г.М. Нікітіна [12, 52], головними факторами, що визначають місце розташування та форму пластичної зони, є розподіл температурного поля в печі та термопластичні властивості агломерату (дослідження виконані для моношихти, представленої агломератом). При цьому, температурне поле впливає на форму пластичної зони, а показники розм'якшення – плавлення агломерату характеризують положення горизонту плавлення, тобто, її розташування в об'ємі доменній печі, що, як встановлено, є головним фактором економічної роботи плавильного агрегату.

Мінімальна товщина пластичної зони, нахил її поверхні до осі та периферії, розташування кореня зони у розпарі веде до зниження напруженості газового потоку в нижній частині печі. За уявленнями Г.М. Нікітіна, товщина пластичної зони визначається різницею температур переходу рудних матеріалів у рідкий стан ( $T_{пл}$ ) і температурою при 40%-й

усадці їх шару. Експериментально отримані рівняння регресії, що описують вплив основності, вмісту монооксиду заліза та оксиду магнію на інтервал в'язкопластичного стану та температуру кінця розм'якшення агломерату. Аналіз результатів досліджень та рівняння регресії дозволяють визначити склад агломерату, що забезпечує оптимальний розподіл в'язкопластичної зони доменної печі. На думку Г.М. Нікітіна управління розташуванням пластичної зони найбільш доцільно здійснювати параметрами дуттьового режиму та режиму завантаження. Оцінка оптимальності параметрів дуття забезпечується комплексним показником – теоретичною температурою горіння та кількістю горнових газів. Результати виконаних ним вимірювань газового потоку доменної печі показали підвищення вершини пластичної зони при збільшенні витрати газу на одиницю площі перерізу печі. У разі збільшення кінетичної енергії дуття при постійному газовому потоці вершина зони також підвищується, а рівень її основи знижується. Ослаблення газового потоку по осі та його посилення на периферії призводить до підвищення рівня основи та зниження вершини пластичної зони. Це може бути виключено шляхом зміни режиму завантаження, тобто, використанням програм, що дозволяють підвантажити периферію та розкрити центр печі. З даних промислових досліджень, виконаних Г.М. Нікітіним, технологічні фактори впливають на місце розташування пластичної зони таким чином:

- збільшення теоретичної температури горіння підвищує рівень зони відносно осі фурм;
- збільшення витрати дуття підвищує вихід горнових газів  $i$ , отже, водяний еквівалент газу, що підвищує рівень зони;
- зростання ступеня прямого відновлення збільшує водяний еквівалент матеріалу та сприяє зниженню рівня зони;
- зі збільшенням у чавуні вмісту  $Mn$ ,  $Si$ ,  $P$  зростає водяний еквівалент шихти та знижується рівень зони.

На думку автора, оптимізація просторового розташування пластичної зони полягає у координації роботи систем завантаження та параметрів

комбінованого дуття, тобто, організації зони з найбільшою кількістю коксових вікон. Для підтримки рівня зони на певному місці необхідно зі збільшенням теоретичної температури скорочувати кількість горнових газів на 1 т чавуну. Це дозволить не тільки зберегти оптимальний рівень пластичної зони, а й інтенсифікувати плавлення (за допомогою підвищення різниці температур) і поліпшити рівень використання монооксиду вуглецю.

Результати досліджень, виконаних Г.М. Нікітіним, реалізовані у створеній автоматизованій системі контролю пластичної зони у доменній печі. Ця система дозволяє технологічному персоналу формувати необхідний профіль пластичної зони відповідно до поставлених завдань, у режимі реального часу визначати причини зміни газового потоку в печі, на який в основному впливають профіль доменної печі та розташування пластичної зони, а також своєчасно вживати відповідних заходів для збереження оптимального розподілу шихти та газового потоку.

Вивченню закономірностей формування структури стовпа шихтових матеріалів у доменній печі та особливостей поведінки пластичної зони з метою визначення раціональних факторів та способів впливу на її характеристики присвячений великий об'єм експериментальних досліджень [44, 45, 50].

Масштабні дослідження з вивчення структури стовпа шихти у доменній печі та, зокрема, пластичної зони виконані німецькими вченими Г.В. Гуденау, К. Крайбіхом та К.Х. Петерсом [45]. Вперше при вирішенні завдань оптимізації ними було визначено динаміку зміни профілю пластичної зони та встановлено зв'язок між цими змінами та показниками роботи доменної печі. Дослідниками за допомогою моделі розроблено спосіб визначення форми, положення та висоти пластичної зони на основі даних про хід процесу, який згодом випробуваний на доменній печі заводу у Швельгерні. При проведенні експериментів на моделі отримували також кількісне розподілення газу по коксових вікнах, рівномірний розподіл якого є фактором, що сприяє підвищенню ступеня використання газового потоку та зниженню витрати палива.

Встановлено, що зсув температур розм'якшення та плавлення у бік більш високих значень сприяє покращенню рівномірності розподілу газового потоку, тобто, збільшенню кількості газу, що проходить через нижні коксові вікна. Як показали виконані дослідження, внаслідок збільшення кількості газу, що проходить через нижні коксові вікна, загальна тривалість перебування газу в області кускових матеріалів зростає, рівень використання газового потоку  $\eta_{CO}$  збільшується з 49% до 52%, а витрата коксу зменшується, приблизно, на 4%. При збільшенні кількості газу, що проходить через нижні коксові вікна, агресивна дія гарячих газів на футерівку посилюється, особливо в області розпару, про що свідчить більша кількість тепла, що відводиться з охолоджувальною водою з цієї області. Спосіб, заснований на визначенні кількості тепла, яке відводиться з охолоджуючою водою, дозволяє, на думку авторів [53], більш точно визначати місце контакту коренів пластичної зони зі стінками печі. За результатами виконаних досліджень авторами зроблено висновки про те, що оптимальний профіль пластичної зони утворюється тоді, коли розм'якшення та плавлення протікають, по можливості, у вузькому діапазоні високих температур. При оптимізації профілю пластичної зони слід враховувати загальний опір газовому потоку, термічні навантаження на футерівку в області розпару, продуктивність та хід печі. Також має значення товщина верхніх шарів пластичної зони, оскільки вона є показником газопроникності. Результати інших досліджень, проведених у Швельгерні, показали, що найважливішою передумовою стабільного ходу та низької витрати коксу є оптимальне положення зони плавлення, що визначається координатою нижчої точки зони над рівнем повітряних фурм [52].

У статті Е Шюрмана та Г.В. Гуденау наведено результати досліджень зміни характеристик пластичної зони у процесі роботи печі, зокрема досліджень впливу висоти пластичної зони на хід доменної плавки [54]. В іншій статті цих же авторів наведено результати досліджень впливу профілю пластичної зони на газопроникність шихти та хід печі та показано, що пластична зона має великий вплив на розподіл газу [55].

Виконані німецькими вченими на дослідній установці дослідження показали, що на кількість газу, що виходить через коксове вікно, впливає не тільки товщина кожного окремого шару пластичної зони, але й положення цієї зони, яке, у значній мірі, визначається її висотою [56].

В. Крафтом у ході проведення промислових досліджень підтверджено особливу роль розподілу шихтових матеріалів на колошнику в регулюванні газопроникності та формуванні пластичної зони [43]. Оскільки, форма пластичної зони тісно пов'язана з розподілом співвідношення «металошихта-кокс» за перерізом печі, то вірогідний профіль цієї зони визначали за розподілом температур на колошнику, а також за результатами вимірів температури на периферії печі. У ході досліджень було встановлено, що чітко виражена осьова газопроникність при завантаженні коксу в осьову зону спостерігається у разі, коли пластична зона має форму літери  $\Lambda$ . При значному збільшенні кількості коксу в периферійній зоні печі пластична зона набуває  $W$  – подібної форми. Таким чином, було підтверджено висновок, що шляхом зміни способу завантаження можна досягти практично будь-якої форми пластичної зони. Для вибору способу впливу у кожному даному випадку необхідно отримання об'єктивних даних, так як аналогічні заходи щодо зміни способу завантаження на різних печах можуть по-різному впливати на їх технологічні параметри та показники роботи. В. Крафтом також наводяться висновки про те, що опосередкованим критерієм товщини пластичної зони є ступінь непрямого відновлення, що, у свою чергу, служить критерієм витрати палива. На профіль пластичної зони впливає також розподіл матеріалів по крупності, що визначає порізність стовпа шихти. У роботі [43] показано, що поверхня розплавлення повинна бути якомога більшою, так як при цьому зменшується товщина пластичної зони і її опір газовому потоку. Для пояснення причин, що викликають переміщення пластичної зони вгору або вниз, запроваджено поняття відношення теплоємностей потоків, яке залежить переважно від ступеня непрямого відновлення, витрати коксу та питомої кількості горнових газів. При збільшенні відношення теплоємностей потоків

ентальпія газової фази зростає. При постійному значенні ступеня непрямого відновлення це призводить до зміщення пластичної зони догори. Одним із наслідків цього є сильніший перегрів чавуну. При зменшенні відношення теплоємностей потоків пластична зона опускається. У виробничих умовах цього можна досягти шляхом деякого зниження температур плавлення, що відбуватиметься одночасно зі зменшенням товщини пластичної зони. Такий режим дозволяє досягти низького вмісту кремнію в чавуні.

Г. Есфельд із групою дослідників у своїй роботі [46] показали, що форма пластичної зони залежить від розмірів печі, виду шихтових матеріалів, режимів роботи та стану печі. Бажаним профіль що нагадує формою вузький конус з вершиною на осі печі та пологими ділянками від основи конуса до стін печі. Якщо шляхом вибору шихтових матеріалів та їх розподілу опір газовому потоку в пластичній зоні вдається підтримувати на низькому рівні, то конус формується помірної висоти і піч, як правило, має задовільні показники роботи. Форма та будова пластичної зони, яка залежить від розподілу матеріалів по перерізу печі, у значній мірі визначають також розподіл газів у печі.

Дослідження, виконані В. Хартінгом та колегами, дозволили авторам роботи [48] отримати нові результати про особливості пластичної зони у доменній печі, а також підтвердити відомі раніше положення. Так, авторами показано позитивний вплив зменшення об'єму пластичної зони з одночасним збільшенням об'єму «сухої» зони на загальну газопроникність робочого простору доменної печі. Глибоке розташування пластичної зони сприятливо позначається і на ступені непрямого відновлення, а тим самим на витраті відновників. Поряд із розташуванням та товщиною пластичної зони її форма також відіграє важливу роль, будучи відображенням розподілу шихти на колошнику. Стверджується, що  $\Lambda$ -подібна форма, тобто, із заглибленою основою та високо розташованою вершиною, є кращою. У цьому варіанті утворюється багато коксових вікон, тобто, значна вільна площа для проходу

газового потоку. Добре виражений, але обмежений по площі центральний хід печі забезпечує стабілізацію всього газового потоку.

Крім профілю, іншим показником, що характеризує формування пластичної зони у доменній печі, є її розташування щодо осі печі. Внаслідок дослідження асиметричного перебігу процесів у доменній печі німецькими дослідниками під керівництвом К.Х. Петерса встановлено, що фактори, які зумовлюють асиметричний перебіг процесів у доменній печі, виникають саме у пластичній зоні [57]. Метою досліджень було визначення впливу відхилення руху газового потоку від осі симетрії на процеси, що протікають у верхній та нижній частинах печі. У ході виконання досліджень руху газового потоку в нижній частині печі спостерігалось погіршення газопроникності пластичної зони, що, на думку дослідників, було зумовлено зміною її положення. При нерівному ході печі висота пластичної зони може значно змінюватись (на кілька метрів) протягом короткого часу. Авторами розглянуто різноманітні технологічні рішення, спрямовані на усунення порушень газопроникності. Якщо ці порушення викликані підвищенням опору руху газового потоку в пластичній зоні, необхідно вжити заходів щодо зміни положення пластичної зони з тим, щоб знову досягти рівного ходу печі. Запропоновано ряд способів регулювання, спрямованих на зміну положення пластичної зони. Найбільш ефективним з них є зміна параметрів дуття-витрати, температури та вологості, а також температури горнових газів та глибини проникнення дуття. Названі параметри, крім останнього, визначають кількість тепла, що вноситься. Глибина проникнення дуття визначається перетином фурм, витратою, температурою і тиском дуття, а також рівнем підвищеного тиску на колошнику. Збільшення кількості тепла за одиницю часу, що досягається підвищенням витрати і температури дуття, або зниженням його вологості, викликає зсув профілю пластичної зони догори, тоді як при високій температурі горнових газів цей профіль опускається вниз. Вологість дуття має і додаткове значення, оскільки вона впливає не тільки на зміну температури горнових газів, а й на ступінь прямого відновлення. Чим більше кисню

відновлюється воднем, тим менше залишається легкоплавких оксидів, таких, як вюстит і ферит кальцію, що потрапляють до пластичної зони. Внаслідок цього шари пластичної зони стають коротшими і газопроникність цієї зони покращується. Шляхом зміни глибини проникнення дуття в результаті регулювання тиску на колошнику газовий потік в нижній частині печі можна змістити ближче до осьової або периферійної зони та змінити профіль пластичної зони.

Узагальнюючи вищесказане, автори стверджують, що шляхом регулювання кількості та температури горнових газів, а тим самим, і кількості тепла, що вноситься, а також шляхом встановлення відповідного тиску під колошником можна забезпечити стабільний режим роботи пластичної зони. При визначенні цих параметрів слід керуватися результатами аналізу всіх показників, що вимірюються, та їх взаємозалежності. Обов'язковою умовою при цьому є регулювання розподілу матеріалів на колошнику.

Виконано також дослідження, що дозволили виявити порушення ходу печі, викликані асиметричним розподілом матеріалів, що надають сильніший вплив. Нерівномірний розподіл матеріалів призводить до асиметричного положення пластичної зони. Авторами показана складність та неоднозначність усунення асиметричності профілю поверхні засипу шляхом коригування завантаження шихти.

Японськими вченими виконані зональні дослідження, у яких встановлено залежності між утворенням пластичної зони, розподілом шихти і газу, а також властивостями шихти [58]. Зональні дослідження показали, що форма пластичної зони істотно впливає на продуктивність, економічні показники роботи та тривалість кампанії доменних печей. Форма пластичної зони великою мірою залежить від способу завантаження. Оскільки газопроникність змінюється в основному внаслідок зміни рудних навантажень по радіусу печі та гранулометричного складу шихтових матеріалів, ці фактори впливають і на форму пластичної зони. Авторами встановлено, що в міру звуження в середній частині  $\Lambda$ -подібної зони зростає ступінь використання

газового потоку і знижуються втрати тепла в шахті. Цей ефект отримано внаслідок зміни порядку завантаження. Для зменшення опору газовому потоку в нижній частині доменної печі необхідно прагнути до того, щоб пластична зона була розташована якомога нижче. Висновок – властивості шихти та її розподіл на колошнику безпосередньо впливають на форму пластичної зони.

Згідно з іншими дослідженнями, виконаними в Японії, пластична зона у значній мірі визначається температурою початку та кінця розм'якшення залізорудних матеріалів, або температурним інтервалом розм'якшення [59]. Тому зазначені показники є одними з найважливіших характеристик залізорудної сировини, що визначають газопроникність шихти у пластичній зоні. Показано, що введення коксу в кількості 10% у суміші із залізорудною частиною шихти сприяло зниженню перепаду тиску у пластичній зоні.

Введення «коксового горішка» у шар окатишів істотно - на 19% - зменшує температурний інтервал розм'якшення з 105°C до 85°C. Дана зміна температурного інтервалу розм'якшення при роботі печі з високою часткою окатишів у шихті може сприяти зменшенню товщини пластичної зони на вказану величину. Введення «коксового горішка» в шар агломерату значно – на 38,5% - збільшує температурний інтервал розм'якшення з 65°C до 90°C. Збільшення температурного інтервалу розм'якшення шляхом введення «коксового горішка» у шар залізорудних матеріалів при роботі доменних печей з високою часткою агломерату в шихті сприятиме збільшенню товщини пластичної зони на вказану величину.

Робота доменних печей одночасно на окатишах і агломераті при введенні «коксового горішка» у шари цих матеріалів викликає несуттєве зниження температурного інтервалу розм'якшення і, отже, зменшення товщини пластичної зони.

Значний об'єм досліджень з вивчення можливостей управління формуванням пластичної зони та регулювання її параметрів виконаний під керівництвом В.М. Паршакова [60]. Вплив пластичної зони на рух газового потоку в доменній печі вивчався автором у 80-х роках минулого сторіччя із

використанням фізичної моделі. Результати досліджень показали, що зміна параметрів дуття («управління знизу») може впливати на розподіл газів тільки у об'ємі печі, розташованому під пластичною зоною. Управляти розподілом газового потоку за перерізом печі вище пластичної зони можна лише зміною розподілу шихтових матеріалів («регулювання зверху»). В.М. Паршаков провів численні дослідження оцінки впливу параметрів пластичної зони на показники доменної плавки, результати яких у подальшому були використані автором для вибору оптимальних значень параметрів пластичної зони з метою забезпечення найкращих показників плавки. Також В.М. Паршаковим виконано дослідження впливу форми зони плавлення, її положення за висотою печі, товщиною пластичної зони на показники доменної плавки. Показано, що зміна форми пластичної зони за рахунок підйому її вершини на осі печі призводить до зниження продуктивності печі. Негативний вплив на показники доменної плавки надає збільшення товщини пластичної зони, що призводить до зменшення продуктивності печі та збільшення витрати коксу.

Автором стверджується, що найбільший вплив на форму, місце розташування та товщину пластичної зони надає нагрівання печі – шахти та горна [61]. Так, зростання нагріву шахти печі збільшує розкриття периферії і, особливо, центру печі, що веде до підйому пластичної зони вгору по висоті печі та до збільшенню її товщини. Таку ж дію надає зростання нагріву горна печі – збільшується розкриття периферії та центру, пластична зона піднімається вгору по висоті печі та збільшується її товщина. Узагальнення отриманих даних показує вирішальний вплив нагріву печі на форму, місце розташування та товщину пластичної зони: підвищення нагріву печі збільшує нерівномірність розподілу пластичної зони по вертикальному перерізу печі, піднімає пластичну зону вгору, по висоті печі (відстань від пластичної зони до лінії фурмених вогнищ збільшується) і збільшує товщину пластичної зони, що сприяє зменшенню продуктивності печі.

Виходячи з аналізу опублікованих робіт, що стосуються впливу пластичної зони на роботу доменної печі, В.М. Паршаков зробив висновок, що

для підвищення ефективності роботи доменної печі параметри пластичної зони повинні відповідати наступним вимогам:

- Λ-подібна форма, звужена у середній частині;
- товщина – мінімальна.

Місце розташування по висоті визначається тепловим станом печі.

На думку В.М. Паршакова, важливе місце у веденні доменної плавки займає черговість операцій, спрямованих на досягнення найкращих показників. Раціональна, за його поглядом, послідовність таких операцій наведена нижче.

*Оптимізація газодинамічного режиму плавки.* Оскільки витрата дуття має вирішальний вплив на кінцеві показники плавки і зумовлює розподіл газового потоку по перерізу печі, то, в першу чергу, треба знайти і підтримувати оптимальну для даних сировинних та експлуатаційних умов плавки кількість дуття, що подається в доменну піч та визначається газодинамічною стійкістю стовпа шихтових матеріалів [61].

*Оптимізація радіальної нерівномірності радіального розподілу газу.* Наступним за важливістю фактором для досягнення найкращих техніко-економічних показників плавки є контроль та оптимізація газорозподілу за горизонтальним перерізом печі.

Як свідчить зарубіжний досвід [62, 63], лише за допомогою оптимізації радіального газорозподілу витрату коксу можна знизити на 10-30 кг/т чавуну. Слід відзначити, що питання про те, що потрібно оптимізувати: форму температурної кривої на колошнику печі, або форму пластичної зони остаточно не вирішено. У деяких роботах [64] пластична зона розглядається, як розподільник газового потоку в печі. Тому з'явився цілий ряд робіт, у яких отримані результати плавки пов'язують не стільки з розподілом параметрів газу на колошнику доменної печі, скільки з формою пластичної зони.

В.М. Паршаковим показано, що для кожної доменної печі необхідно шукати фактори, які мають вирішальний вплив на кінцеві показники плавки - радіальний газорозподіл на колошнику печі, або форма пластичної зони в

розпарі - заплечиках печі. Кількісна оцінка радіального газорозподілу на колошнику та параметрів, що характеризують форму пластичної зони у заплечиках печі, дозволяє одночасно порівняти вплив цих факторів на кінцеві показники плавки та вибирати параметр та місце для подальшого контролю.

*Оптимізація теплового стану печі.* На думку В.М. Паршакова головне в управлінні доменною піччю – це регулювання її теплового стану, тому що в цьому випадку відбувається управління формою, місцезнаходженням та товщиною пластичної зони. Разом з тим, управління тепловим станом печі найбільш складне завдання в управлінні доменною плавкою. Відомо, що для вирішення будь-якого завдання оптимізації потрібні відповідні критерії. З огляду на особливості теплообмінних і відновлювальних процесів за висотою печі (від рівня засипу до чавунної льотки), Паршаковим В.М. їх прийнято два - температура матеріалів на виході з шахти печі і температура продуктів плавки на виході з горна. Наявність двох критеріїв теплообміну визначається тим, що доменна піч від рівня засипу до чавунної льотки розділена на чотири зони тепло- та масообміну, в яких процеси йдуть з різними кінцевими тепловими ефектами. Проведеними дослідженнями було встановлено, що оба критерія теплового стану печі мають суттєвий вплив на форму, місцезнаходження та товщину пластичної зони. Встановлено, що зростання значень обох критеріїв теплового стану призводить до підйому пластичної зони вгору та збільшенню її товщини.

Запропоновано наступну послідовність визначення оптимального теплового стану печі:

- безперервний контроль поточних значень обох критеріїв теплового стану та визначення оптимальних їх значень (оптимальне значення вибирається з умов стабільної роботи печі);
- співставлення поточних та оптимальних значень;
- вибір керуючих впливів (зміни витрат коксу, природного газу, ПВП та кисню) за величиною та знаком різниці між поточними та оптимальними значеннями кожного з двох критеріїв для досягнення оптимального теплового

стану печі.

Розроблена Паршаковим В.М. система «Когезія», окрім постійного автоматичного контролю параметрів зони плавлення (форми, розташування та товщини), дозволяє в реальному масштабі часу кількісно оцінювати вплив її параметрів на кінцеві показники доменної плавки, що є підставою для обґрунтування вибору керуючих впливів, спрямованих на підвищення ефективності роботи доменної печі.

На думку В.М. Паршакова заходи щодо підвищення ефективності плавки з використанням інформації про параметри пластичної зони повинні проводитися за такими напрямками [60].

1. При підготовці шихтових матеріалів до плавки необхідно збільшувати відновлюваність залізорудної частини шихти та покращувати якість коксової.

2. При формуванні подачі максимально збільшувати її масу та застосовувати змішування рудної частини шихти з коксовою (у тому числі, з «коковим горішком»).

3. При завантаженні шихти в піч забезпечувати:

- розподіл рудного навантаження по радіусу печі, який сприяє досягненню  $\Lambda$ -подібної форми пластичної зони, звуженої до середньої її частини;

- рівномірний розподіл залізорудних матеріалів по колу печі. У випадках, коли не вдається ліквідувати окружну нерівномірність розподілу матеріалів, слід регулювати висоту пластичної зони шляхом зміни параметрів дуття.

4. Під час роботи печі доцільно використовувати:

- регулювання витрати природного газу по фурмах для досягнення рівності температур фурмених вогнищ по колу горна, оскільки встановлено, що найважливішою причиною порушень у роботі печі є нерівномірність роботи по колу, яка призводить до перекосу пластичної зони з відповідними негативними наслідками у роботі печі;

- зміну рудного навантаження та параметрів дуття для досягнення раціонального розташування пластичної зони по висоті печі за рахунок досягнення оптимального теплового стану печі, оскільки положення пластичної зони періодично змінюється і при незмінних фізико – хімічних властивостях шихтових матеріалів залежить від теплового стану печі;

- збільшення витрати кисню, збільшення відношення водяних еквівалентів шихти та газу для зменшення товщини пластичної зони.

Представлені у роботах В.М. Паршакова результати досліджень, що дозволили виконати кількісну оцінку параметрів зони плавлення та визначити для них оптимальні значення для умов роботи конкретної доменної печі, а також розроблені способи їх досягнення вперше дозволили впритул підійти до вирішення проблеми вдосконалення технології доменної плавки впливом на параметри та положення пластичної зони. На думку автора, з метою управління ходом доменного процесу необхідно не тільки встановити оптимальний профіль пластичної зони, а й визначити динаміку його зміни та залежності показників роботи печі від цих змін.

З вищенаведеного можна зробити висновок, що, хоча на даний момент результати досліджень кількісної оцінки зв'язку параметрів пластичної зони з показниками плавки практично відсутні, роботи В.М. Паршакова слід вважати найбільш близькими до вирішення задачі удосконалення технології доменної плавки шляхом коригування параметрів пластичної зони.

Виконаний аналіз дозволив сформулювати основні положення, що відображають особливості формування пластичної зони та можливості регулювання її параметрів:

- з точки зору мінімізації товщини пластичної зони найбільш раціональним є використання моношихти, оскільки при завантаженні у доменну піч декількох різних матеріалів, що мають різну відновлюваність, розплавлення протікає в широкому діапазоні температур зі збільшенням товщини пластичної зони (товщина цієї зони тим більша, чим нижча температура плавлення);

- поверхня розплавлення повинна бути якомога більшою, так як при цьому зменшується товщина пластичної зони і її опір газовому потоку;
- зі зменшенням товщини шарів коксу газопроникність зони розм'якшення знижується;
- у більшості випадків віддають перевагу формі пластичної зони у вигляді літери  $\Lambda$ , яка спостерігається, коли має місце чітко виражена осьова газопроникність внаслідок завантаження коксу в осьову зону. Для цієї форми характерним є велика кількість коксових вікон, тобто, значна вільна площа для проходження газового потоку. Хороші показники печі можуть бути отримані при невеликій висоті пластичної зони.
- при високій частці коксу в периферійній зоні печі пластична зона набуває W-подібної форми;
- профіль пластичної зони, на який впливають розподіл шихтових матеріалів та розподіл матеріалів за крупністю, тісно пов'язаний з її товщиною та положенням;
- покращення газопроникності, підвищення рівномірності розподілу газу та ступеня його використання, а також зниження витрати коксу досягаються при звуженні  $\Lambda$ -подібної ділянки пластичної зони або зменшенні її висоти;
- зміною радіального розподілу шихти можна досягти будь-якої форми пластичної зони від  $\Lambda$ - до W-подібної, регулювати її товщину, газопроникність та розташування по висоті печі;
- ефективним способом регулювання, спрямованим на зміну положення пластичної зони, є зміна параметрів дуття - витрати, температури та вологості, а також температури горнових газів та глибини впровадження дуття.

У зв'язку з поширенням використання пилувугільного палива суттєвий інтерес представляють виконані групою німецьких вчених під керівництвом Г.В. Гуденау дослідження газодинаміки доменної плавки при вдуванні вугільного пилу, виконані на фізичній моделі доменної печі у масштабі 1:20

[44]. При проведенні досліджень використано чотири варіанти форм пластичної зони, що утворюються у печі. За оптимальну прийнята форма подібна до літери Λ. Такий профіль свідчить про високу втрату напору в області окислювальної зони і супроводжується дуже рівномірним падінням тиску до колошника. Разом з тим, найчастіше зустрічається W-подібна форма пластичної зони, при якій спостерігається невелика периферійність ходу в нижній частині печі, що проявляється в деякому підвищенні температури у пристінковій зоні. Зміщення газового потоку з центру та обмеження температури у центрі печі характерні для M- подібного профілю. При сильно розвиненому периферійному ході з W- та M-подібних профілів може утворитися пластична зона з V-подібним профілем. За результатами аналізу виконаних досліджень автором сформульовано вимоги для умов доменного процесу з вдуванням великої кількості вугільного пилу:

- слід прагнути отримання профілю подібного до літери Λ, так як, він забезпечує хорошу газопроникність печі;
- вершину пластичної зони слід зміщувати максимально догори, щоб досягти достатньої кількості коксових вікон і зменшити опір проходу газу в пластичній зоні;
- слід збільшувати величину подачі задля збільшення товщини коксового шару, що дозволить підтримувати потрібну газопроникність стовпа шихти;
- необхідно прагнути повного згоряння пилу у окислювальній зоні, щоб уникнути порушення газопроникності через попадання його у стовп шихти.

Оснащення доменних печей сучасними засобами автоматизованого контролю процесів відкриває перспективи їх використання для визначення параметрів пластичної зони та розробки нових способів управління плавкою з урахуванням цієї інформації. Зважаючи на результати вищенаведеного аналізу, актуальним є розробка нових методів оперативного визначення параметрів пластичної зони та встановлення їх зв'язків з характеристиками

розподілу шихтових матеріалів на колошнику печі, а також нового науково обґрунтованого способу корегування параметрів режиму завантаження багатокomпонентної шихти.

### **Висновки до розділу 1**

1. Аналіз відомих результатів досліджень особливостей формування і ролі пластичної зони у процесі плавки та розробок з визначення її форми і положення в доменній печі показав актуальність та перспективність досліджень, пов'язаних із розробкою математичних моделей та методів, що дозволяють визначати параметри пластичної зони. Встановлено, що форма пластичної зони істотно впливає на продуктивність, економічні показники роботи та тривалість кампанії доменних печей і великою мірою залежить від режимів їх завантаження.

2. Виконаний аналіз показав однотайну думку різних дослідників у питаннях про способи впливу на основні параметри пластичної зони доменної печі. Режим завантаження шихтових матеріалів визначає величину площі поверхні плавлення залізовмісних матеріалів (нижню поверхню пластичної зони) та товщину «коксових вікон», які забезпечують газопроникність стовпа шихти у печі.

3. Показано, що найбільшу перспективу подальшого використання для вирішення задач підвищення ефективності плавки шляхом управління формуванням пластичною зоною має розробка нових методів оперативного визначення її параметрів із застосуванням різних засобів контролю розподілу шихти та газового потоку на доменних печах.

4. Показано, що до теперішнього часу відсутні результати досліджень кількісної оцінки зв'язків параметрів пластичної зони з показниками плавки, тому особливу актуальність набувають розробки способів корегування режимів завантаження шихти на основі інформації про параметри пластичної зони, отриманій за допомогою математичних моделей та розрахункових методів.

## РОЗДІЛ 2

# РОЗРОБКА НОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ І ФОРМИ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ, ЗАСНОВАНОГО НА ПОКАЗНИКАХ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВОГО ПОТОКУ ПО РАДІУСУ КОЛОШНИКА

### 2.1 Основні положення та структурні складові методу

З літературних джерел відомий метод визначення форми пластичної зони за показаннями встановлених над поверхнею засипу шихти на колошнику радіальних багатоточкових зондів, запропонований В.М. Паршаковим [21]. Показання зондів, крім оцінки розподілу температур газу на колошнику печі, використовують для контролю форми пластичної зони за допомогою двовимірної математичної моделі. У опублікованих В.М. Паршаковим роботах опис алгоритмів цього методу не наведено.

Ґрунтуючись на результатах раніше виконаних аналітичних досліджень, а також на накопиченому практичному досвіді запропоновано новий метод визначення параметрів пластичної зони (форми, товщини та положення) у доменній печі, оснащій засобами визначення температури газу над поверхнею засипу (термовимірювальними зондами) [65]. Розроблений метод базується на систематизованій сукупності математичних моделей, у тому числі, розроблених ІЧМ, а також на новому способі визначення ліній розм'якшення та плавлення. Основним прийнятим припущенням нового методу є твердження, що форма лінії плавлення подібна до кривої розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу шихти.

Вхідні дані для виконання розрахунків - технологічні параметри та показники доменної плавки; геометричні параметри доменної печі та завантажувального пристрою; фізико-хімічні властивості шихтових матеріалів та параметри режиму їх завантаження в доменну піч; показання

засобів контролю температур газового потоку, розташованих над поверхнею засипу шихти.

Запропонований метод передбачає застосування нового способу визначення меж пластичної зони та розрахунки характеристик розподілу компонентів шихти в кільцевих зонах печі, складу сформованих сумішей шихтових матеріалів та їх високотемпературних властивостей за допомогою нижченаведених математичних моделей:

*1. Комплексної математичної моделі завантаження компонентів в бункер завантажувального пристрою, вивантаження з нього, руху шихтових матеріалів по тракту завантажувального пристрою та розподілу на поверхні засипу.*

*2. Математичних моделей визначення температур плавлення та розм'якшення залізовмісних компонентів шихти в зонах печі.*

*3. Моделі визначення площі поверхні плавлення, удосконаленої шляхом розрахунку тепла у нижній зоні печі.*

Далі наведено змістовний опис цих математичних моделей з внесеними до них доповненнями з метою удосконалення.

***1. Комплексна математична модель завантаження компонентів в бункер завантажувального пристрою, вивантаження з нього, руху по тракту завантажувального пристрою та розподілу на поверхні засипу,*** за допомогою якої визначається формування структури шарів шихтових матеріалів на колошнику доменної печі з урахуванням розподілу компонентів шихти за перерізом колошника [66, 67].

Комплексна математична модель процесу завантаження багатокомпонентної шихти у доменну піч складається з моделі формування багатокомпонентних порцій шихти в системах завантаження з конвеєрною та зі скіповою доставкою шихти на колошник; моделі завантаження багатокомпонентних порцій шихти в бункер безконусного завантажувального пристрою (БЗП); моделі вивантаження багатокомпонентних порцій шихти з бункера БЗП, що забезпечує розрахункове визначення змісту кожного

компонента у вихідному потоці; моделі руху шихтових матеріалів по тракту БЗП; моделі падіння багатоконпонентної шихти на поверхню засипу та розподілу на ній, яка забезпечує розрахункове визначення повного складу сумішей компонентів шихти, що формуються у різних зонах колошника.

Утворені на колошнику шари шихтових матеріалів формують структуру стовпа доменної печі. У міру опускання в шахті печі шари потрапляють у високотемпературну область, де здійснюються процеси первинного шлакоутворення, а потім - плавлення шихтових матеріалів. Пластична зона представляє собою розташовані між межами цих двох процесів шари залізовмісних матеріалів і коксу (кокових вікон), які визначають величину площі поверхні плавлення залізорудних матеріалів та її положення в об'ємі печі. Товщина кокових вікон визначає газопроникність стовпа шихти в печі.

## ***2. Математичні моделі визначення температур плавлення та розм'якшення залізовмісних компонентів шихти в зонах печі.***

Температури плавлення та розм'якшення залізовмісних компонентів шихти та їх розподіл робочому просторі печі визначаються на основі складу сумішей компонентів шихти у заданих зонах печі. Компонентний склад шихти за перерізом колошника отримують, як результат моделювання процесу завантаження з використанням комплексної математичної моделі формування багатоконпонентних порцій шихтових матеріалів, їх завантаження в бункер БЗП, вивантаження з бункера та розподілу на поверхні засипу.

Для оцінки інтервалу розм'якшення – плавлення, як показали раніше виконані дослідження [68], доцільно використовувати величини температур початку розм'якшення  $T_{пр}$  та температури плавлення (розплавлення)  $T_p$ , які найбільш об'єктивно та повно характеризують зміни у залізорудних матеріалах при переході в рідкий стан в умовах доменної плавки. Ці температури визначаються, за інших рівних умов, хімічним та мінералогічним складом залізорудних матеріалів, які в процесі доменної плавки піддаються структурним перетворенням внаслідок відновлення оксидів заліза.

В ІЧМ у процесі виконаних в останні роки досліджень розроблено моделі для прогнозування температур агрегатних перетворень шихтових матеріалів з урахуванням лугів [69, 70, 71, 72], що дозволяє визначити положення та протяжність пластичної зони у доменній печі та оперативно оцінювати склад та властивості продуктів плавки у взаємозв'язку із сировинними та технологічними параметрами процесу [73, 74]:

- температура плавлення агломерату з урахуванням вмісту  $K_2O$  та  $Na_2O$ :

$$T_{\text{па}_{R_2O}} = T_{\text{па}}^0 \cdot [1 - 0,035371 \cdot (R_2O) + 0,0015503 \cdot (R_2O)^2]; \quad (2.5)$$

- температура плавлення окатишів з урахуванням вмісту  $K_2O$  та  $Na_2O$ :

$$T_{\text{по}_{R_2O}} = T_{\text{по}}^0 \cdot [1 - 0,028384 \cdot (R_2O) + 0,0008533 \cdot (R_2O)^2]; \quad (2.6)$$

- температура плавлення руди з урахуванням вмісту  $K_2O$  та  $Na_2O$ :

$$T_{\text{пр}_{R_2O}} = T_{\text{пр}}^0 \cdot [1 - 0,041505 \cdot (R_2O) + 0,0007131 \cdot (R_2O)^2], \quad (2.7)$$

де

$T_{\text{па}}^0$ ,  $T_{\text{по}}^0$ ,  $T_{\text{пр}}^0$  – відповідно, температури плавлення агломерату, окатишів та руди без урахування вмісту  $Na_2O$  та  $K_2O$ , °С;

$(R_2O)$  – сумарний вміст  $Na_2O$  та  $K_2O$  у матеріалі, %.

Температура початку розм'якшення без урахування вмісту  $Na_2O$  та  $K_2O$ :

$$T_{\text{пр}}^0 = 940,4 + 0,0802Fe_2O_3 - 2,5026FeO + 10,747\Delta e + 329,6238\rho; \quad (2.8)$$

- температура плавлення (розплавлення) без урахування вмісту  $Na_2O$  та  $K_2O$ :

$$T_{\text{п}}^0 = 1653,7 - 0,284Fe_2O_3 - 4,6211FeO - 1,0833\Delta e - 186,6902\rho, \quad (2.9)$$

де

$\Delta e$  – кількість електронів, які локалізуються у напрямку зв'язку катіон – аніон;

$\rho$  - показник стехіометрії.

Формули (2.8, 2.9) призначені для розрахунку властивостей, як окремо для агломерату, окатишів та руди, так і для шихти в цілому з різним співвідношенням цих компонентів і з різними добавками, наприклад, конвертерного шлаку.

Температура плавлення суміші залізовмісних матеріалів ( $T_{\text{пл.сум}}$ ) визначається за формулою:

$$T_{\text{пл.сум}} = \frac{\sum_j T_{\text{пл}}^j \cdot M^j}{\sum_j M^j}, \quad (2.10)$$

де  $T_{\text{пл}}^j$  – температура плавлення  $j$ -го компонента суміші, °С;

$M^j$  – маса  $j$ -го компонента у суміші, т.

### ***3. Математична модель визначення площі поверхні плавлення, удосконалена шляхом розрахунку тепла у нижній зоні печі.***

Площа розплавленої поверхні пластичної зони відповідає продуктивності плавки та визначається відповідно до запропонованої Г.В. Гуденау моделі [75]. Площа поверхні плавлення пластичної зони розраховується згідно з виразом:

$$A_{\text{пл}} = \frac{K \cdot Q_{\text{заг}} \cdot P_p}{24 \left\{ c \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{вип}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{пл.агл}} + 273}{100} \right)^4 \right] + h_c (T_{\text{газ}} - T_{\text{пл.агл}}) \right\}}, \quad (2.11)$$

де

$K$  – геометрична постійна моделі, що залежить від рудного навантаження та його розподілу, що зменшується зі зростанням навантаження і призводить до зниження величини  $A_{\text{пл}}$  (автором прийнято  $K = 2$ );

$Q_{\text{заг}}$  – кількість тепла, що витрачається на утворення рідких продуктів плавки (залежить від якості залізородних матеріалів, зокрема, від їх відновлюваності. Вважається, що у більшості випадків склад передільного

чавуну завжди більш менш постійний, а вихід і якість шлаку змінюються в обмежених інтервалах, тому при визначенні загальної поверхні розплаву  $Q_{\text{заг}}$  приймається рівним  $21,3 \cdot 10^4$  кДж·год/т), кДж·год/т;

$P_p$  – виробництво загальної кількості розплаву (рідких фаз), т/год;

$$P_p = P_{\text{чав}}(1 + 1,77) P_{\text{шл}}/1000, \quad (2.12)$$

де

$P_{\text{чав}}$  – виробництво чавуну, т/добу;

$P_{\text{шл}}$  – вихід шлаку, т/т чавуну;

$C$  – постійна випромінювання, рівна  $2,91$  кДж/год.  $\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$ ;

$T_{\text{вин}}$  – температура випромінюючої речовини (головним чином коксу),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$$T_{\text{вин}} = 0,81 \cdot T_f, \quad (2.13)$$

де

$T_f$  – теоретична температура горіння коксу,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{пл.агл}}$  – температура плавлення агломерату (або суміші рудних компонентів),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{газ}}$  – середня температура газу у фурменій зоні,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{чав}}$  – температура чавуну,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{шл}}$  – температура плавлення оксидів (шлак) рудних матеріалів,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{к.т}}$  – температура плавлення чавуну (краплинна течія розплаву),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{п.р}}$  – температура початку розм'якшення (зовнішня сторона зони плавлення),  $^{\circ}\text{C}$ .

$h_c$  – коефіцієнт теплопередачі конвекцією, кДж/м<sup>2</sup>·год.· $^{\circ}\text{C}$ .

Коефіцієнт теплопередачі може бути визначений відповідно до виразу:

$$h_c = 0,62 \cdot (\lambda_{\text{г}}/D_{\text{н.о}})(D_{\text{н.о}}U_{\text{г}}/\eta_{\text{г}})^{0,7}(C_p \cdot \eta_{\text{г}}/\lambda_{\text{г}} \cdot \rho_{\text{г}}), \quad (2.14)$$

де

$\lambda_{\text{г}}$  – теплопровідність газу, кДж/м·год.· $^{\circ}\text{C}$ ;

$D_{\text{н.о}}$  – поточний діаметр, м;

$U_{\text{г}}$  – масовий газовий потік, кг/м<sup>2</sup>·год;

$\eta_{\text{г}}$  – динамічна в'язкість газу, кг/м. год;

$C_p$  – середня теплоємність газу, кДж/нм<sup>3</sup>·К;

$\rho_r$  – щільність газу, кг/м<sup>3</sup>.

Загальне рівняння для розрахунку теоретичної температури горіння при вдуванні в піч природного газу та пиловугільного палива може бути представлено в наступному вигляді [76]:

$$T_T = 273 + \frac{1700 \cdot Q_{ог} + 10521,9 \cdot O_2 \left[ Q_{од} - Q_{ог} \left( 0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] + 1,4 \cdot Q_{од} \cdot t_d + \dots}{1,5 \cdot \left\{ \left( 3 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) Q_{ог} + \left( 2 + \frac{1 - O_2}{O_2} \right) \cdot \left[ Q_{од} - Q_{ог} \left( 0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] O_2 + 1,5 \cdot Q_{од} \cdot \varphi \right\} + \dots} + \frac{2340 \cdot O_2 \left[ Q_{од} - Q_{ог} \left( 0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) - 0,67 \cdot m_{пуг} \right] - 10806 Q_{од} \cdot \varphi - C_{ш} \cdot A_{пуг} \cdot m_{пуг}}{+(1,42 \cdot Q_{N_2} + 2,252 \cdot V^c) \cdot m_{пуг}}, \quad (2.15)$$

де

1,5 – теплоємність горнового газу, кДж/м<sup>3</sup>·град;

1,42 – середня теплоємність азоту в інтервалі температур 100-1227°C, кДж нм<sup>3</sup>·град;

$Q_{N_2}$  – питома витрата азоту-носію, м<sup>3</sup>/кг ПВП;

2,252 – середня теплоємність сухого коксового газу в інтервалі 800-1227°C, яка визначається складом газу та середніми теплоємностями компонентів, кДж/нм<sup>3</sup>·град;

$V^c$  – вихід летких речовин вугілля, од.

Відома модель Г.В. Гуденау, якою передбачається завдання константою кількості тепла, що витрачається на утворення рідких продуктів плавки, удосконалена розрахунком сумарної кількості тепла, що утворюється в нижній частині доменної печі та витрачається на розплавлення залізовмісних матеріалів.

Далі приведено алгоритм розрахунку тепла, що витрачається на утворення рідких продуктів плавки.

Для визначення загального тепла в нижній зоні доменної печі використана методика А. Н. Рамма, згідно з якою джерелами теплової енергії є тепло, яке надходить в зону горіння з гарячим дуттям, з паливними

елементами, а також тепло, що виділилося в результаті екзотермічних реакцій в зоні відновлення [77].

1. Тепло, принесене нагрітим дуттям (за вирахуванням розкладання водяної пари).

$$q_d = i_d \cdot Q_d, \quad (2.16)$$

де

$Q_d$  – витрата дуття, м<sup>3</sup>/т чавуну,

$i_d$  – тепломісткість (ентальпія) дуття за вирахуванням теплоти внесеної ним водяної пари, кДж/м<sup>3</sup>.

$$i_d = c_0 t_{гд} - \frac{\varphi}{100} \cdot (\omega_{H_2} - c_{H_2O} t_{гд}), \quad (2.17)$$

де

$t_{гд}$  – температура гарячого дуття, °С;

$c_0 t_{гд}$  – ентальпія дуття (розраховується по таблиці як ентальпія двоатомних газів взята при заданій температурі дуття, кДж/м<sup>3</sup> дуття.

Наприклад, для  $t_{гд} = 906^\circ\text{C}$   $c_0 t_{гд}$  буде розрахована, як середньозважена по температурі між  $c_0 t_{900} = 1258$  кДж/м<sup>3</sup> дуття та  $c_0 t_{1000} = 1410$  кДж/м<sup>3</sup> дуття і складе  $t_{гд} = (1410 - 1258) \cdot \frac{906-900}{1000} + 1258 = 1267,12$  кДж/м<sup>3</sup> дуття.

$c_{H_2O} t_{гд}$  – ентальпія водяної пари при заданій температурі гарячого дуття, кДж/м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O;

$\omega_{H_2}$  – ентальпія H<sub>2</sub>, кДж/м<sup>3</sup> H<sub>2</sub> (приймається  $\omega_{H_2} = 10800$  кДж/м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>);

$\varphi$  – волога дуття, %.

2. Тепло, що утворюється при згорянні паливних елементів в фурменому вогнищі доменної печі (кокс, природний газ, ПВП).

2.1. Згоряння вуглецю коксу біля фурм:

$$q_{сф} = \omega_c \cdot C_{ф}, \quad (2.18)$$

де

$\omega_c = 9797$  кДж/кг C – теплота згоряння вуглецю коксу,

$C_{ф}$  – кількість вуглецю коксу, який згоряє біля фурм, кг.

$$C_{\phi} = Q_{\text{д}} - Q_{\text{пг}} \cdot \frac{\bar{v}_g}{v'_g}, \quad (2.19)$$

де

$\bar{v}_g$  – витрата дуття,  $\text{нм}^3/\text{м}^3$  природного газу, що вдувається;

$$\bar{v}_g = \frac{[0,5 \cdot (\bar{C}) - (\bar{O})]}{\omega_{\text{д}} + 0,5 \cdot \varphi} \cdot 100, \quad (2.20)$$

де

$(\bar{C})$  – вміст вуглецю в природному газі, %;

$(\bar{O})$  – вміст кисню в природному газі, %.

$Q_{\text{пг}}$  – витрата природного газу,  $\text{м}^3/\text{т}$  чавуну;

$\bar{v}_g$  – витрати дуття,  $\text{м}^3/\text{кг}$   $C_{\phi}$ ;

$$v'_g = \frac{22 \cdot \frac{4}{22} \cdot 100}{\omega_{\text{д}} + 0,5 \cdot \varphi}, \quad (2.21)$$

де

$\omega_{\text{д}}$  – вміст кисню в дутті, %;

2.2. Газоподібне паливо, що вдувається:

– природний газ:

$$q_{\text{пг}} = \omega_S \cdot Q_{\text{пг}}, \quad (2.22)$$

де

$Q_{\text{пг}}$  – витрата природного газу,  $\text{м}^3/\text{т}$  чавуну;

$\omega_S$  – теплота згоряння газоподібного палива (природного газу), що вдувається,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;

– ПВП:

$$q_{\text{пвп}} = \omega_{S_2} \cdot v_{\text{пвп}}, \quad (2.23)$$

де

$\omega_{S_2}$  – теплота згоряння ПВП  $\text{кДж}/\text{кг}$  (приймається, виходячи з якості ПВП, як  $Q_{\text{dafi}}$  – нижча теплота згоряння ПВП,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ).

$v_{\text{пвп}}$  – витрата пиловугільного палива,  $\text{м}^3/\text{т}$  чавуну;

3. В області відновлення прихід тепла забезпечується:

– реакціями окислення вуглецю коксу в  $CO$  при прямому відновленні:

$$q_{C_d} = \omega_C \cdot C_d, \quad (2.24)$$

де

$\omega_C$  – теплота горіння вуглецю коксу в  $CO$ , кДж/кг С;

$C_d$  – витрата вуглецю на пряме відновлення кг/кг чавуну, кг;

– окисленням  $CO$  в  $CO_2$  при непрямому відновленні:

$$q_{CO} = \omega_{CO} \cdot CO_i, \quad (2.25)$$

де

$\omega_{CO}$  – теплота окислення  $CO$  в  $CO_2$ , кДж/м<sup>3</sup>;

$CO_i$  – витрата  $CO$  на непряме відновлення, м<sup>3</sup>/кг чавуну;

– окисленням  $H_2$  в  $H_2O$ :

$$q_H = \omega_{H_2} \cdot H_{2i}, \quad (2.26)$$

де

$\omega_{H_2}$  – теплота окислення  $H_2$  в  $H_2O$ , кДж/м<sup>3</sup>;

$H_{2i}$  – витрата  $H_2$  на непряме відновлення, м<sup>3</sup>/кг чавуну.

Згідно з даними А.Н. Рамма,  $\omega_{CO} = 12645$  кДж/м<sup>3</sup>  $CO$ ,  $\omega_{H_2} = 10800$  кДж/м<sup>3</sup>  $H_2$ .

Розрахунок ступеню прямого і непрямого відновлення найдоцільніше проводити за методикою з використанням ступеню використання вуглецю ( $\eta_{CO}$ ) і водню ( $\xi$ ). Згідно з цією методикою, розробленою А.Н. Раммом, параметри прямого і непрямого відновлення будуть розраховані в такий спосіб:

$$CO_i = CO_{\Sigma} \cdot \eta_{CO}, \quad (2.27)$$

де

$$CO_{\Sigma} = 1,8667 \cdot C_o + b_5, \quad (2.28)$$

$$C_o = K \cdot C_k - [C], \quad (2.29)$$

$K$  – витрата коксу, кг/т чавуну;

$C_k$  – вміст вуглецю в коксі, од.;

$[C]$  – вміст вуглецю в чавуні, од.;

$$b_5 = \text{ПГ} \cdot (\bar{C}) + \text{ПВП} \cdot (\bar{C})_{\text{ПВП}}, \quad (2.30)$$

де

ПГ – витрата природного газу, м<sup>3</sup>/т чавуну;

$(\bar{C})$  – вміст вуглецю в природному газі, од.;

ПВП – витрата пиловугільного палива, кг/т чавуну;

$(\bar{C})_{\text{ПВП}}$  – вміст нелетучого вуглецю в пиловугільному паливі, од.

$$Q_{\text{заг}} = q_d + q_{C_{\phi}} + q_{\text{ПГ}} + q_{\text{ПВП}} + q_{C_d} + q_{CO} + q_H, \quad (2.31)$$

Альтернативний розрахунок приходу тепла при використанні ПВП виконаний за запропонованою Г.Г. Васюрою методикою [78].

$$Q = q_{C_{\text{кф}}} + q_m - q_{\phi}, \quad (2.32)$$

де

$q_{C_{\text{кф}}}$  – кількість тепла, що утворюється при горінні вуглецю коксу на повітряних фурмах, кДж/кг;

$q_m$  – кількість тепла, що утворюється при неповному горінні вугілля, кДж/кг;

$q_{\phi}$  – витрати тепла на дисоціацію водяної пари дуття, кДж/кг.

Для визначення складових приходу тепла використані наступні формули:

$$q_{C_{\text{кф}}} = 12348 \cdot C_{\text{кф}}, \quad (2.33)$$

де

$C_{\text{кф}}$  – кількість вуглецю коксу, газифікованого на повітряних фурмах, од..

$$C_{\text{кф}} = \frac{O_{2C_{\text{кф}}}}{0,933}, \quad (2.34)$$

$O_{2C_{\text{кф}}}$  – кількість кисню дуття, що витрачається на газифікацію вуглецю коксу, од..

$$O_{2C_{\text{кф}}} = O_{2d} - O_{2m}, \quad (2.35)$$

Вміст кисню в дутті:

$$O_{2д} = (1 - \varphi)\omega + 0,5 \cdot \varphi , \quad (2.36)$$

де

$\varphi$  і  $\omega$  – відповідно, вміст вологи і кисню в дутті, од..

Витрата кисню дуття на газифікацію ПВП:

$$O_{2m} = 0,933 \cdot C_m , \quad (2.37)$$

Кількість вуглецю ПВП:

$$C_m = m \cdot C_H , \quad (2.38)$$

де

$m$  – витрата ПВП, кг/м<sup>3</sup>;

$C_H$  – вміст вуглецю нелетучого, %;

$$C_H = 100 - (A + L + S) , \quad (2.39)$$

Характеристики ПВП:  $A$  – вміст золи, %;  $L$  – вміст летучих, %;  $S$  – вміст сірки, %.

$$q_m = 6955 \cdot m; \quad q_d = C_{t1200};$$

$$u_{фг} = 2 \cdot [(1 - \varphi) \cdot \omega + 0,5 \cdot \varphi] + (1 - \varphi) \cdot (1 - \varphi) + \varphi; \quad C_t = \frac{Q}{u_{фг}},$$

де

$u_{фг}$  – кількість фурменого газу на 1 м<sup>3</sup> дуття, м<sup>3</sup>.

Розрахована сумарна кількість тепла, необхідного для плавлення, є початковою інформацією для визначення площі поверхні плавлення.

## 2.2 Новий спосіб визначення меж пластичної зони

Для визначення меж пластичної зони, перш за все, за допомогою вище приведених математичних моделей розраховуються: площа поверхні плавлення, характеристики розподілу компонентів шихти в кільцевих зонах печі, температури розм'якшення та плавлення сумішей, які знаходяться в цих зонах. Отримані в результаті моделювання значення цих параметрів є початковою інформацією для визначення меж пластичної зони в об'ємі печі.

*Визначення положення лінії плавлення у доменній печі.*

Спосіб передбачає наступну послідовність виконання розрахункових операцій.

1. Визначення положення кореня пластичної зони із аналізу показань термопар кладки по висоті нижньої частини шахти та заплечиків печі. Положення кореня пластичної зони визначається областю знаходження максимального значення вказаних температур.

2. Координати точок лінії плавлення (кількість визначених точок лінії плавлення відповідає кількості рівних по площі кільцевих зон колошника печі) визначаються, виходячи з припущення, що форма лінії плавлення подібна до кривої розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу шихти (або розподілу температур самої поверхні засипу). Для побудови лінії плавлення пропонується використання спеціальних програмних засобів, призначених для вирішення таких задач, де початковими умовами є подібність цієї лінії до кривої розподілу температур газового потоку (поверхні засипу) на колошнику печі та рівність площі бокової поверхні фігури, що створюється обертанням сформованої лінії навколо вертикальної осі печі, розрахунковій площі, визначеній по удосконаленому методу Г.В. Гуденау.

Визначеним координатам лінії плавлення відповідають температури плавлення сумішей компонентів шихти, які знаходяться у відповідних зонах печі.

*Визначення положення лінії розм'якшення.*

Положення та форма лінії розм'якшення визначається розподілом залізовмісних компонентів  $i$ , відповідно, розподілом температур зміни їх фазового стану. Лінія розм'якшення може бути визначена, як крива, що з'єднує точки, відповідні температурам початку розм'якшення матеріалів в кільцевих зонах печі (визначаються за допомогою виразу (2.8)). Для побудови лінії розм'якшення відповідно до розрахованих температур розм'якшення сумішей залізовмісних компонентів, що сформувалися у різних кільцевих зонах печі, використовується масштабний коефіцієнт  $k_i$ , що характеризує

зміну розрахованих температур плавлення в цих зонах по висоті. Масштабний коефіцієнт для  $i$  – ої кільцевої зони розраховується по формулі:

$$k_i = \frac{T_{\text{пл}}^i - T_i}{S_{\text{пл}}^i - h_i}, \quad (2.40)$$

де

$S_{\text{пл}}^i$  – вертикальна координата точки на лінії плавлення, м;  $h_i$  – вертикальна координата точки на поверхні засипу, м;  $T_{\text{пл}}^i$  – температура плавлення суміші залізорудних матеріалів в  $i$  - й кільцевій зоні, °С;  $T_i$  – температура в  $i$  - й точці на поверхні засипу, °С.

*Визначення товщини пластичної у контрольованих зонах печі, як різниці координат відповідних точок, що визначають положення ліній плавлення та розм'якшення. Також товщина пластичної зони може бути визначена за формулою:*

$$\Delta H_{\text{пз}}^i = \frac{T_{\text{пл}}^i - T_{\text{р}}^i}{k_i}, \quad (2.41)$$

де

$\Delta H_{\text{пз}}^i$  – товщина пластичної зони у  $i$ -й точці, м;

$T_{\text{пл}}^i$  – температура початку розм'якшення, °С;

$T_{\text{р}}^i$  – температура плавлення, °С;

$k_i$  – масштабний коефіцієнт, °С/м.

Таким чином, запропоновано новий метод визначення параметрів пластичної зони (форми, товщини та положення) у доменній печі, заснований на використанні інформації про розподіл температур температур газового потоку над поверхнею засипу шихти (або розподілу температур самої поверхні засипу).

## Висновки до розділу 2

1. Удосконалена математична модель визначення площі поверхні плавлення пластичної зони. Запропонований підхід передбачає розрахунково-аналітичне визначення тепла, яке утворюється у нижній зоні доменної печі, на відміну від відомого, згідно з яким ця величина задається константою та не враховує особливості поточної технології.

2. Запропоновано новий спосіб визначення меж пластичної зони у доменній печі, алгоритм реалізації якого передбачає розрахунки та операції з визначення положення координат точок ліній плавлення та розм'якшення, а також товщини пластичної зони у контрольованих зонах доменної печі. Основою для розробки нового способу з'явилися можливості розрахунку характеристик розподілу компонентів шихти за перерізом печі за допомогою комплексної математичної моделі завантаження компонентів в бункер завантажувального пристрою, вивантаження з нього, руху по тракту завантажувального пристрою та розподілу на поверхні засипу.

3. Запропоновано новий метод визначення параметрів пластичної зони (форми, товщини та положення) у доменній печі, який базується на використанні нового способу та систематизованій сукупності математичних моделей:

- комплексної моделі завантаження багатокomпонентної шихти у доменну піч;
- моделі зміни фазового стану залізовмісних компонентів шихти у високотемпературній зоні;
- удосконаленій моделі визначення площі поверхні плавлення.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМИ І ПОЛОЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ, ОСНАЩЕНОЇ ТЕРМОВИМІРЮВАЛЬНИМИ БАЛКАМИ НАД ПОВЕРХНЕЮ ЗАСИПУ ШИХТИ, ЗА ДОПОМОГОЮ НОВОГО МЕТОДУ

### 3.1. Вибір дослідницьких періодів роботи доменної печі у різних технологічних умовах для визначення форми і положення пластичної зони за допомогою нового методу

Для виконання розрахункових досліджень з визначення параметрів пластичної зони за допомогою запропонованого методу виконано вибір дослідницьких періодів роботи доменної печі у різних технологічних умовах.

Аналіз показників доменної плавки впродовж тривалого часу дозволив виділити періоди, у яких її технологічні умови суттєво відрізнялися і, в першу чергу, складом дуття – наявністю та видами паливно – відновлювальних добавок у ньому.

Для вибору дослідницьких періодів використано показник ефективності плавки ( $e$ ), що визначається з виразу:

$$e = \Pi_{\text{від}} / T_{\text{від}}, \quad (3.1)$$

де

$\Pi_{\text{від}}$  – відносне добове виробництво доменної печі щодо середнього у аналізованому періоді, од.;

$T_{\text{від}}$  – відносна витрата приведенного до коксу палива (витрата коксу + 0,9·витрати коксового горіха + 0,95·витрати ПВП + 0,9·витрати ПГ) щодо середньої витрати палива у аналізованому періоді, од.

Вибір базового режиму здійснювався шляхом визначення найбільш економічного та стабільного інтервалу роботи печі в межах кожного із чотирьох досліджуваних періодів. Відповідно до фізичного змісту запропонованого показника, чим більший показник, тим ефективніша доменна плавка з точки зору економії палива. При роботі доменної печі з паливно відновлювальними

добавками у складі дуття ефективність плавки характеризується також стабільністю ходу печі, свідченням якого може бути незначне відхилення показника ефективності від його середнього значення у дослідному періоді. Грунтуючись на цих положеннях, виконано аналіз зміни показника ефективності плавки у вибірці реальних параметрів діючої доменної печі, сформованій протягом одного року, та виділені чотири дослідницьких періоди:

- період 1 - робота без паливних добавок у дутті ( $e$ : у вибірці - 0,998, у періоді – 1,004; середньоквадратичне відхилення  $e$ : у вибірці  $[\sigma] = 0,0147$ , у періоді  $[\sigma] = 0,0131$ );

- період 2 - робота з природним газом - ( $e$ : у вибірці - 0,999, у періоді – 1,006; середньоквадратичне відхилення  $e$ : у вибірці  $[\sigma] = 0,0248$ , у періоді  $[\sigma] = 0,0227$ );

- період 3 - робота з природним газом та пиловугільним паливом ( $e$ : у вибірці - 1,001, у періоді - 1,015; середньоквадратичне відхилення  $e$ : у вибірці  $[\sigma] = 0,0578$ , у періоді  $[\sigma] = 0,0237$ );

- період 4 - робота з пиловугільним паливом ( $e$ : у вибірці – 1,001, у періоді – 1,007; середньоквадратичне відхилення  $e$ : у вибірці  $[\sigma] = 0,0297$ , у періоді  $[\sigma] = 0,0196$ ).

Таблиця 3.1. – Склад шихти, характеристики шихтових матеріалів, технологічні параметри та техніко – економічні показники роботи доменної печі у дослідницьких періодах

Склад шихти				
Найменування шихтового матеріалу, параметр	Витрата шихтових матеріалів, кг/т чугуна			
	Період 1	Період 2	Період 3	Період 4
Окатиші ПівнГЗК	902,5	905,2	621,7	476,9
Агломерат ЄМЗ	832,3	771,6	690,1	823,2
Агломерат ПівдГЗК	0,0	0,0	356,5	369,1
Вапняк	39,5	36,3	28,3	20,7
Марганецьвмісна добавка	21,9	4,3	22,3	25,1
Конвертерний шлак	56,0	93,1	33,8	42,4
Кокс	562,2	475,7	429,3	398,2

Продовження таблиці 3.1

«Коксовий горіх»	33,9	34,0	34,0	34,3
Вміст окатишів у суміші з агломератом, %	52,1	54,0	37,5	28,8
Середньоквадратичне відхилення вмісту окатишів у суміші з агломератом, %	6,3	8,9	11,1	14,1
Середньозважений хімічний склад залізорудних шихтових матеріалів, %				
SiO <sub>2</sub>	8,62	8,47	7,92	8,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,49	1,43	1,46	1,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	67,84	68,54	69,12	65,24
CaO	11,78	11,22	9,66	10,28
MgO	1,22	1,31	1,06	0,95
MnO	0,44	0,29	0,51	0,53
FeO	6,74	7,56	9,08	11,95
Fe	52,73	53,85	55,44	54,95
<i>Основність агломерату та окатишів</i>				
Вид матеріалу	Значення			
Окатиші ПівнЗГК	0,05	0,05	0,05	0,05
Агломерат ЄМЗ	2,22	2,06	1,62	1,37
Агломерат ПівдГЗК	-	-	1,61	1,61
<i>Якість коксу</i>				
Показник	Вміст, значення показника, %			
W	3,89	3,95	3,99	3,76
Зола	10,95	10,73	10,63	10,96
Сера	1,00	0,98	0,91	0,84
M25	88,13	88,01	88,08	87,81
M10	7,46	7,49	7,40	7,33
> 80	9,65	8,48	7,61	8,52
0 - 25	3,23	3,33	3,11	3,25
CSR	53,71	53,64	50,97	49,07
CRI	32,54	32,02	32,81	35,16
<i>Основні технологічні параметри</i>				
Параметр	Значення			
Виробництво, т/д	2672	3145	3357	3483
Витрата ПГ, м <sup>3</sup> /т чавуну	-	58,5	9,1	-
Витрата ПВТ, кг/т чавуну	0,0	0,0	98,3	139,1
Витрата дуття Q <sub>д</sub> , м <sup>3</sup> /хв	3348	3374	3389	3279
Вміст O <sub>2</sub> в ХД, %	20,95	22,87	22,57	25,37
T <sub>гд</sub> , °C	906	1020	1053	1057

Продовження таблиці 3.1

T <sub>f</sub> , °C	2040	2118	2178	2306
φ <sub>д</sub> , Г/М <sup>3</sup>	16,65	8,07	12,21	9,24
Q <sub>парі</sub> , Т/ч	2,4	0,3	0,5	0,8
T <sub>кол</sub> <sup>ср</sup>	291	278	311	300
T <sub>пф</sub> <sup>ср</sup>	443	443	470	190 <sup>*</sup> )
P <sub>гд</sub> , атн	2,78	2,83	2,81	2,85
ΔP <sub>Σ</sub> , атн	0,95	0,99	0,97	0,98
ΔP <sub>в</sub> , атн	0,08	0,11	0,10	0,11
ΔP <sub>н</sub> , атн	0,86	0,88	0,88	0,87
P <sub>к</sub> , атн	1,83	1,84	1,83	1,88
Вихід шлаку, кг/т чавуну	424	415	376	398
Рудне навантаження P <sub>н</sub> , т/т	2,86	3,27	3,59	4,16
Хімічний склад чавуну та шлаку				
[Si], %	0,50	0,65	0,62	0,60
[Mn], %	0,75	0,53	0,65	0,61
[S], %	0,061	0,073	0,077	0,082
[P], %	0,106	0,098	0,093	0,094
[C], %	4,44	4,27	4,36	4,22
[Ti], %	0,021	0,014	0,016	0,009
(MgO), %	5,26	5,73	5,61	5,50
(SiO <sub>2</sub> ), %	40,86	41,23	39,90	41,73
(CaO), %	47,65	45,13	44,32	43,19
(FeO), %	0,41	0,51	0,42	0,44
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	6,43	6,18	6,20	6,23
(MnO), %	1,17	0,98	1,02	1,17
(S), %	0,92	1,04	1,01	1,05
(CaO)/(SiO <sub>2</sub> ), од.	1,17	1,10	1,11	1,04

Особливості роботи печі у дослідницьких періодах, у першу чергу, обумовлені використанням різних паливних добавок у дутті. Період 1, який характеризувався відсутністю таких добавок мав найгірші показники з виробництва чавуну та витрати твердого палива. У цілому, у чотирьох періодах виробництво чавуну та рудне навантаження збільшувались разом із збільшенням кількості паливних добавок у дутті, незважаючи на погіршення якості коксу по показнику CSR.

### 3.2 Розрахункові дослідження щодо визначення площі поверхні плавлення в доменній печі

Ґрунтуючись на положеннях методу визначення параметрів пластичної зони доменної печі, оснащеної термовимірювальними балками над поверхнею засипу, представлених у розділі 2, для обраних базових періодів роботи ДП виконані розрахункові дослідження з визначення площі поверхні плавлення за допомогою виразу (2.11).

На відміну від раніше виконаних досліджень, запропонований метод передбачає розрахунок загальної кількості тепла  $Q_{\text{заг}}$ , що витрачається на утворення рідких продуктів плавки (раніше ця величина задавалася константою). Крім того, при розрахунках температури випромінювання коксу, яка є функцією теоретичної температури горіння, враховується використання у технології доменної плавки пиловугільного палива.

Однією з відмінних рис розрахунків за допомогою запропонованого методу є використання уточнених для сучасних шихтових умов моделей визначення температур, що характеризують межі пластичної зони – температур початку розм'якшення та плавлення залізовмісних матеріалів.

Розрахунки температур початку розм'якшення та плавлення виконані для умов розподілу залізовмісних компонентів шихти у десяти рівновеликих зонах радіусу колошника. Слід зазначити, що в першому, другому та четвертому періодах використовувалася програма завантаження доменної печі, що забезпечує представлений у табл. 3.2 розподіл у зонах мас компонентів шихти, що вивантажуються.

У табл. 3.2–3.3 наведено розподіл у зонах мас компонентів шихти, що вивантажуються, при програмі завантаження, яка використовується у першому, другому, третьому та четвертому періодах.

На основі розподілу мас компонентів шихти в зонах колошника та їх складу (табл. 3.4–3.5), за моделями прогнозування високотемпературних

властивостей залізовмісних матеріалів наведених у розділі 2 (2.5–2.10), розраховано температури початку розм'якшення й плавлення (табл. 3.6–3.7).

Таблиця 3.2 – Розподіл у зонах мас компонентів шихти, що вивантажуються (перший, другий і четвертий періоди)

Найменування компонента	№ кільцевої зони колошника									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Маса, т									
Агломерат	1.506	3.989	6.521	9.426	11.582	12.536	13.246	12.755	12.132	11.202
Окатиші	1.515	4.641	7.72	9.929	11.657	12.264	11.937	11.549	10.557	9.779
Кокс	9.019	7.632	6.199	4.799	3.793	3.458	3.459	3.688	4.13	4.5
Кокс горіх	0.055	0.174	0.272	0.387	0.421	0.414	0.396	0.378	0.329	0.319
Вапняк	0.094	0.297	0.465	0.661	0.72	0.707	0.678	0.646	0.562	0.546
Конвертерний шлак	0.125	0.397	0.621	0.884	0.963	0.945	0.906	0.864	0.752	0.73
Руда	0.042	0.18	0.294	0.369	0.332	0.287	0.259	0.222	0.188	0.172
Σ ЗВМ	3.189	9.207	15.157	20.608	24.534	26.033	26.348	25.39	23.629	21.883

Таблиця 3.3 – Розподіл у зонах мас компонентів шихти, що вивантажуються (третій період)

Найменування компонента	№ кільцевої зони колошника									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Маса, т									
Агломерат	3.235	5.977	8.576	9.952	10.072	10.811	11.873	11.754	11.667	10.979
Окатиші	3.288	7.038	9.258	9.821	10.356	10.506	10.526	10.686	10.209	9.857
Кокс	8.293	6.626	5.312	4.757	4.558	4.273	4.06	4.063	4.24	4.495
Кокс горіх	0.121	0.223	0.311	0.352	0.381	0.407	0.368	0.359	0.319	0.303
Вапняк	0.207	0.381	0.532	0.602	0.652	0.696	0.63	0.613	0.545	0.518
Конвертерний шлак	0.277	0.509	0.711	0.805	0.872	0.931	0.842	0.82	0.728	0.692
Руда	0.1	0.209	0.323	0.358	0.296	0.275	0.233	0.203	0.182	0.166
Σ ЗВМ	6.9	13.733	18.869	20.937	21.596	22.523	23.475	23.463	22.787	21.694

Таблиця 3.4 – Хімічний склад залізовмісних компонентів шихти у кільцевих зонах колошнику (перший, другий та четвертий періоди роботи печі)

№ зони	Вміст компонента, %										Параметри міжатомної взаємодії	
	Fe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Δε	ρ
1	53,36	7,49	67,90	12,49	8,68	1,33	1,50	0,53	0,082	0,11	-2,2	0,73
2	53,47	7,12	68,46	12,14	8,68	1,31	1,48	0,73	0,083	0,11	-2,33	0,73
3	53,66	7,05	68,80	11,91	8,67	1,29	1,47	0,71	0,082	0,11	-2,35	0,73
4	53,19	7,39	67,76	12,55	8,70	1,34	1,50	0,687	0,084	0,12	-2,29	0,73
5	53,36	7,48	67,90	12,48	8,68	1,33	1,50	0,54	0,082	0,11	-2,25	0,73
6	53,49	7,54	68,02	12,40	8,67	1,32	1,51	0,46	0,08	0,11	-2,23	0,73
7	53,35	7,75	67,58	12,64	8,68	1,33	1,50	0,42	0,081	0,11	-2,21	0,73
8	53,41	7,74	67,69	12,59	8,67	1,32	1,52	0,39	0,081	0,10	-2,20	0,73
9	53,42	7,83	67,60	12,61	8,67	1,32	1,53	0,36	0,080	0,10	-2,19	0,73
10	53,35	7,83	67,49	12,71	8,67	1,33	1,53	0,36	0,081	0,10	-2,18	0,73

Таблиця 3.5 – Хімічний склад залізовмісних компонентів шихти у кільцевих зонах колошнику (третій період роботи печі)

№ зони	Вміст компонента, %										Параметри міжатомної взаємодії	
	Fe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Δε	ρ
1	56,02	8,43	70,67	9,55	8,33	0,97	1,36	0,62	0,070	0,12	-2,49	0,
2	56,49	7,92	71,90	8,90	8,31	0,93	1,34	0,63	0,067	0,11	-2,56	0,70
3	56,21	8,20	71,20	9,21	8,33	0,95	1,36	0,69	0,068	0,12	-2,55	0,70
4	55,99	8,49	70,54	9,52	8,33	0,97	1,37	0,70	0,069	0,12	-2,52	0,71
5	56,06	8,39	70,76	9,53	8,33	0,97	1,36	0,60	0,069	0,12	-2,49	0,71
6	55,93	8,59	70,36	9,75	8,33	0,98	1,36	0,55	0,070	0,12	-2,45	0,71
7	56,15	8,84	70,39	9,59	8,31	0,97	1,38	0,46	0,068	0,11	-2,44	0,71
8	56,29	8,75	70,69	9,45	8,30	0,96	1,38	0,42	0,068	0,11	-2,44	0,70
9	56,42	8,85	70,76	9,33	8,30	0,95	1,38	0,38	0,066	0,11	-2,44	0,70
10	56,48	8,76	70,94	9,25	8,29	0,95	1,37	0,37	0,066	0,11	-2,44	0,70

Таблиця 3.6 – Температури початку розм'якшення ( $T_{пр}$ ) та плавлення ( $T_{пл}$ ) залізовмісних матеріалів у кільцевих зонах для першого, другого та четвертого періодів роботи печі

Параметр	Вісь	№ кільцевої зони										Кладка
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$T_{пр}, ^\circ\text{C}$	1016	1017	1012	1010	1016	1017	1017	1020	1020	1021	1022	1022
$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	1330	1335	1340	1341	1337	1335	1334	1332	1332	1330	1330	1330

Таблиця 3.7 – Температури початку розм'якшення та плавлення залізовмісних матеріалів у кільцевих зонах для третього періоду роботи печі

Параметр	Вісь	№ кільцевої зони										Кладка
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$T_{пр}, ^\circ\text{C}$	1006	1003	998	1001	1004	1003	1005	1007	1006	1006	1006	1006
$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	1341	1336	1342	1339	1336	1336	1334	1333	1334	1333	1334	1334

Результати розрахунків площі поверхні плавлення для аналізованих базових періодів роботи доменної печі, характерні технологічні параметри яких представлені в розділі 3.1, наведено в табл. 3.8.

Отримані в результаті розрахунків параметри є початковою інформацією визначення положення лінії плавлення в об'ємі доменної печі.

### 3.3 Визначення положення кореня пластичної зони

Як показано у розділі 2, одним із припущень запропонованого методу визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі є умова знаходження кореня пластичної зони, виходячи з аналізу динаміки зміни температур периферійного газового потоку. Відомо, що в області кореня пластичної зони теплові навантаження на стінки печі в її нижній зоні значно зростають. Тому, виходячи з аналізу зміни температур газового потоку, що реєструються за допомогою встановлених по висоті шахти печі термопар,

можна визначити положення кореня пластичної зони, якому відповідає максимальне їх значення (екстремум).

Таблиця 3.8 – Розрахункові параметри визначення площі поверхні плавлення в доменній печі

Параметр	Умовне позначення	Розмірність	Період			
			1	2	3	4
Геометрична постійна моделі, яка залежить від рудного навантаження та її розподілу	К	од.	2,0	2,0	2,0	2,0
Кількість тепла на утворення рідких продуктів плавки	$Q_{\text{заг}}$	кДж	9201664,2	9776940,5	10833656,7	11623234,0
Виробництво чавуну	$P_{\text{чав.}}$	т/добу	2672	3145	3357	3483
Вихід шлаку	$P_{\text{шл}}$	т/т чавуну	424	415	376	398
Виробництво рідких продуктів плавки	$P_{\text{р}}$	т/год	194,9	227,3	232,9	247,3
Постійна випромінювання	С	кДж/год м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup>	2,91	2,91	2,91	2,91
Теоретична температура горіння коксу	$T_{\text{г}}$	°С	2040	2118	2178	2306
Температура випромінювання коксу	$T_{\text{випр. коксу}}$	°С	1652,4	1715,58	1764,18	1868,153
Температура плавлення залізовмісних матеріалів	$T_{\text{пл.агл}}$	°С	1334	1334	1336	1336
Середня температура газу у фурменій зоні	$T_{\text{газ}}$	°С	3693,4	3981,9	4167,4	4290,3
Температура чавуну	$T_{\text{чав.}}$	°С	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0
Температура початку розм'якшення	$T_{\text{п.р.}}$	°С	1017,5	1017,5	1004	1004
Температура рідких фаз у горні	$T_{\text{р.ф}}$	°С	1550	1550	1550	1550
Коефіцієнт теплопередачі конвекцією	$h_{\text{с}}$	кДж/м <sup>2</sup> ·год·°С	42,6900	48,6922	45,5839	43,7853
Теплопровідність газу	$\lambda_{\text{г}}$	кДж/м·год·°С	0,083	0,097	0,088	0,085
Діаметр горну	$D_{\text{н.о}}$	м	9,1	9,1	9,1	9,1
Масовий газовий потік	$U_{\text{г}}$	кг/м <sup>2</sup> ·год	4755,3	4833,8	4855,4	4787,2
Динамічна в'язкість газу	$\eta_{\text{г}}$	кг/м·год	0,2376	0,2376	0,2376	0,2376
Середня теплоємність газу	$C_{\text{р}}$	кДж/нм <sup>3</sup> ·К	0,3986	0,3999	0,4037	0,4038
Щільність фурменого газу	$\rho_{\text{г}}$	кг/м <sup>3</sup>	1,2308	1,2096	1,2311	1,2396
<b>Тепло, принесене нагрітим дуттям</b>						
Тепловміст дуття	$i_{\text{д}}$	кДж/нм <sup>3</sup>	1245,538	1432,604	1480,231	1489,005
Тепло, принесене нагрітим дуттям (за вирахуванням розкладання водяної пари )	$q_{\text{д}}$	кДж/нм <sup>3</sup>	2247338	2213161	2151851	2018301

## Продовження таблиці 3.8

Тепло, що утворюється при згорянні коксу, природного газу, ПВП						
Тепловіддача вуглецю коксу, що згорає у фурм	$q_{cf}$	кДж/нм <sup>3</sup>	11667,62	11940,03	12042,69	11691,89
Кількість вуглецю коксу, що згорає у фурм	$C_f$	кг/хв	788,6494	812,9425	842,1345	911,6211
Тепловіддача від згорання ПГ	$q_{пг}$	кДж/нм <sup>3</sup>	1511,85	2627,622	2659,096	1511,85
Тепло ПВП	$q_{пвп}$	кДж/нм <sup>3</sup>	6935,04	6935,04	6935,04	6935,04
Прихід тепла у області відновлення						
Окислення вуглецю коксу в СО при прямому відновленні	$q_{cd}$	КДж/кг чугуна	9232,178	9154,743	9132,074	9129,326
Окислення СО в СО <sub>2</sub> при непрямому відновленні	$q_{co}$		12406,67	12474,28	12418,77	12443,37
Окислення Н <sub>2</sub> в Н <sub>2</sub> О	$q_h$		10653,89	10716,04	10675,27	10694,44
Витрата СО на непряме відновлення м <sup>3</sup> /кг чавуну – окисленням Н <sub>2</sub> в Н <sub>2</sub> О	СО <sub>i</sub>		0,032681	1,588522	0,195624	0,02968
	Н <sub>2сум</sub>		0,032681	1,588522	0,195624	0,02968
	b <sub>1</sub>		0,178797	0,112857	0,141818	0,114673
	b <sub>2</sub>		1,718008	1,809143	1,713824	1,67842
	b <sub>6</sub>		- 0,02349	1,505731	0,137114	- 0,00767
	C <sub>0</sub>		- 0,02349	1,505731	0,137114	- 0,00767
	C <sub>к</sub>		0,2996	0,2996	0,2996	0,2996
	Q <sub>h2</sub>	0,8665	0,8665	0,8665	0,8665	
	Q <sub>відновл</sub>	кДж	8444,675	24669,85	11547,8	10748,11
Кількість тепла, що витрачається на утворення рідких продуктів плавки	Q <sub>заг</sub>	кДж	9210109	9801610	10845205	11633982
Площа поверхні плавлення	A	м <sup>2</sup>	174,72	138,74	129,44	124,38

Прийнята гіпотеза про положення кореня ПЗ підтверджується результатами досліджень німецьких вчених, виконаних на ДП заводу фірми Тіссен у м. Швельгерн [9, 79].

Виконаний нами аналіз характеру зміни по висоті печі температур газового потоку в периферійній її зоні (рис. 3.1) показав, що максимальне значення температури (екстремум кривої), наприклад, у першому періоді роботи відзначено на рівні 12 м від технологічного нуля (ТН) – від верху захисних плит колошника, або 13 м від осі повітряних фурм (п/ф), у другому періоді – на рівні 15 м від ТН (10 м від осі п/ф), у третьому – на рівні 18 м від ТН (7 м від осі п/ф).

Встановлені значення вертикальної координати екстремумів зміни температур газового потоку в периферійній зоні шахти печі прийняті як координати знаходження кореня пластичної зони.

#### **3.4 Визначення координат положення ліній розм'якшення та плавлення у доменній печі**

Як показано в розділі 2, для визначення положення лінії плавлення в ДП прийнято гіпотезу про її подібність кривої розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу шихти на колошнику.

Температури газового потоку над поверхнею засипу для чотирьох досліджуваних періодів роботи печі представлені в табл. 3.9.

Зміна температур газового потоку над поверхнею засипу, координати кореня пластичної зони є початковою інформацією для її подальшої побудови в об'ємі доменної печі.

На рис. 3.2 представлені криві зміни температур газового потоку, що фіксуються над поверхнею засипу шихти за допомогою термозондів.

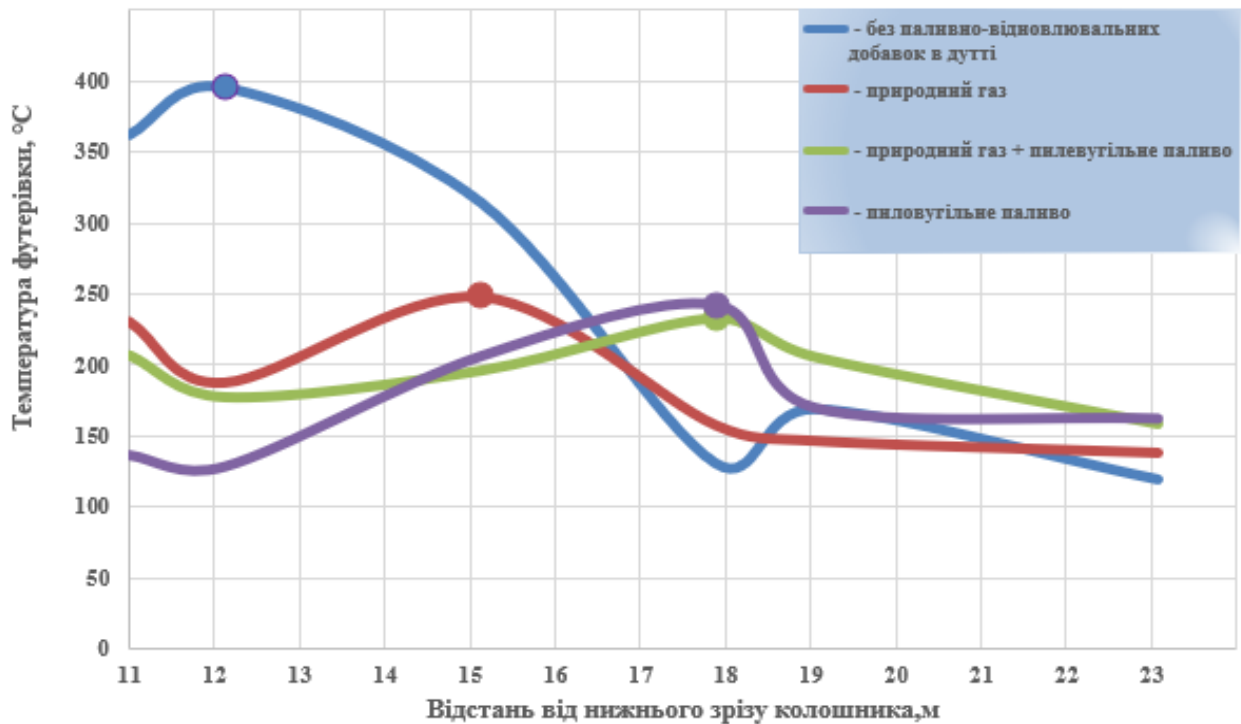


Рисунок 3.1 – Розподіл температури газового потоку в периферійній зоні по висоті ДП у досліджуваних періодах її роботи

Таблиця 3.9 – Температури газового потоку над поверхнею засипу в точках вимірювання за допомогою термозондів

Період	№ точки виміру							
	1 (ПФ)	2	3	4	5	6	7	8 (Вісь)
	Температура, °C							
1	282	305	263	219	209	221	325	498
2	256	270	245	216	210	212	325	461
3	322	332	283	242	234	229	371	525
4	266	320	251	216	213	240	317	445
Відстань від осі печі, м	3,55	3,29	2,94	2,55	2,08	1,47	1,04	0,05

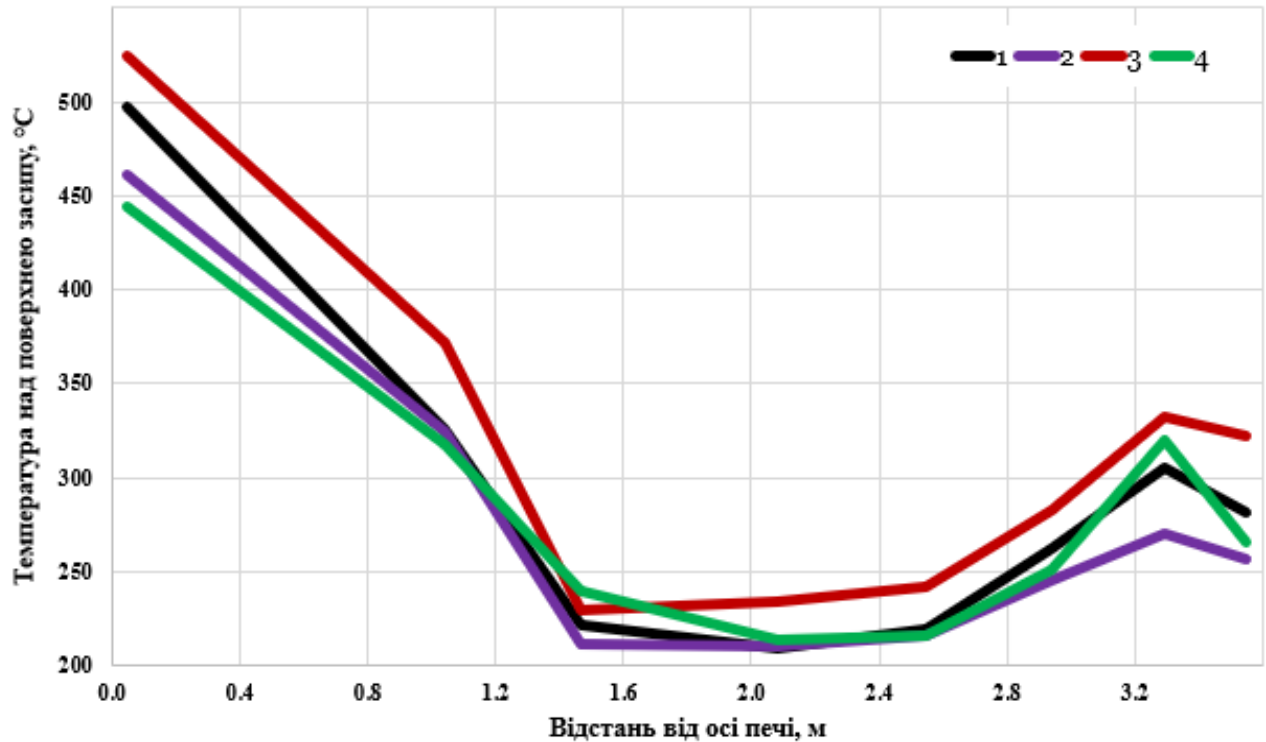


Рисунок 3.2 – Зміна температур газового потоку для чотирьох періодів роботи ДП

Для цього з використанням системи автоматизованого проектування (CAD-системи) реалізовано основні положення нового методу визначення форми та положення пластичної зони в ДП, для чого виконуються наступні дії:

- в масштабі виконується побудова лінії розподілу температури. Для побудови застосовується лінія типу неоднорідний раціональний В-сплайн, NURBS (англ. Non-uniform rational B-spline) — математична форма, що застосовується в комп'ютерній графіці для генерування та подання кривих та поверхонь;

- визначається положення кореня лінії плавлення та відстань від нього до осі печі;

- лінія, яка була раніше побудована, як характеристика розподілу температур, копіюється та ставиться у положення кореню лінії плавлення;

- визначається відстань від точки кореня лінії плавлення до осі печі. Лінія розподілу температур, встановлена в точку кореня, масштабується вздовж горизонтальної осі таким чином, щоб протилежний від кореня кінець торкався осі печі (рис. 3.3). Таким чином, робиться перший крок трансформації лінії розподілу температур в лінію поверхні плавлення;

- виконується покрокове масштабування трансформованої лінії вздовж вертикальної осі. За допомогою операції «обертання» будується модель поверхні плавлення (рис. 3.4) та визначається відповідність значення площі побудованої моделі поверхні її розрахованим значенням (рис. 3.5);

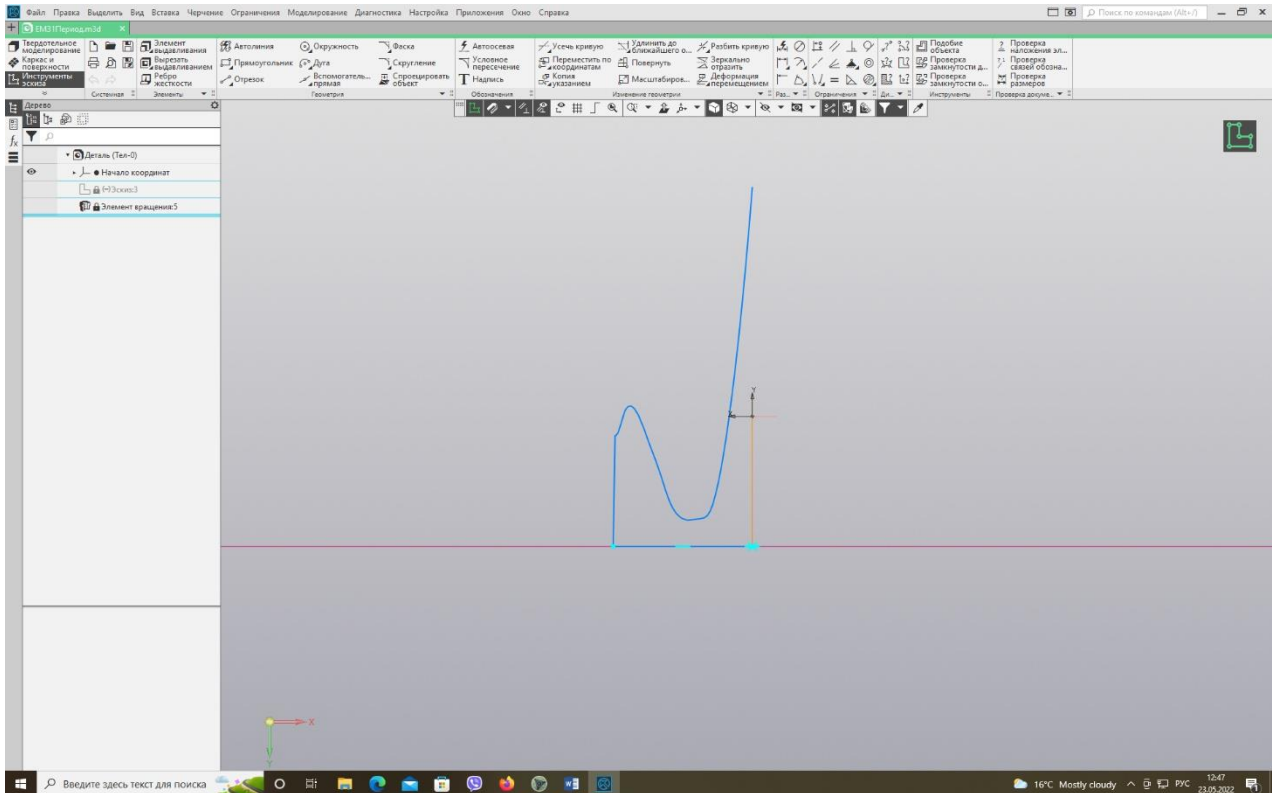


Рисунок 3.3 – Контур лінії плавлення

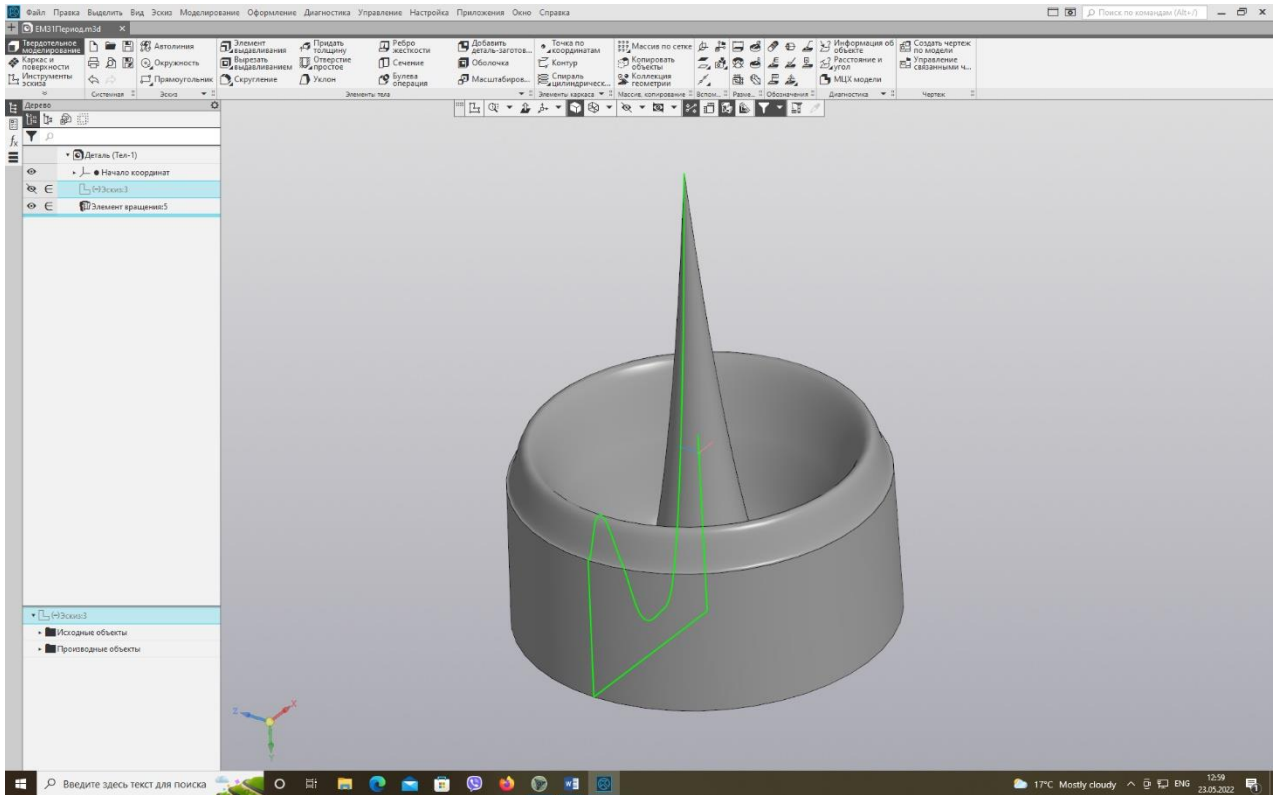


Рисунок 3.4 – Контур лінії та поверхні плавлення

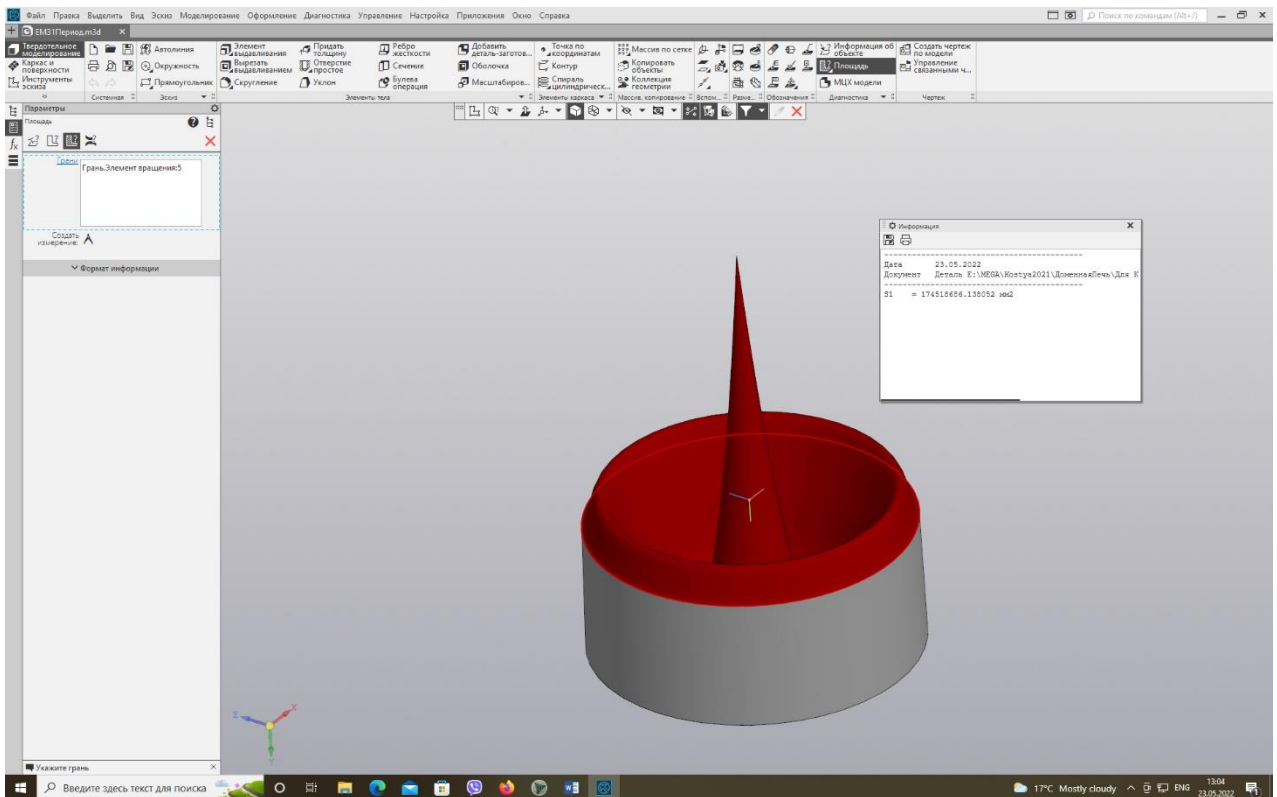


Рисунок 3.5 – Визначення площі поверхні плавлення

- виконується побудова лінії плавлення на схемі контуру доменної печі (рис. 3.6);

- визначаються координати (рис. 3.6) десяти точок, які належать лінії плавлення, та розташовані посередині десяти кільцевих зон. Також фіксується 11-та координата точки положення кореня лінії плавлення;

- далі виконується побудова лінії розм'якшення (рис. 3.7). Значення вертикальних координат точок, що належать лінії розм'якшення, визначаються за виразом:

$$H_{pl} = \frac{T_{pl} - T_{nr}}{k}, \quad (3.2)$$

де

$H_{pl}$  – відстань від осі низу колошника до точки на лінії плавлення у відповідній кільцевій зоні, м;

$T_{pl}$  – температура початку плавлення, °С;

$T_{nr}$  – температура початку розм'якшення, °С;

$k$  – масштабний коефіцієнт, °С/м.

Визначені за допомогою САП – системи координати ліній плавлення та розм'якшення для чотирьох періодів роботи доменної печі представлені в табл. 3.10 та табл. 3.11.

### **3.5 Візуалізація розрахованих за допомогою запропонованого методу меж пластичної зони доменної печі**

Ґрунтуючись на положеннях методу визначення параметрів пластичної зони у доменній печі, оснащеної термовимірювальними балками над поверхнею засипу (представлена в розділі 2), а також отриманих за її допомогою результатів розрахунку площі поверхні плавлення визначено межі пластичної зони для умов

роботи доменної печі у чотирьох дослідних періодах. Візуалізація результатів розрахунків представлена на рис. 3.8 – 3.11.



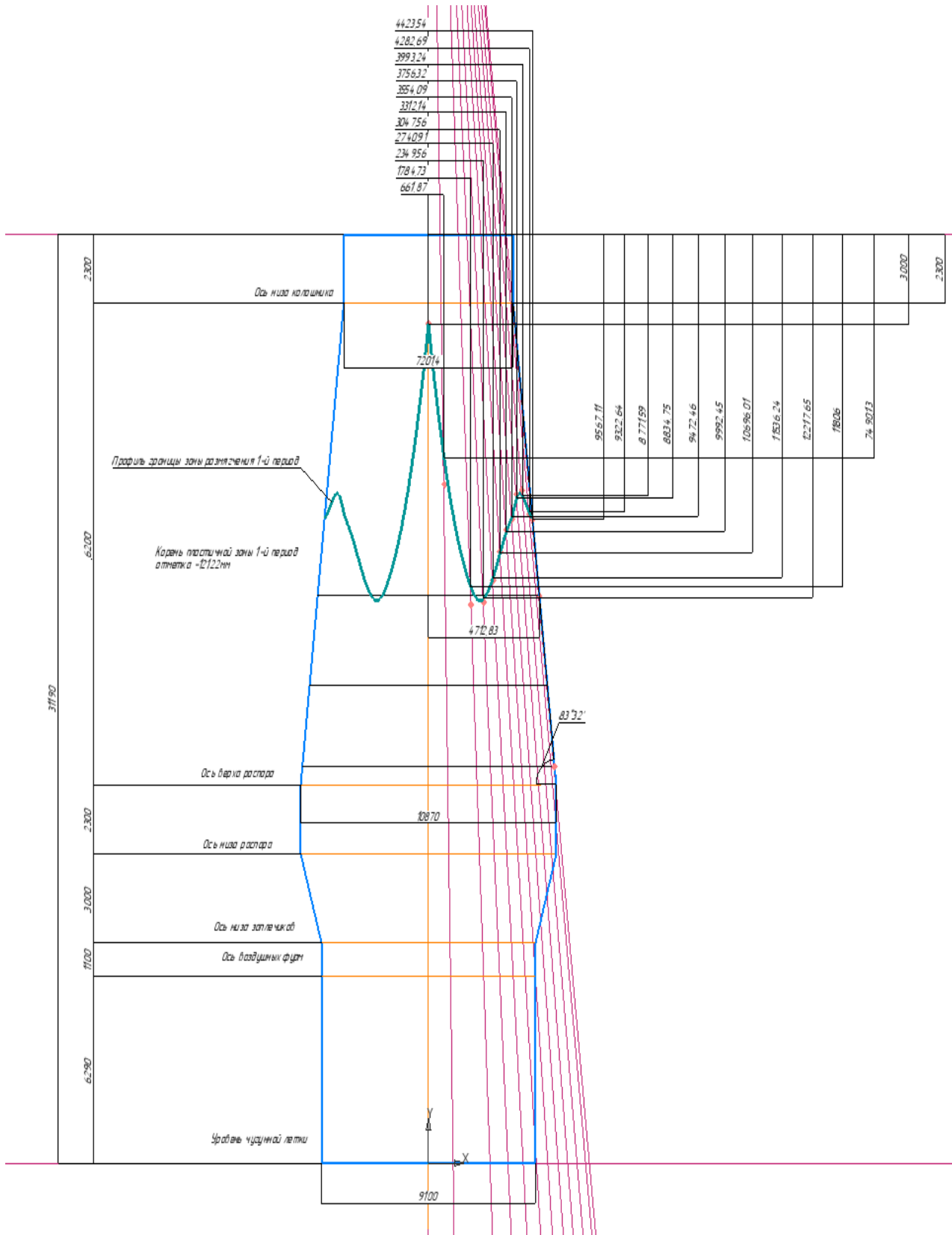


Рисунок 3.7 – Відображення лінії розм'якшення на схемі контуру доменної печі

Таблиця 3.10 – Координати лінії плавлення для чотирьох досліджуваних періодів роботи печі

<b>Перший період</b>												
№ кільцевої зони	0 - вісь	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Стінка
Температура зонд, °С	498	464,42	239,5	203,16	209,27	212,35	226,66	253,71	285,46	305	297,75	282
<b>Координати лінії плавлення</b>												
x, мм	0	718,67	1924,03	2484,55	2898,1	3215,54	349505	3738,78	3968,61	4209,72	4539,73	4580,9
z, мм	3383,29	10664,88	14698,05	14614,35	13889,74	12911,61	12173,4	11840	11001,27	10846,36	11652,68	11840
<b>Другий період</b>												
№ кільцевої зони	0 - вісь	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Стінка
Температура зонд, °С	461	469,48	231,42	198,31	210,61	212,79	220,5	238,5	261,38	270	258,94	255,73
<b>Координати лінії плавлення</b>												
x, мм	0	758,15	1985,3	2585,65	3044,39	3410,87	3735,44	4026,21	4300,7	4577,75	4886,9	5024,32
z, мм	7935,95	12871,49	16448,14	16409,57	16079,96	15487,91	15039,71	14649,62	14390,45	14373,69	14799,8	14873
<b>Третій період</b>												
№ кільцевої зони	0 - вісь	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Стінка
Температура зонд, °С	525	551,61	252,88	215,65	234,9	238,18	247,44	272,41	309,88	331,89	325,17	321,78
<b>Координати лінії плавлення</b>												
x, мм	0	832,07	2101,14	2736,2	3229,93	3632,81	3987,99	4305,35	4601,72	4891,57	5187,92	5328,34
z, мм	13997,28	17002,7	19129,13	19082,54	18857,86	18415,27	18050,97	17710,51	17462,51	17382,6	17528,58	17558
<b>Четвертий період</b>												
№ кільцевої зони	0 - вісь	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Стінка
Температура зонд, °С	445	412,36	255,35	216,43	213,11	215,24	216,9	237,33	294,66	320	277,28	266
<b>Координати лінії плавлення</b>												
x, мм	0	844,78	2071,83	2704,09	3200,82	3619,69	3986,51	4308,06	4608,9	4912,82	5261,92	5311,34
z, мм	16436,75	17713,04	18450,88	18512,42	18422,02	18242,23	18033,32	17740,22	17535,81	17585,05	18199,44	17558

Таблиця 3.11 – Координати лінії розм'якшення для чотирьох досліджуваних періодів роботи печі

**Перший період**

№ кільцевої зони	0 - вісь	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Стінка
Координати лінії розм'якшення												
x, мм	0	661,87	1784,73	2349,56	2740,91	3047,56	3312,14	3554,09	3756,32	3993,24	4282,69	4423,54
z, мм	3000	7490,13	11806	1221765	11536,24	10696,01	9992,45	9472,46	8834,75	8771,59	9322,64	9567,11

**Другий період**

№ кільцевої зони	0 - вісь	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Стінка
Координати лінії розм'якшення												
x, мм	0	702,55	1862,8	2452,97	2886,97	3236,49	3542,55	3818,01	4079,13	4347,38	4629,02	4763,9
z, мм	5635,95	9763,73	13612,92	14053,68	13723,06	13187,91	12739,31	12349,62	12129,18	12165,78	12462,17	12573

**Третій період**

№ кільцевої зони	0 - вісь	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Стінка
Координати лінії розм'якшення												
x, мм	0	782,96	1988,04	2604,69	3073,27	3458,43	3795,09	4096,61	4378,9	4656,55	4932,98	5067,91
z, мм	11697,28	14419,97	16511,61	16747,51	16512,39	16115,27	15750,97	15421,57	15188,51	15128,9	15217,55	15258

**Четвертий період**

№ кільцевої зони	0 - вісь	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Стінка
Координати лінії розм'якшення												
x, мм	0	800,07	1968,67	2573,09	3045,97	3444,64	3792,07	4099,33	4387,76	4685,76	4977,9	5067,91
z, мм	14136,75	15214,29	16063,15	16186,45	16103,59	15933,32	15714,86	15451,41	15278,92	15408,89	15624,8	15258

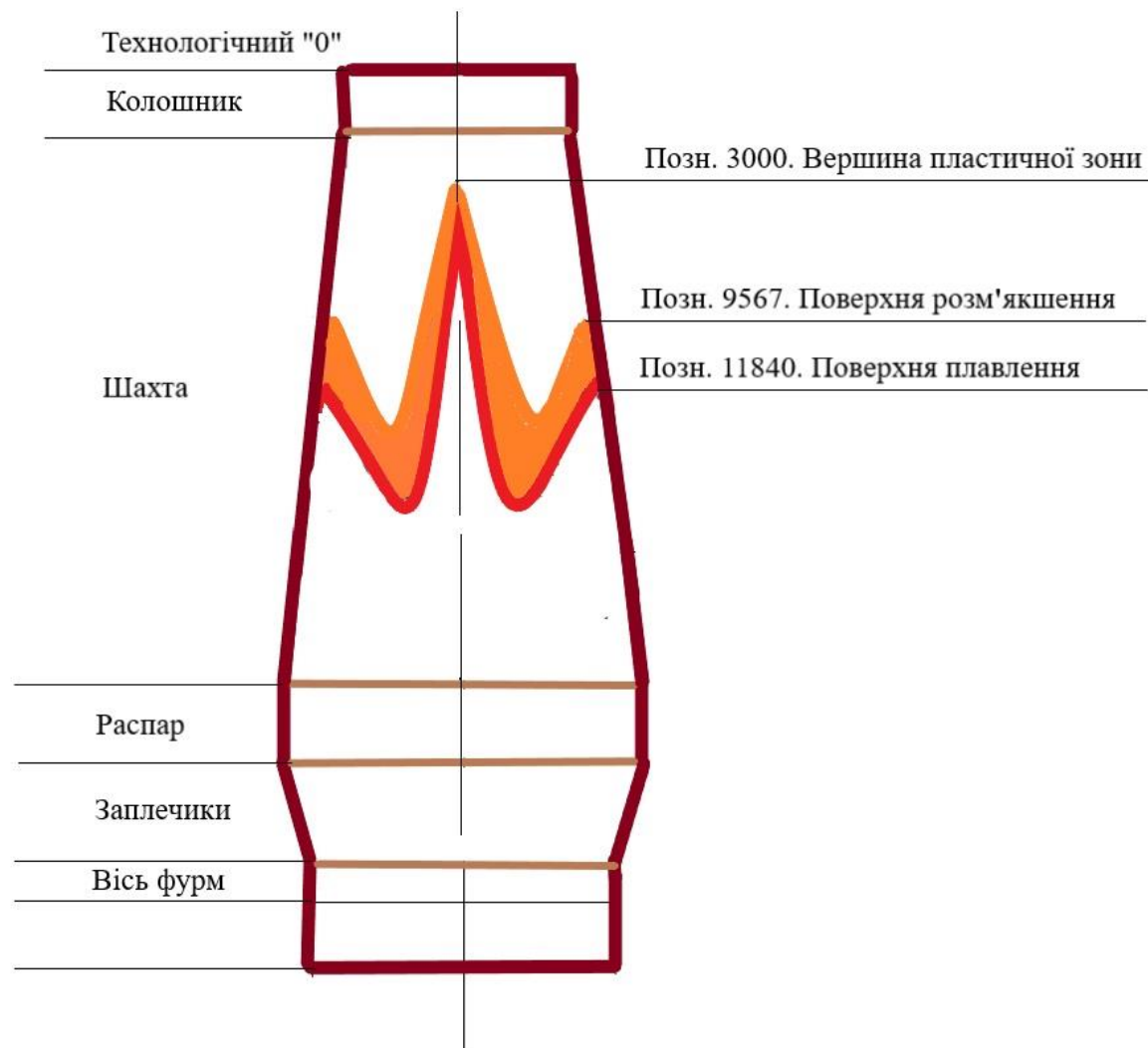


Рисунок 3.8 – Межі пластичної зони (перший період)

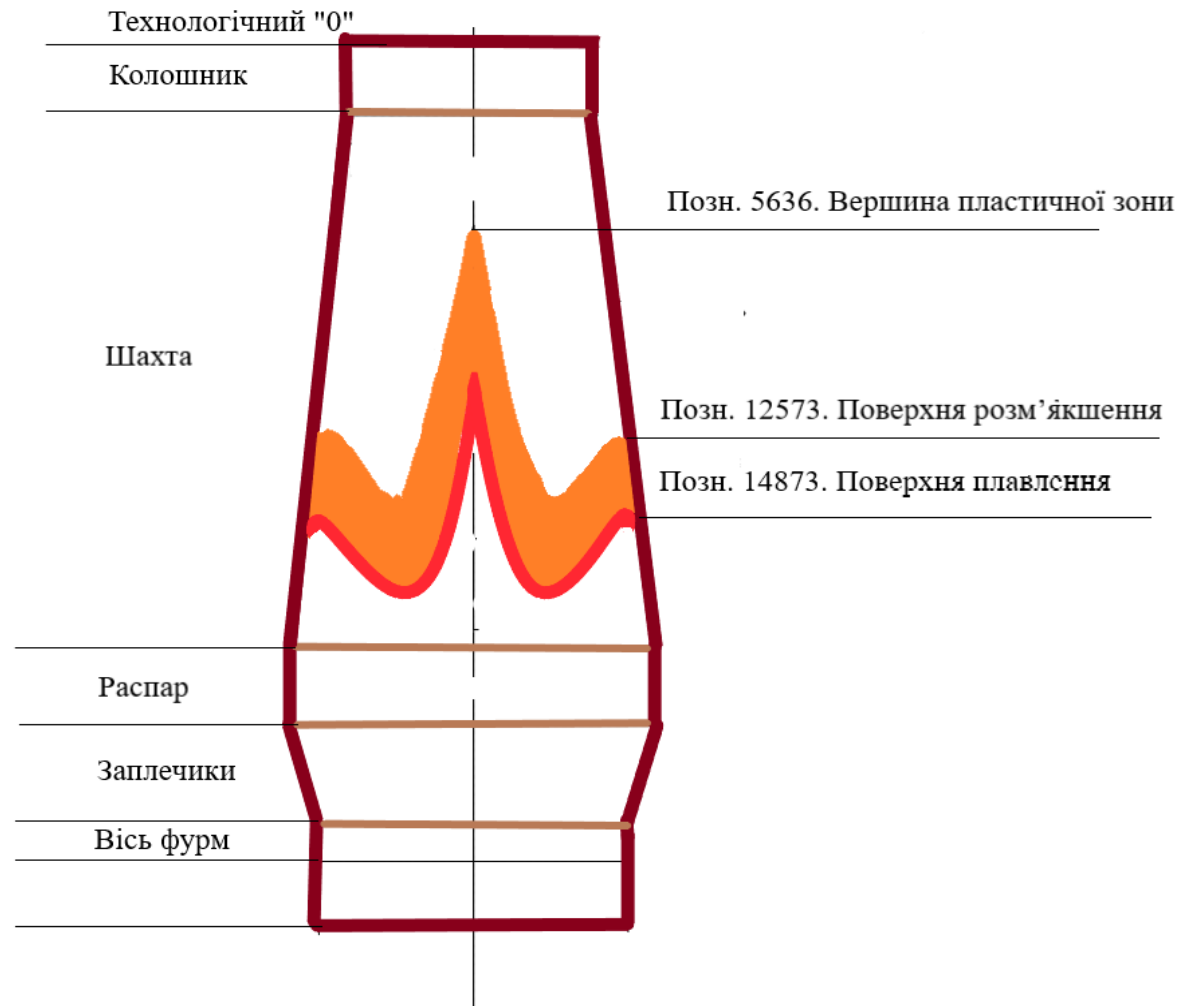


Рисунок 3.9 – Межі пластичної зони (другий період)

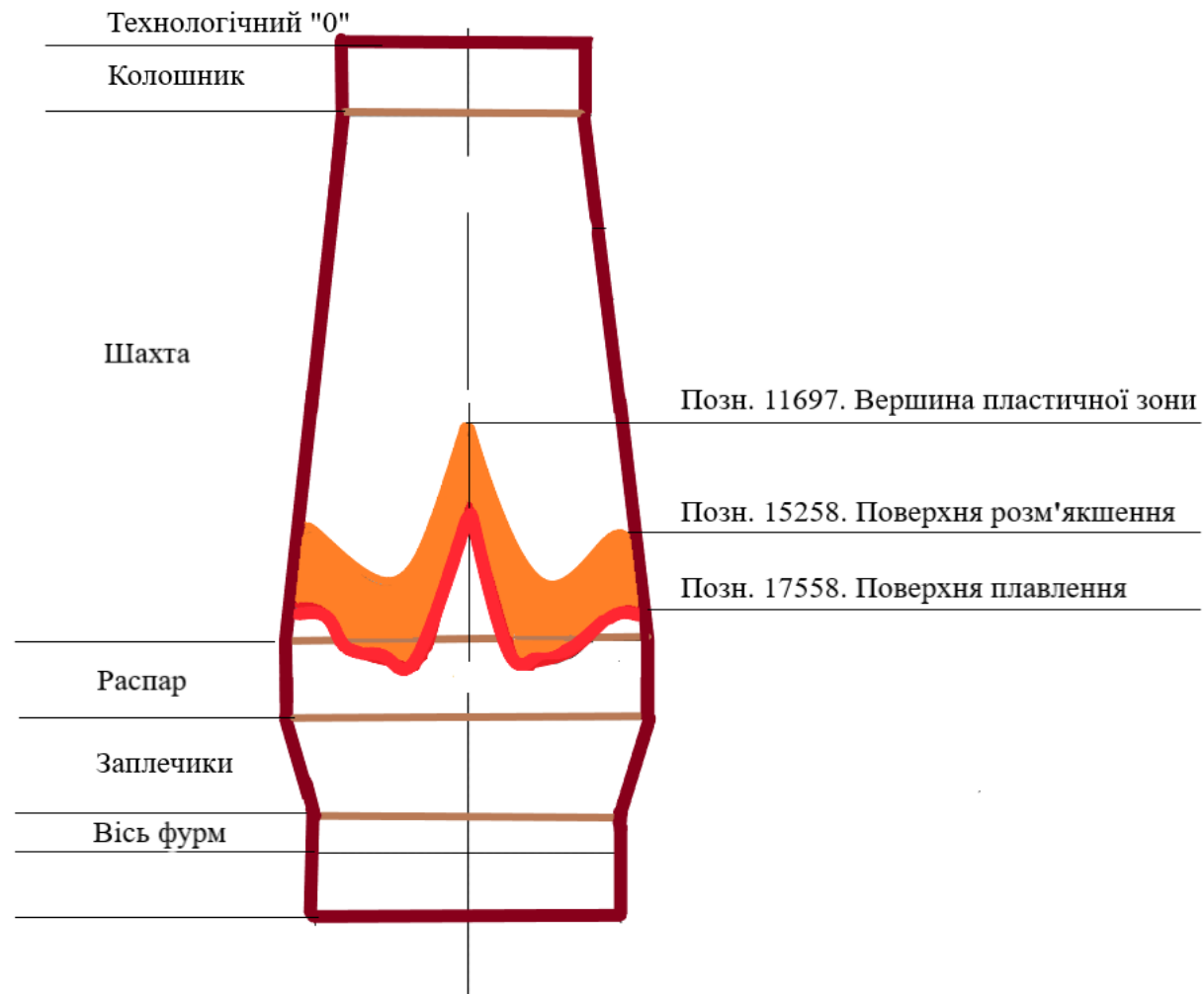


Рисунок 3.10 – Межі пластичної зони (третій період)

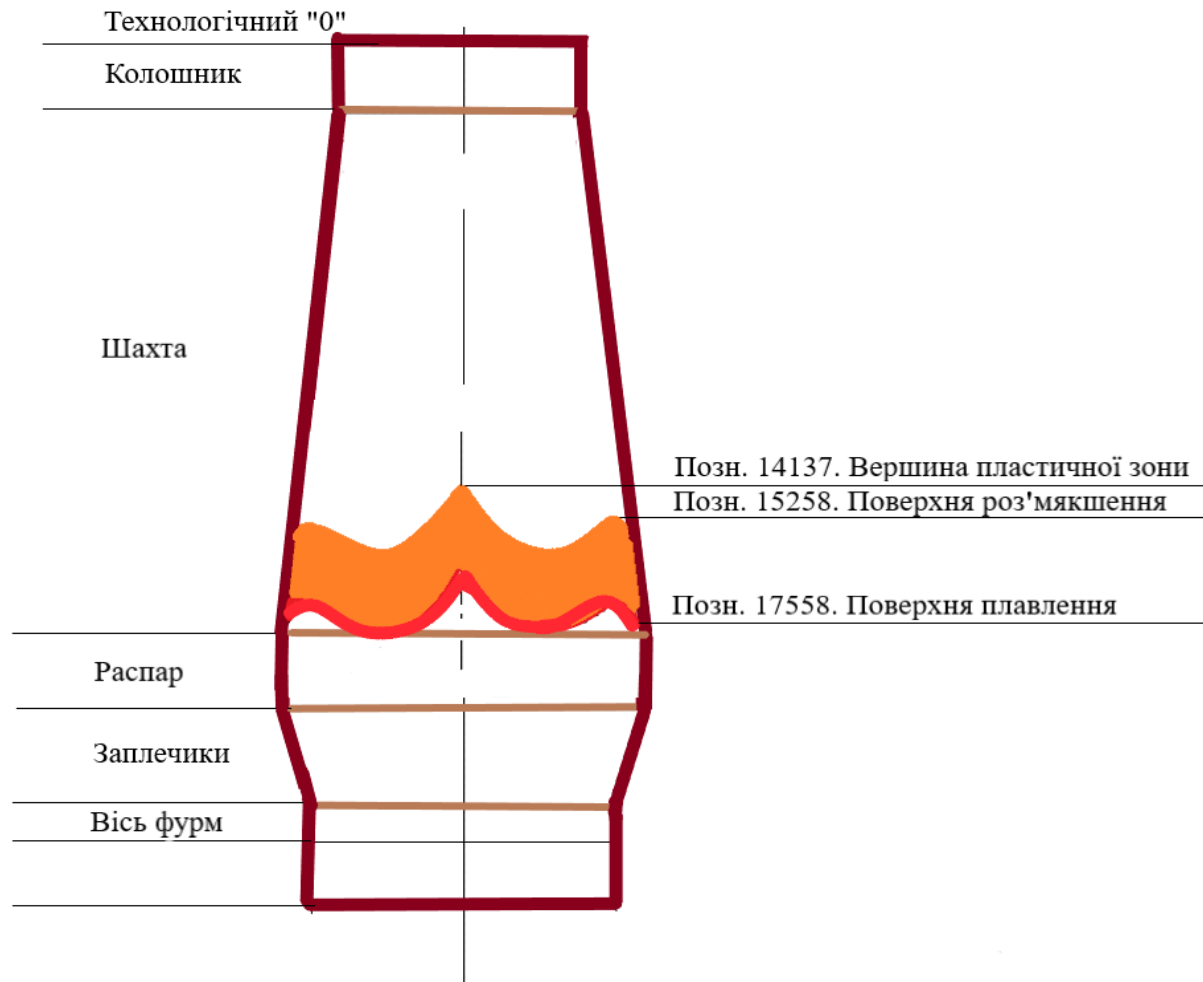


Рисунок 3.11 – Межі пластичної зони (четвертий період)

### 3.6 Факторний аналіз впливу технологічних умов доменної плавки на положення пластичної зони у доменній печі

Для підтвердження адекватності запропонованого методу визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі з використанням інформації термозондів, встановлених над поверхнею засипу шихти, виконано аналіз особливостей формування пластичної зони за різних технологічних умов плавки. Дослідження впливу на положення пластичної зони у печі різних умов плавки, що характеризуються відповідними технологічними параметрами, є багатофакторним завданням. Для виявлення найбільш інформативних та значущих показників використано багатовимірний порівняльний аналіз.

Для побудови моделі оптимальної структури використовується методика факторного аналізу [80], що дозволяє не тільки знизити розмірність початкового факторного простору, а й розкрити оптимальне групування змінних  $\{X^i\}^k$  для їх інтегральної «згортки»  $F^k$ , тобто, всі залежні між собою змінні поєднуються в один фактор. В цьому випадку вони мають максимальне навантаження на загальний для них фактор. Основна модель факторного аналізу має вигляд:

$$Z_{ij} = A_{jk} \cdot F_{ki} , \quad (3.3)$$

де

$Z_{ij}$  – матриця стандартизованих початкових змінних;

$A_{jk}$  – факторні навантаження змінної  $j$  на фактор  $k$ .

Факторна модель (3.3) зовні подібна до регресійної, але на відміну від останньої, вона відображає внутрішній стан об'єкта за допомогою факторів стану або узагальнених структур, отриманих в результаті «згортки» взаємопов'язаних параметрів.

Сформовано чотири матриці початкових даних, що включають основні технологічні параметри процесу для чотирьох періодів роботи печі, інформацію про зміну температур газу над поверхнею засипу, рудних

навантажень та товщини пластичної зони (обчислюваної як різниця температур плавлення та розм'якшення), координат точок ліній розм'якшення ( $X_{\text{розм}}$  і  $Z_{\text{розм}}$ ) та плавлення ( $X_{\text{пл}}$  і  $Z_{\text{пл}}$ ) у десяти зонах колошника. До цих чотирьох матриць було застосовано факторний аналіз з метою виявлення найбільш значимих факторів, які надають визначальний вплив, тобто, мають найбільші факторні навантаження на загальний фактор з показником положення пластичної зони в печі – координатами ліній розм'якшення та плавлення.

В результаті розрахунково-аналітичних досліджень для координати  $X_{\text{розм}}$  отримано матриці «навантажень» показників на чотири, а для координати  $Z_{\text{розм}}$  – на п'ять генеральних факторів, що відображають весь досліджуваний масив даних (табл. 3.12 та табл. 3.13).

Аналогічні дослідження виконані для координат лінії плавлення ( $X_{\text{пл}}$  і  $Z_{\text{пл}}$ ), для яких отримані матриці «навантажень», відповідно, на чотири та на п'ять генеральних факторів, що відображають весь досліджуваний масив даних (табл. 3.14 та табл. 3.15).

Таблиця 3.12 – Чисельні значення факторних навантажень параметрів та показників доменної плавки (матриця 1)

Показник	Позначення	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
Координата лінії розм'якшення	$X_{\text{роз}}$	0,15	- 0,06	0,07	0,92
Витрата коксу	K	0,14	0,91	- 0,38	0,04
Вміст кремнію в чавуні	[Si]	0,21	- 0,16	0,96	0,04
Виробництво	П	- 0,40	- 0,86	0,30	- 0,05
Витрата ПГ	$Q_{\text{ПГ}}$	0,27	0,44	0,85	0,07
Витрата ПВП	$Q_{\text{ПВП}}$	- 0,17	- 0,97	- 0,17	- 0,07
Витрата дугтя	$Q_{\text{дугтя}}$	- 0,93	0,34	- 0,13	0,01
Вміст O <sub>2</sub> у холодному дугті	$\omega_{\text{O}_2}$	- 0,23	- 0,94	0,23	- 0,05
Температура гарячого дугтя	$T_{\text{гд}}$	0,07	- 0,72	0,69	- 0,02
Теоретична температура горіння	$T_{\text{f}}$	- 0,18	- 0,98	0,10	- 0,06

Продовження таблиці 3.12

Вологість дуття	$\varphi_d$	- 0,04	0,42	- 0,91	- 0,01
Витрата пари	$Q_{\text{парі}}$	- 0,35	0,20	- 0,92	- 0,03
Температура колошникового газу	$T_{\text{кол}}$	0,94	- 0,32	- 0,11	- 0,02
Температура периферії	$T_{\text{пф}}$	- 0,25	0,96	0,03	0,07
Тиск гарячого дуття	$P_{\text{гд}}$	- 0,91	- 0,36	- 0,21	- 0,04
Сумарний перепад тиску	$\Delta P_{\text{сум}}$	- 0,94	- 0,34	0,03	- 0,027
Верхній перепад	$\Delta P_{\text{в}}$	0,71	- 0,11	0,69	0,03
Нижній перепад	$\Delta P_{\text{н}}$	- 0,95	- 0,22	- 0,21	- 0,03
Тиск під колошником	$P_{\text{к}}$	- 0,86	- 0,40	- 0,31	- 0,05
Вихід шлаку	$SH$	-0,91	0,05	- 0,41	- 0,02
Середнє рудне навантаження	$P_{\text{Нср.}}$	- 0,85	- 0,44	- 0,27	- 0,05
Товщина пластичної зони	$\Delta H_{\text{пз}}$	0,24	- 0,53	0,01	- 0,49
Рудні навантаження по радіусу колошника	$P_{\text{Ні}}$	0,01	0,07	- 0,02	0,95
Температура зонда	$T_i$	0,01	- 0,09	- 0,03	- 0,56

Аналіз впливу змінних на координату  $X_{\text{розм}}$ , що характеризує положення лінії розм'якшення у печі (верхньої межі пластичної зони), показав наступне. Перший, другий та третій фактор більшою мірою «навантажили» технологічні параметри плавки. Взаємозв'язок координати  $X_{\text{розм}}$  з технологічними параметрами плавки, зокрема, з дуттьовими параметрами простежується в результаті аналізу навантажень першого фактору. Опускаючи результати факторного аналізу взаємозв'язку технологічних параметрів плавки (який, крім того, характеризує коректність технологічних показників процесу, про що свідчать високі значення факторних навантажень), основну увагу приділимо аналізу факторних навантажень на координати лінії розм'якшення пластичної зони. Показник положення лінії розм'якшення пластичної зони у печі «навантажив» четвертий фактор ( $f_{\text{н}} = 0,92$ ). Як показав аналіз, координата  $X_{\text{розм}}$  тісно пов'язана з розподілом рудних навантажень по радіусу колошника ( $f_{\text{н}} = 0,95$ ), а також із товщиною пластичної зони ( $f_{\text{н}} = -0,49$ ).

Таблиця 3.13 – Чисельні значення факторних навантажень параметрів та показників доменної плавки (матриця 2)

Показник	Позначення	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>
Координата лінії розм'якшення	Z <sub>роз</sub>	- 0,08	0,15	- 0,20	0,10	- 0,75
Витрата коксу	K	0,13	0,92	- 0,37	0,41	- 0,02
Вміст кремнію в чавуні	[Si]	0,21	- 0,16	0,96	0,02	0,07
Виробництво	П	- 0,39	- 0,87	0,29	- 0,04	0,02
Витрата ПГ	Q <sub>ПГ</sub>	0,26	0,44	0,86	0,05	0,06
Витрата ПВП	Q <sub>ПВП</sub>	- 0,16	- 0,97	- 0,18	- 0,06	- 0,02
Витрата дуття	Q <sub>дуття</sub>	- 0,93	0,34	- 0,13	0,03	0,01
Вміст O <sub>2</sub> у холодному дутті	ω <sub>o2</sub>	- 0,22	- 0,95	0,26	- 0,05	0,01
Температура гарячого дуття	T <sub>Гд</sub>	0,08	- 0,72	0,68	- 0,02	0,04
Теоретична температура горіння	T <sub>f</sub>	- 0,17	- 0,98	0,09	- 0,52	0,01
Вологість дуття	φ <sub>д</sub>	- 0,05	0,43	- 0,91	- 0,01	- 0,06
Витрати пари	Q <sub>пари</sub>	- 0,35	0,20	- 0,91	- 0,010	- 0,06
Температура колошникового газу	T <sub>кол</sub>	0,94	- 0,31	- 0,11	- 0,03	- 0,03
Температура периферії	T <sub>пф</sub>	- 0,26	0,96	0,03	0,06	0,02
Тиск гарячого дуття	P <sub>Гд</sub>	- 0,90	- 0,37	- 0,22	- 0,02	- 0,01
Сумарний перепад тиску	ΔP <sub>сум</sub>	- 0,94	- 0,35	0,03	- 0,01	0,02
Верхній перепад	ΔP <sub>в</sub>	0,72	- 0,11	0,69	0,01	0,04
Нижній перепад	ΔP <sub>н</sub>	- 0,95	- 0,23	- 0,21	- 0,01	- 0,01
Тиск під колошником	P <sub>к</sub>	- 0,86	- 0,41	- 0,31	- 0,03	- 0,01
Вихід шлаку	SH	- 0,91	0,04	- 0,41	- 0,01	- 0,01
Середнє рудне навантаження	PН <sub>ср</sub>	- 0,85	- 0,45	- 0,27	- 0,03	- 0,01
Товщина ПЗ	ΔH <sub>пз</sub>	0,21	- 0,54	0,06	- 0,19	- 0,64
Рудні навантаження по радіусу колошника	PН <sub>і</sub>	0,04	0,09	- 0,04	0,82	0,47
Температура зонда	T <sub>і</sub>	0,01	- 0,10	- 0,08	- 0,86	0,33

Результати факторного аналізу показали наступне:

1. Перший та другий фактор більшою мірою «навантажили» технологічні параметри плавки та їх вплив на товщину пластичної зони. Для першого та другого фактору характерні факторні навантаження на цей параметр, відповідно, склали ( $f_H = 0,21$ ) та ( $f_H = -0,54$ ).

2. Значущі показники третього фактору характеризують вплив на координату  $Z_{роз}$  ( $f_H = -0,20$ ) теплового стану нижньої зони доменної печі, а саме вмісту кремнію в чавуні ( $f_H = 0,96$ ), витрати пари ( $f_H = -0,91$ ) та вологості дуття ( $f_H = -0,90$ ).

3. Значущі показники п'ятого фактору - координата  $Z_{роз}$ . ( $f_H = -0,75$ ), яка тісно пов'язана з товщиною пластичної зони ( $f_H = -0,64$ ), рудним навантаженням ( $f_H = 0,47$ ), а також з температурою газу над поверхнею засипу ( $f_H = 0,33$ ).

Таблиця 3.14 – Чисельні значення факторних навантажень параметрів та показників доменної плавки (матриця 3)

Показник	Позначення	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
Координата лінії плавлення	$X_{плав}$	- 0,03	0,08	- 0,31	0,42
Витрата коксу	K	0,16	0,90	- 0,40	0,06
Вміст кремнію в чавуні	[Si]	0,21	- 0,15	0,96	- 0,01
Виробництво	П	- 0,42	- 0,85	0,32	- 0,06
Витрата ПГ	$Q_{ПГ}$	0,28	0,45	0,84	0,03
Витрата ПВП	$Q_{ПВП}$	- 0,19	- 0,97	- 0,15	- 0,07
Витрата дуття	$Q_{дуття}$	- 0,92	0,36	- 0,13	0,04
Вміст O <sub>2</sub> у холодному дутті	$\Omega_{O_2}$	- 0,24	- 0,93	0,25	- 0,06
Температура гарячого дуття	$T_{гд}$	0,06	- 0,71	0,70	- 0,05
Теоретична температура горіння	$T_f$	- 0,19	- 0,97	0,12	- 0,07
Вологість дуття	$\varphi_d$	- 0,04	0,40	- 0,91	0,03
Витрата пари	$Q_{пари}$	- 0,35	0,19	- 0,92	0,01
Температура колошникового газу	$T_{кол}$	0,93	-0,33	- 0,11	- 0,04
Температура периферії	$T_{пф}$	- 0,23	0,97	0,01	0,08

Продовження таблиці 3.14

Тиск гарячого дуття	$P_{гд}$	- 0,91	- 0,35	- 0,20	- 0,01
Сумарний перепад тиску	$\Delta P_{сум}$	- 0,94	- 0,33	0,05	- 0,01
Верхній перепад	$\Delta P_{в}$	0,72	- 0,11	0,69	- 0,02
Нижній перепад	$\Delta P_{н}$	- 0,96	- 0,21	- 0,20	- 0,01
Тиск під колошником	$P_{к}$	- 0,87	- 0,40	- 0,30	- 0,02
Вихід шлаку	$SH$	- 0,91	0,06	- 0,40	0,02
Середнє рудне навантаження	$PH_{ср.}$	- 0,86	- 0,43	- 0,26	- 0,02
Товщина ПЗ	$\Delta H_{пз}$	0,23	- 0,56	- 0,02	- 0,36
Рудні навантаження по радіусу колошника	$PH_i$	0,02	0,09	0,04	0,91
Температура зонда	$T_i$	- 0,02	- 0,07	- 0,06	- 0,69

Для координати  $X_{пл}$  за величинами навантажень фактори умовно можна охарактеризувати наступним чином:

1. Показники першого фактору характеризують вплив дуттєвих параметрів плавки – витрати дуття ( $f_H = -0,92$ ), перепадів тиску (нижнього ( $f_H = -0,96$ ), верхнього ( $f_H = 0,71$ ) та сумарного ( $f_H = -0,94$ ) на один з параметрів пластичної зони – її товщину ( $f_H = 0,23$ ).

2. Показники другого фактору характеризують взаємозв'язок технологічних параметрів плавки – витрати ПВП ( $f_H = -0,97$ ), витрати коксу ( $f_H = 0,90$ ), виробництва ( $f_H = -0,85$ ) з товщиною пластичної зони ( $f_H = -0,56$ ).

3. Значущі показники третього фактору характеризують вплив на координату  $X_{пл}$  ( $f_H = -0,31$ ) теплового стану нижньої зони доменної печі, а саме, вмісту кремнію в чавуні ( $f_H = 0,96$ ), витрати пари ( $f_H = -0,92$ ) та вологості дуття ( $f_H = -0,91$ ).

4. Результати факторного аналізу показали, що координату  $X_{пл}$  «навантажив» четвертий фактор ( $f_H = 0,42$ ), яка тісно пов'язана з товщиною пластичної зони ( $f_H = -0,36$ ), рудним навантаженням ( $f_H = 0,91$ ), а також з температурою газу над поверхнею засипу ( $f_H = -0,69$ ).

Таблиця 3.15 – Чисельні значення факторних навантажень параметрів та показників доменної плавки (матриця 4)

Показник	Позначення	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>
Координата лінії плавлення	Z <sub>плав</sub>	0,56	- 0,54	0,49	- 0,25	- 0,27
Витрата коксу	K	0,13	0,91	- 0,38	0,07	- 0,03
Вміст кремнію в чавуні	[Si]	0,21	- 0,16	0,97	- 0,01	- 0,20
Виробництво	П	- 0,39	- 0,87	0,30	- 0,06	0,03
Витрата ПГ	Q <sub>ПГ</sub>	0,26	0,44	0,86	0,05	- 0,04
Витрата ПВП	Q <sub>ПВП</sub>	- 0,15	- 0,97	- 0,18	- 0,09	0,04
Витрата дуття	Q <sub>дуття</sub>	- 0,93	0,33	- 0,13	0,06	- 0,01
Вміст O <sub>2</sub> у холодному дутті	ω <sub>O2</sub>	- 0,22	- 0,95	0,23	- 0,08	0,03
Температура гарячого дуття	T <sub>Гд</sub>	0,08	- 0,72	0,69	- 0,06	- 0,01
Теоретична температура горіння	T <sub>f</sub>	- 0,16	- 0,98	0,10	- 0,09	0,04
Вологість дуття	φ <sub>д</sub>	- 0,05	0,42	- 0,91	0,02	0,01
Витрата пари	Q <sub>пари</sub>	- 0,34	0,19	- 0,92	0,01	0,02
Температура колошникового газу	T <sub>кол</sub>	0,95	- 0,30	- 0,11	- 0,06	0,02
Температура периферії	T <sub>пф</sub>	- 0,27	0,96	0,02	0,10	- 0,04
Тиск гарячого дуття	P <sub>Гд</sub>	- 0,90	- 0,38	- 0,22	- 0,01	0,02
Сумарний перепад тиску	ΔP <sub>сум</sub>	- 0,93	- 0,36	0,03	- 0,01	0,01
Верхній перепад	ΔP <sub>в</sub>	0,71	- 0,10	0,70	- 0,20	- 0,01
Нижній перепад	ΔP <sub>н</sub>	- 0,95	- 0,24	- 0,21	0,01	0,01
Тиск під колошником	P <sub>к</sub>	- 0,85	- 0,42	- 0,32	- 0,02	0,02
Вихід шлаку	SH	- 0,91	0,03	- 0,41	0,03	0,01
Середнє рудне навантаження	P <sub>Hср.</sub>	- 0,85	- 0,46	- 0,28	- 0,02	0,02
Товщина ПЗ	ΔH <sub>пз</sub>	0,20	- 0,48	0,01	- 0,76	- 0,28
Рудні навантаження по радіусу колошника	P <sub>H i</sub>	0,05	0,03	- 0,01	0,89	- 0,38
Температура зонда	T <sub>i</sub>	0,01	- 0,11	- 0,05	- 0,13	0,97

Результати факторного аналізу показали (табл. 3.15):

1. Координату  $Z_{\text{пл}}$  «навантажив» перший фактор ( $f_{\text{н}} = 0,56$ ). Значимі показники першого фактору характеризують вплив дугтьових параметрів плавки, а також рудного навантаження на положення лінії плавлення, що характеризується координатою  $Z_{\text{пл}}$ . Як видно з таблиці 3.15 координата  $Z_{\text{пл}}$  тісно пов'язана з витратою дуття ( $f_{\text{н}} = -0,93$ ), тиском гарячого дуття ( $f_{\text{н}} = -0,90$ ), сумарним перепадом тиску ( $f_{\text{н}} = -0,93$ ), верхнім ( $f_{\text{н}} = 0,71$ ) та нижнім ( $f_{\text{н}} = -0,95$ ) перепадами тиску, а також рудним навантаженням ( $f_{\text{н}} = -0,85$ ).

2. Значимі складові другого фактору – технологічні параметри. Результати факторного аналізу показали досить високу тісноту зв'язку, зокрема, координати  $Z_{\text{пл}}$  ( $f_{\text{н}} = -0,54$ ) з виробництвом ( $f_{\text{н}} = -0,87$ ), витратою коксу ( $f_{\text{н}} = 0,56$ ), а також витратою ПГ ( $f_{\text{н}} = 0,44$ ) та ПУТ ( $f_{\text{н}} = -0,97$ ), теоретичною температурою горіння коксу ( $f_{\text{н}} = -0,98$ ), товщиною пластичної зони ( $f_{\text{н}} = -0,48$ ).

3. Показники третього фактору характеризують взаємозв'язок положення пластичної зони, що оцінюється за координатою  $Z_{\text{пл}}$  ( $f_{\text{н}} = 0,49$ ), з тепловим станом нижньої зони доменної печі, а саме, із вмістом кремнію в чавуні ( $f_{\text{н}} = 0,97$ ), витратою пари ( $f_{\text{н}} = -0,92$ ) та вологістю дуття ( $f_{\text{н}} = -0,91$ ).

4. Показники четвертого фактору характеризують взаємозв'язок товщини пластичної зони ( $f_{\text{н}} = -0,76$ ) з рудним навантаженням ( $f_{\text{н}} = 0,89$ ) та координатою  $Z_{\text{пл}}$  ( $f_{\text{н}} = -0,25$ ).

5. Показники п'ятого фактору характеризують взаємозв'язок координати  $Z_{\text{пл}}$  ( $f_{\text{н}} = -0,27$ ) з температурами газу над поверхнею засипу ( $f_{\text{н}} = 0,97$ ), рудним навантаженням ( $f_{\text{н}} = -0,38$ ) та товщиною пластичної зони ( $f_{\text{н}} = -0,28$ ).

Результати оцінки впливу технологічних параметрів на положення пластичної зони в печі, що визначається координатами ліній розм'якшення і плавлення, дозволяють зробити висновок, що наявні зв'язки досліджених величин, що характеризуються отриманими факторними навантаженнями  $f_n$ , підтверджують обґрунтованість та достовірність визначення положення пластичної зони в доменній печі за допомогою запропонованого методу.

Правомочність розробленого методу підтверджується також наступними результатами виконаного аналізу.

1. Пластична зона у першому періоді роботи печі характеризується найбільшою висотою (що визначається від рівня осі повітряних фурм), що може бути обумовлено підвищеним вмістом окатишів у шихті в порівнянні з іншими трьома періодами роботи печі. Відомо, що окатиші мають нижчі значення температур плавлення, що призводить до збільшення висоти пластичної зони.

2. Оцінка взаємозв'язку зміни теплового навантаження на кладку шахти печі на горизонті установки термопар, що вимірюють температуру кладки шахти, з положенням пластичної зони показала, що при зменшенні її висоти (від осі повітряних фурм), що характерно для четвертого періоду роботи печі, температура кладки шахти зменшується. Це пояснюється зменшенням площі поверхні, яка передає тепло в шахту печі, що призводить до зменшення його питомих теплових навантажень на стінку печі.

3. При збільшенні об'єму сухої зони, що характерно для четвертого періоду роботи печі, рівень використання монооксиду вуглецю  $\eta_{CO}$  незначно зростає до величини 40,4% в порівнянні з його значенням, що змінюється в діапазоні 39 - 40,0% в інших досліджуваних періодах.

4. Відомо, що зменшення рудного навантаження в осі печі призводить до підйому вершини пластичної зони. Як впливає з аналізу результатів визначення положення пластичної зони для чотирьох періодів роботи печі, у перших двох періодах пластична зона характеризується найбільшим підйомом її вершини. При цьому значення рудного навантаження в осі печі в цих

періодах становило 0,351 од., для інших періодів значення цього параметра досягало 0,82 од., що могло з'явитися одним з факторів, що викликають підйом вершини ПЗ.

5. Відомо, що при використанні у технології доменної плавки пиловугільного палива (ПВП) збільшується теоретична температура горіння коксу, внаслідок чого пластична зона опускається в область більш високих температур. Цей постулат підтверджується результатами визначення пластичної зони для чотирьох періодів роботи печі. З аналізу рис. 3.9 – 3.12 випливає, що саме у четвертому періоді роботи печі з ПВП, порівняно з рештою періодів, пластична зона розташована ближче до фурменого вогнища, тобто, в області високих температур. Крім того, із розрахунків сумарної кількості тепла в нижній зоні печі випливає, що для цього періоду (четвертого) характерне максимальне його значення.

### **Висновки до розділу 3**

1. Виконано аналіз технологічних показників роботи доменної печі у чотирьох дослідних періодах, які відрізняються технологічними умовами плавки, зокрема використанням різних видів паливних добавок:

- робота без паливних добавок у дутті;
- з природним газом у дутті;
- з природним газом та пиловугільним паливом;
- з пиловугільним паливом.

2. Вибір базових режимів здійснено шляхом визначення найбільш економічного та стабільного інтервалу роботи доменної печі в межах кожного із чотирьох досліджуваних періодів за допомогою запропонованого показника ефективності плавки ( $\epsilon$ ).

3. На основі розрахунку показників розподілу мас та хімічного складу компонентів шихти в кільцевих зонах колошника з використанням комплексної математичної моделі при роботі печі у чотирьох досліджуваних періодах за допомогою моделей прогнозування високотемпературних

властивостей залізовмісних матеріалів визначені температури початку їх розм'якшення та плавлення.

4. Виконані розрахункові дослідження щодо визначення загального тепла, яке утворюється в нижній частині доменної печі, та площі поверхні плавлення в доменній печі для чотирьох досліджуваних періодів її роботи.

5. За допомогою запропонованого способу визначені координати положення ліній розм'якшення та плавлення в доменній печі та виконано візуалізацію розрахованих меж пластичної зони в умовах роботи доменної печі у чотирьох періодах, що досліджуються.

6. Для підтвердження адекватності запропонованого методу визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі, оснащених термовимірювальними зондами над поверхнею засипу шихти, виконано факторний аналіз впливу технологічних умов доменної плавки на положення пластичної зони. Результати оцінки впливу технологічних параметрів на положення пластичної зони в печі, що визначається координатами ліній розм'якшення і плавлення, дозволяють зробити висновок, що наявні зв'язки досліджених величин, які характеризуються отриманими факторними навантаженнями  $f_n$ , підтверджують обґрунтованість та достовірність визначення положення пластичної зони в доменній печі за допомогою запропонованого методу.

7. Правомочність розробленого методу підтверджена також результатами аналізу технологічних особливостей формування пластичної зони за різних технологічних умов плавки.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА КРИТЕРІЮ ОЦІНКИ ФОРМИ І ПОЛОЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ, ЯКА ОСНАЩЕНА ЗАСОБАМИ КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗПОДІЛУ ГАЗОВОГО ПОТОКУ

Як показано у першому розділі, основними параметрами, що характеризують пластичну зону, є її конфігурація, товщина та положення в об'ємі доменної печі. Перелічені параметри обрані у якості аргументів критерію оцінки форми і положення пластичної зони ( $K_{CZ}$ ). Раніше нами запропоновано критерій оцінки форми та положення пластичної зони в доменній печі, заснований на інформації про конфігурацію поверхні засипу шихти та її зміну в часі, за результатами безперервного контролю профілю поверхні шихти в доменній печі стаціонарною системою контролю [42]. В даний час найбільш доступними, надійними і широко поширеними в практиці засобами контролю характеристик розподілу шихти і газового потоку у колошниковому просторі є пристрої контролю температури газового потоку в різних точках поперечного перерізу печі, виконані у вигляді вимірювальних балок з датчиками температури, що встановлюються над поверхнею засипу. Подібні пристрої забезпечують вимірювання температури газу в рівномірно розподілених 8-20 і більше точках по радіусу колошника, або в точках, відповідних положенню середніх ліній рівних за площею кільцевих зон. Крім цього, останніми роками на доменних печах впроваджуються системи, що ґрунтуються на визначенні температур газового потоку за результатами вимірювання швидкості звуку в газовому середовищі та її змін залежно від температури газу. Таким чином, удосконалення критерію оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі з урахуванням тенденцій зміни складу та можливостей засобів контролю розподілу характеристик шихти та газового потоку є дуже актуальним завданням.

Ґрунтуючись на відомих уявленнях про параметри, що визначають форму та положення пластичної зони у доменній печі, а також результатах кореляційного аналізу зв'язків цих параметрів з технологічними показниками плавки, складено комплекси, що є аргументами критерію оцінки пластичної зони.

Перший аргумент критерію  $X_1$  включає суму відносин товщини пластичної зони у суміжних кільцевих зонах ( $\Delta H_{czi}$  та  $\Delta H_{czi+1}$ , м, де  $i$  – номер кільцевої зони), оцінюваної по різниці температур плавлення та розм'якшення залізовмісних матеріалів у цих зонах, і відношення максимального значення товщини пластичної зони в кільцевих зонах до мінімального. Представлений таким чином аргумент відображає конфігурацію ліній розм'якшення та плавлення в контрольованих перерізах та по всій їх довжині в цілому. Аргумент може бути представлений виразом:

$$X_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta H_{czi+1}}{\Delta H_{czi}} + \frac{\max(\Delta H_{czi})}{\min(\Delta H_{czi})}, \quad (4.1)$$

де

$\Delta H_{czi}$  – товщина пластичної зони в  $i$  – й кільцевій зоні колошника, м;

$n$  – кількість кільцевих зон.

Другий аргумент критерію, який характеризує відносне положення кореня пластичної зони, згідно із запропонованим методом визначення форми та положення пластичної зони, визначається в зоні максимального рівня показань термопар вогнетривкої кладки шахти печі:

$$X_2 = T_{ш \max} \quad (4.2)$$

Третій аргумент критерію – площа поверхні плавлення:

$$X_3 = A \quad (4.3)$$

Спочатку при розробці критерію виконується процедура нормування та приведення аргументів до нормального закону розподілу:

$$X_i = \frac{x_i - m_{x_i}}{3 \cdot \sigma_{x_i}}, \quad (4.4)$$

де  $m_{x_i}$ ,  $\sigma_{x_i}$  - середнє значення та середньоквадратичне відхилення показника  $x_i$ .

Далі проводиться логіт-перетворення кожного аргументу критерію, що розробляється –  $X_{1...3}$ . В результаті логіт-перетворення значення вихідної величини приводиться до діапазону 0...1.

Для виконання логіт-перетворення використовується рівняння:

$$F(X_i) = \frac{1}{1 + \exp(0 - X_i)} \quad (4.5)$$

В результаті наступного логіт-перетворення кожного аргументу  $X_{1...3}$  критерій пластичної зони набуде вигляду:

$$K_{cz} = (F(X_1) \cdot F(X_2) \cdot F(X_3))^{\frac{1}{3}} \quad (4.6)$$

Для чотирьох досліджуваних періодів виконано розрахункові дослідження, в результаті яких визначено середньодобові значення критерію оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі (таблиця 4.1). Встановлено, що у досліджених періодах критерій  $K_{cz}$  змінювався у наступних діапазонах: у першому періоді - 0,539 ÷ 0,723; у другому - 0,428 ÷ 0,608; в третьому - 0,368 ÷ 0,665; у четвертому 0,376 ÷ 0,650. Середні у кожному із чотирьох періодів значення критерію склали: у першому 0,62, для трьох інших –  $\approx 0,5$ .

Близькі значення критерію  $K_{cz}$  у трьох дослідницьких періодах роботи печі свідчать про те, що в умовах застосування різних технологій доменної плавки з використанням різних видів паливних добавок (як це було показано при аналізі особливостей цих періодів), була сформована пластична зона, що дозволяє забезпечити стабільність параметрів процесу плавки та задовільні техніко - економічні показники.

Відсутність технологічних параметрів у складі розробленого критерію дозволяє підтвердити достовірність оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі шляхом аналізу та встановлення його зв'язків з основними технологічними параметрами процесу плавлення.

Таблиця 4.1 - Значення критерію оцінки форми та положення пластичної зони ( $K_{cz}$ ) у дослідницьких періодах

Доба	Дослідницькі періоди			
	1	2	3	4
	Значення $K_{cz}$			
1	0,595264	0,554273	0,664814	0,394718
2	0,591629	0,588125	0,514924	0,448586
3	0,641957	0,509647	0,616452	0,44987
4	0,606946	0,42755	0,574765	0,474955
5	0,555383	0,449993	0,50776	0,376747
6	0,538774	0,476913	0,480339	0,458592
7	0,542617	0,482198	0,604733	0,494932
8	0,589841	0,464461	0,5923	0,482797
9	0,592372	0,491201	0,553908	0,376289
10	0,554271	0,437237	0,527785	0,455153
11	0,580349	0,449946	0,466259	0,499921
12	0,558306	0,457345	0,393831	0,528938
13	0,703116	0,572691	0,404794	0,593418
14	0,673325	0,530372	0,367978	0,586539
15	0,597134	0,607671	0,455598	0,524343
16	0,672666	0,475869	0,50006	0,620319
17	0,631048	0,428845	0,403362	0,562419
18	0,67591	0,430081	0,374431	0,484375
19	0,723322	0,447543	0,490342	0,581403
20	0,675759	0,438125	0,543461	0,649374
21	0,639334	0,444474	0,49988	0,580103
22	0,639477	0,489195	0,503818	0,649658
23	0,650621	0,546575	0,453645	0,513034
24	0,623401	0,496371	0,45414	0,525152
25	0,616747	0,478823	0,482175	0,537507
26	0,661305	0,576588	0,497716	0,567765
27	0,659934	0,474731	0,531591	0,562164
28	0,671931	0,554914		0,494341
29	0,58007	0,561385		0,428115
30	0,644481	0,521875		0,467473
32		0,463192		0,496458
33		0,538484		0,46417
34				0,487989
35				0,460682
36				0,414859
37				0,393337
38				0,443893
39				0,457801
40				0,436782

Попередня оцінка зв'язків критерію з рядом основних технологічних параметрів показала, що критерій  $K_{CZ}$  має досить тісний зв'язок із виробництвом чавуну ( $r_{xy} = -0,55$ ), витратою умовного палива ( $r_{xy} = 0,6$ ), теоретичною температурою горіння коксу ( $r_{xy} = 0,45$ ) та витратою дуття ( $r_{xy} = 0,5$ ).

Виявлені зв'язки критерію  $K_{CZ}$  з основними технологічними параметрами процесу плавки є підтвердженням адекватності критерію та можливості його використання для оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі.

Виконані розрахункові дослідження дозволяють зробити висновок, що запропонований критерій може бути використаний для оцінки раціональності форми та положення пластичної зони доменної печі в технологічних умовах плавки, що склалися.

Доцільним у подальших дослідження є визначення оптимальних значень критерію для умов конкретного об'єкта (завданнями цієї роботи така задача не вирішувалася), які забезпечують виконання заданих цільових функцій (максимальне виробництво чавуну, мінімальний витрата палива). Подальший контроль поточних значень критерію та зіставлення їх з оптимальними стане обґрунтуванням необхідності коригування параметрів пластичної зони шляхом зміни параметрів режиму завантаження шихти в доменну піч.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Розроблено критерій оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі, оснащій термовимірювальними зондами над поверхнею засипу шихти.

2. Для чотирьох періодів роботи доменної печі виконано розрахункові дослідження, в результаті яких визначено середньодобові значення критерію оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі та встановлено, що близькі значення критерію  $K_{CZ}$  у трьох дослідницьких періодах роботи печі свідчать про те, що в умовах застосування різних технологій доменної плавки

з використанням різних видів паливних добавок, була сформована пластична зона, що дозволяє забезпечити стабільність параметрів процесу плавки та задовільні техніко - економічні показники.

3. Відсутність технологічних параметрів у складі розробленого критерію дозволила підтвердити достовірність оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі шляхом аналізу та встановлення його зв'язків з основними технологічними параметрами процесу плавлення. Виконані дослідження показали, що критерій  $K_{CZ}$  має досить тісний зв'язок, з рядом основних технологічних параметрів, а саме: з виробництвом чавуну ( $r_{xy} = -0,55$ ), витратою умовного палива ( $r_{xy} = 0,6$ ), теоретичною температурою горіння коксу ( $r_{xy} = 0,45$ ) та витратою дуття ( $r_{xy} = 0,5$ ).

4. За результатами виконаних розрахункових досліджень зроблено висновок, що запропонований критерій може бути використаний для оцінки раціональності форми та положення пластичної зони доменної печі у змінних технологічних умовах плавки.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБКА СПОСОБУ ОБҐРУНТОВАНОГО КОРИГУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШИХТИ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

Результати численних досліджень (як це показано у першому розділі) підтверджують важливу роль режиму завантаження доменної печі у формуванні пластичної зони та вплив параметрів режиму завантаження на її характеристики. Встановлено, що режим завантаження визначає величину площі поверхні плавлення залізородних матеріалів (нижньої поверхні пластичної зони) та товщину коксових вікон, які забезпечують газопроникність стовпу шихти в печі.

Разом з тим, отримані результати у багатьох випадках не є однозначними та визначають необхідність обґрунтування і розробки технологічних положень корегування характеристик пластичної зони шляхом зміни параметрів режиму завантаження з метою досягнення високих техніко-економічних показників та урахуванням специфіки роботи конкретної доменної печі.

У даному розділі наведені результати досліджень зв'язків параметрів пластичної зони з характеристиками розподілу шихтових матеріалів за радіусом колошника.

Як вказувалося вище, пристрої та системи контролю температури газового потоку або поверхні засипу у заданих точках по радіусу/площі колошника, в даний час є одними з найбільш поширених у практиці засобів, що використовуються для оцінки розподілу шихтових матеріалів у робочому просторі доменної печі. Згідно з даними досліджень, які виконані на доменній печі, оснащеної БЗП та термовимірювальними зондами (балками), коефіцієнт кореляції величини рудного навантаження у конкретній кільцевій зоні колошнику з температурою газового потоку у цій зоні перевищує 0,9 (рис. 5.1).

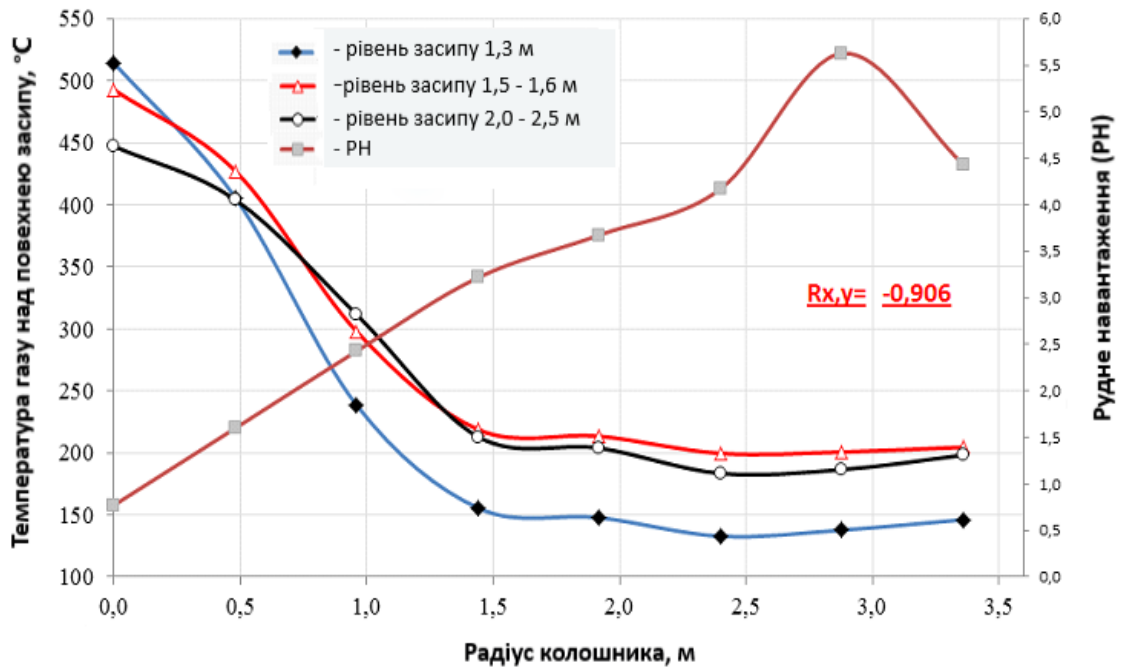


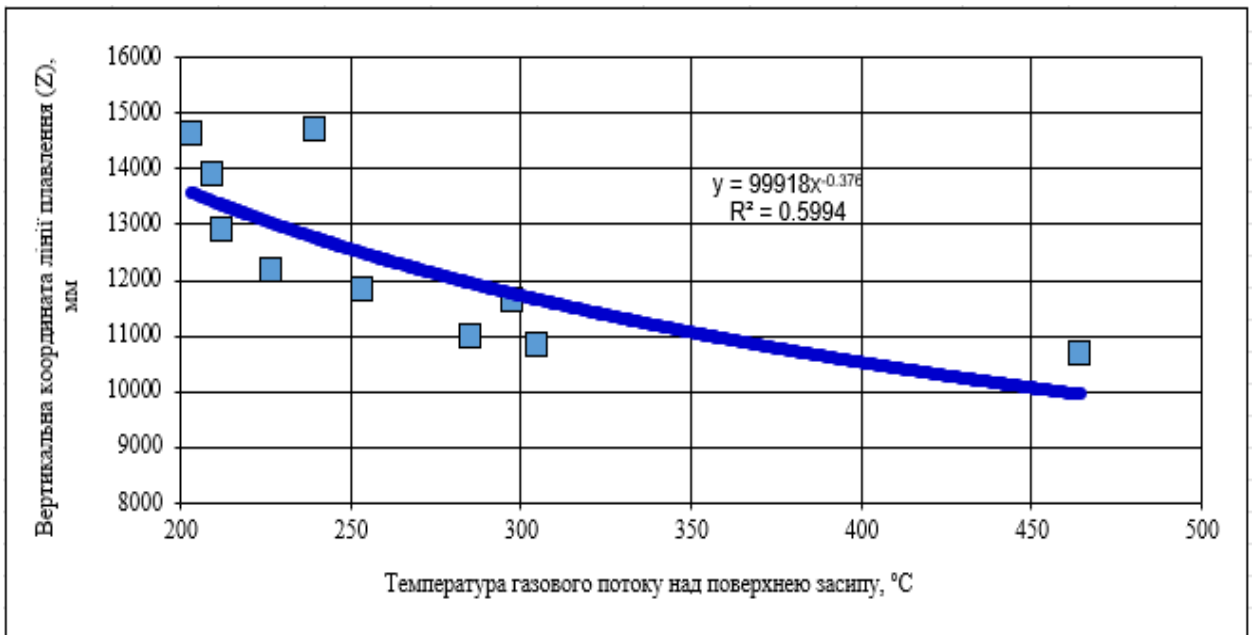
Рисунок 5.1 – Зв'язок температури газу над поверхнею засипу шихти з величиною рудного навантаження у кільцевих зонах колошника

У практиці розподіл температури газового потоку за радіусом колошника використовується технологіями для наближеної (інтуїтивної) оцінки форми пластичної зони. Запропонований новий метод визначення положення та параметрів пластичної зони базується на використанні вказаного взаємозв'язку з обґрунтуванням взаємозв'язків рудного навантаження та інших характеристик розподілу шихтових матеріалів з геометричними параметрами пластичної зони. Обґрунтованість цього підходу підтверджена результатами досліджень роботи однієї з доменних печей України у періоди з різними технологічними умовами.

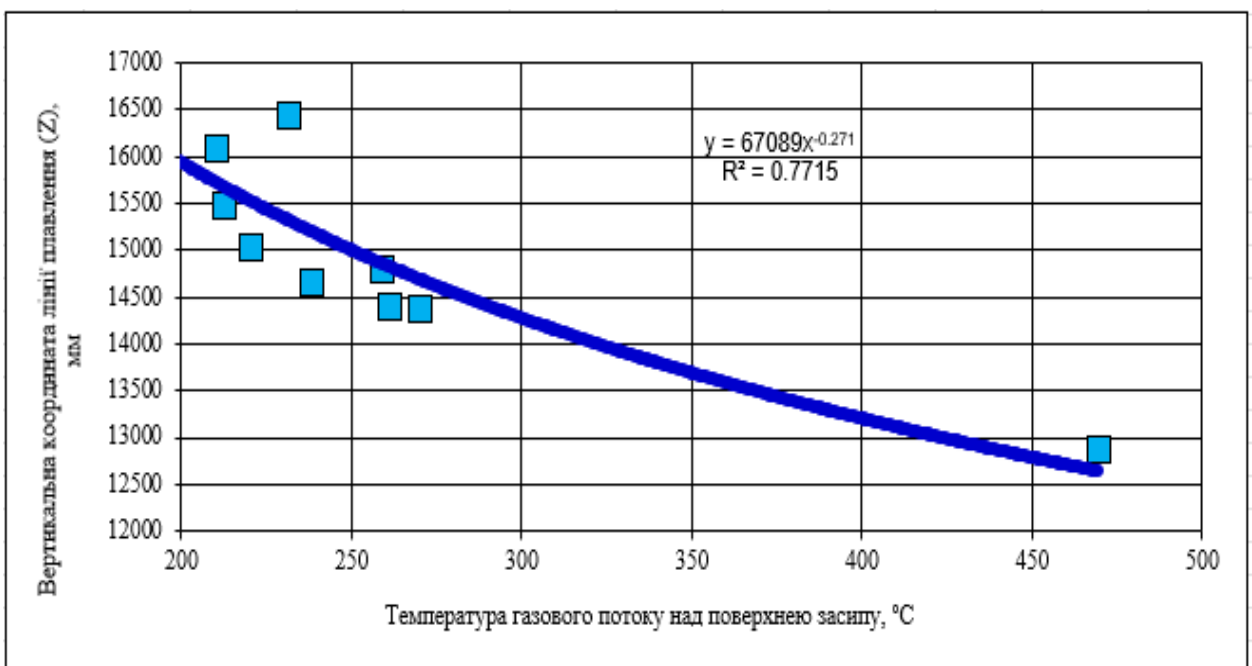
Пластична зона обмежена поверхнями розм'якшення та плавлення, у двомірному відображенні - відповідними лініями. Оскільки у роботі пластична зона розглядається, як її проекція на вертикальну площину, яка проходить через вісь доменної печі, то геометричні розміри зони визначаються лініями розм'якшення та плавлення.

Ґрунтуючись на отриманих результатах визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі у чотирьох періодах її роботи за допомогою запропонованого методу, виконані дослідження з встановлення взаємозв'язків параметрів пластичної зони з температурою газу над поверхнею засипу шихти.

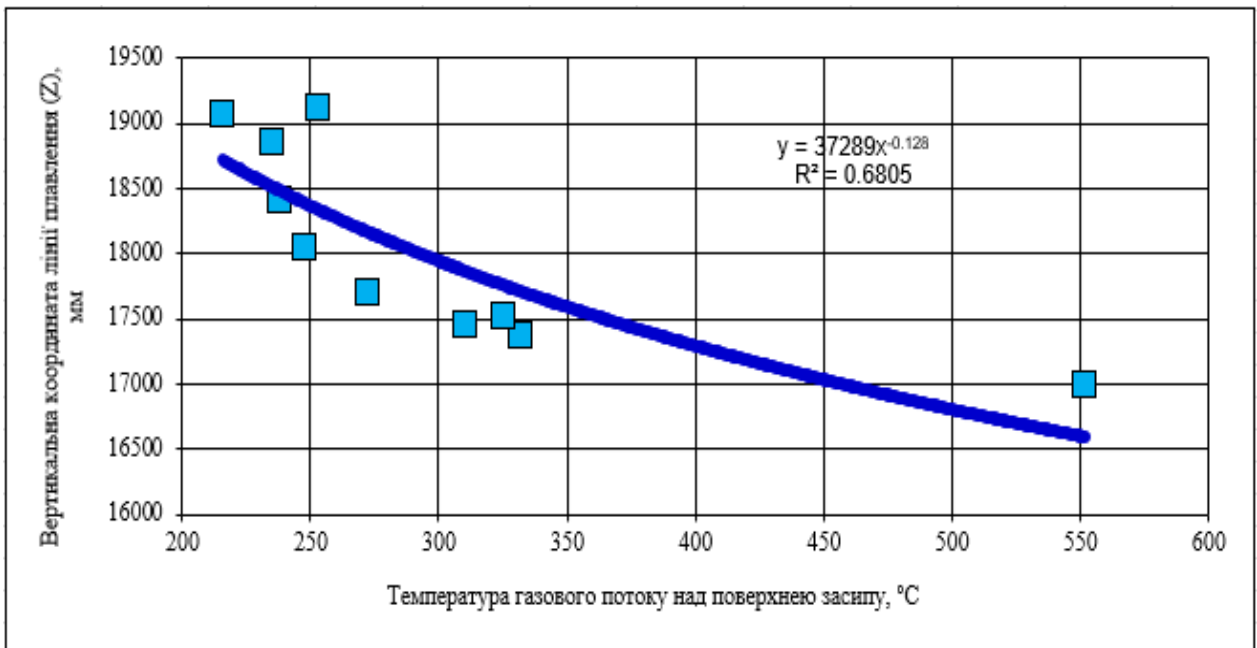
На рис. 5.2 та рис. 5.3 наведені виявлені взаємозв'язки вертикальних координат точок лінії плавлення з температурою газу над поверхнею засипу та рудним навантаженням у рівних за площею кільцевих зонах доменної печі, відповідно.



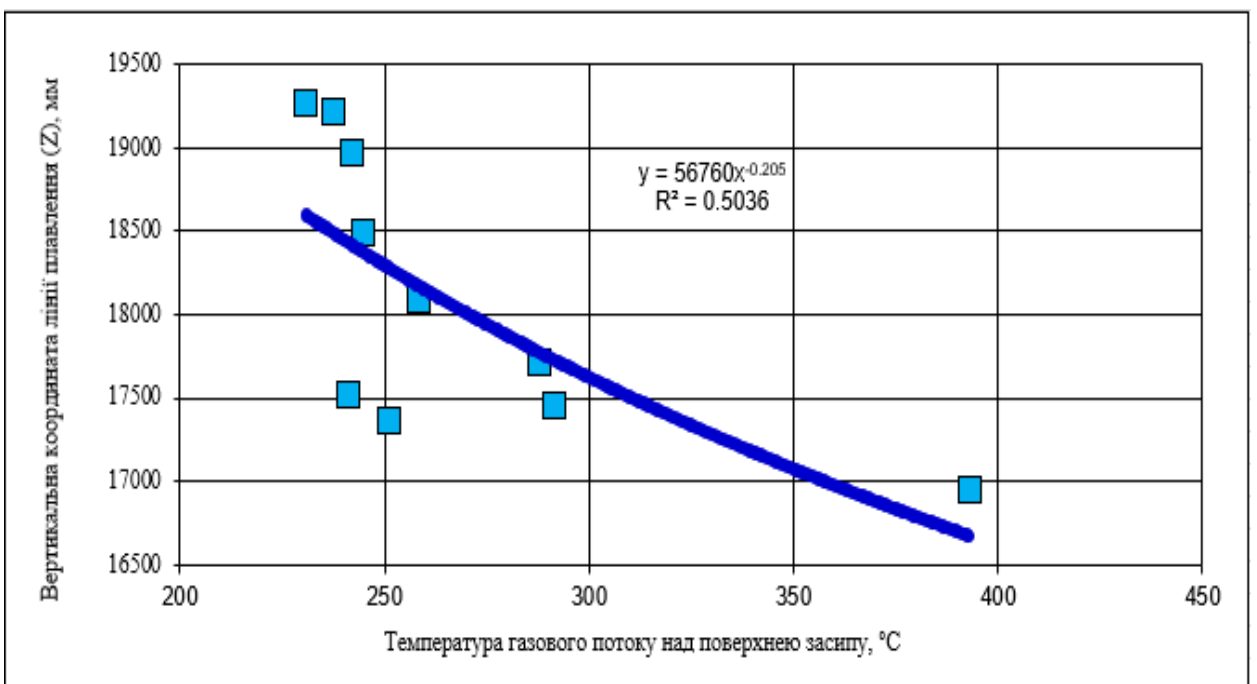
а)



б)

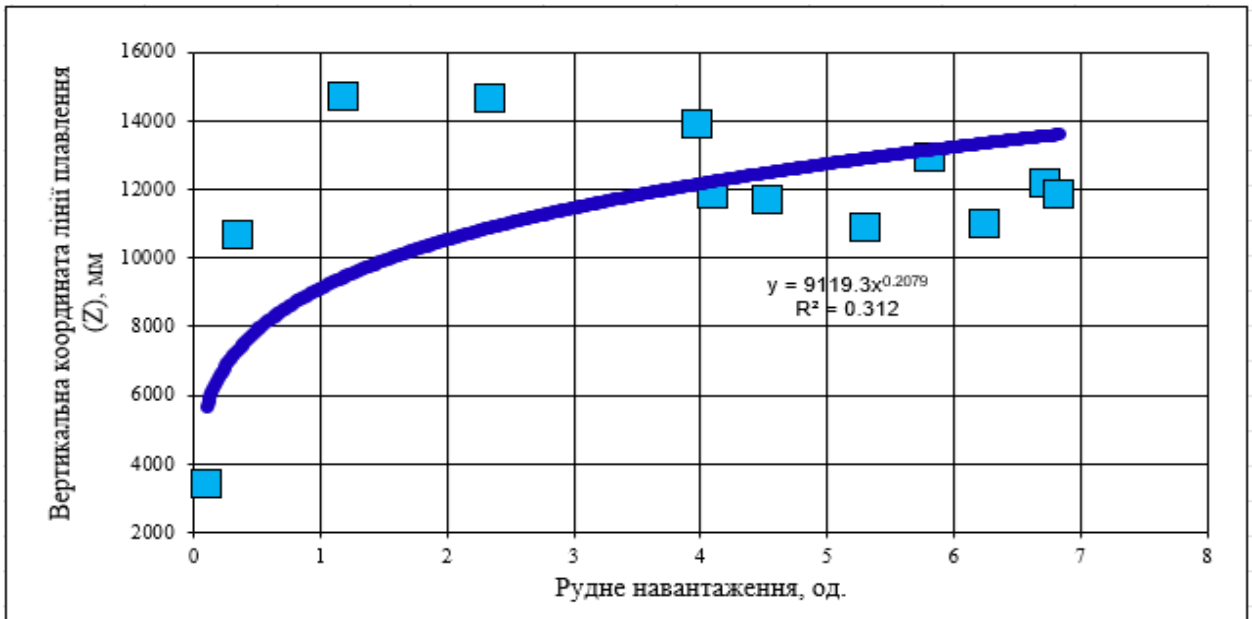


в)

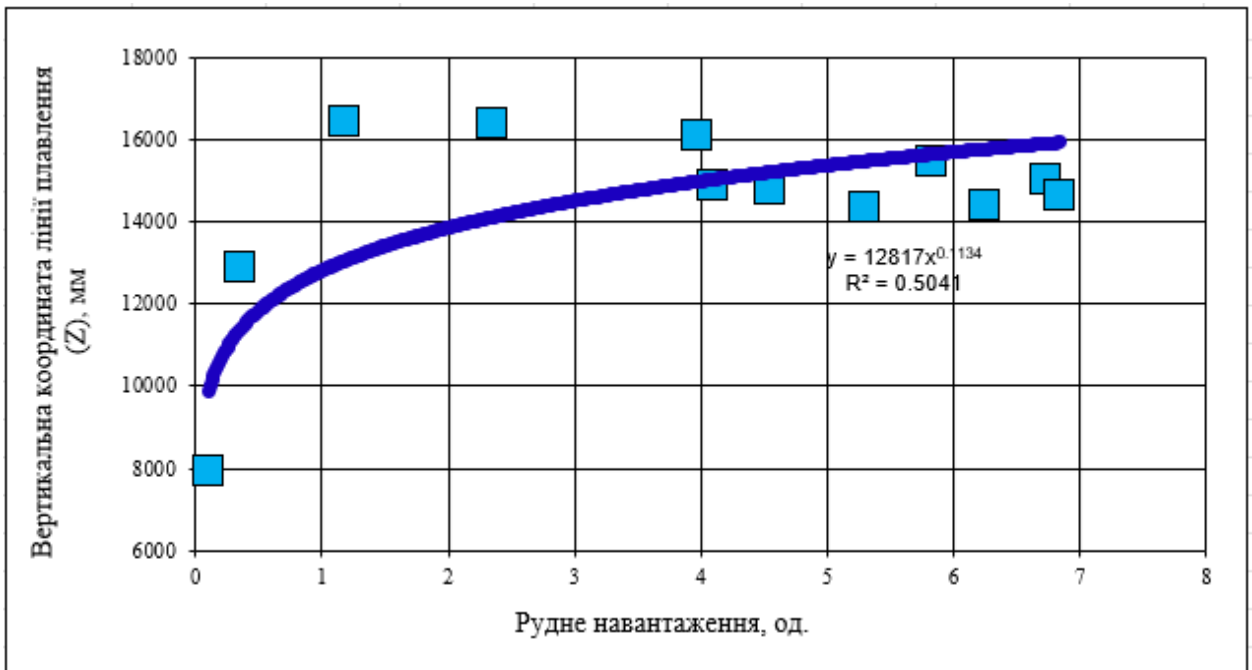


г)

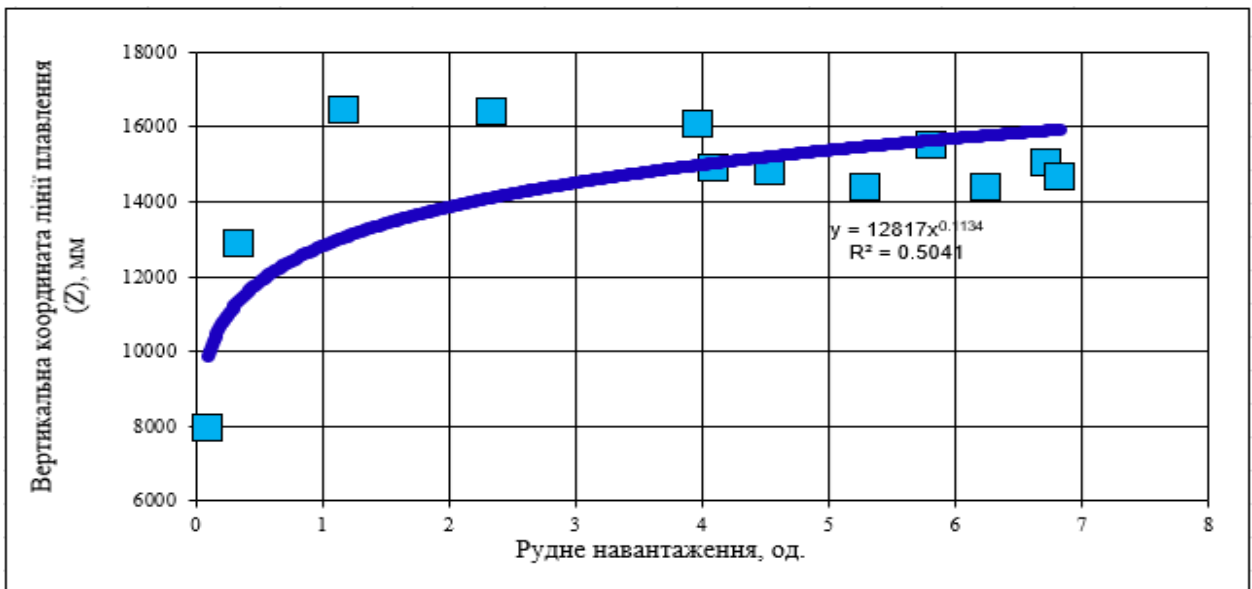
Рисунок 5.2 – Зв'язок вертикальної координати лінії плавлення (z) у кільцевій зоні доменної печі з температурою газу над поверхнею засипу у цій зоні (а – г – дослідницькі періоди 1 – 4)



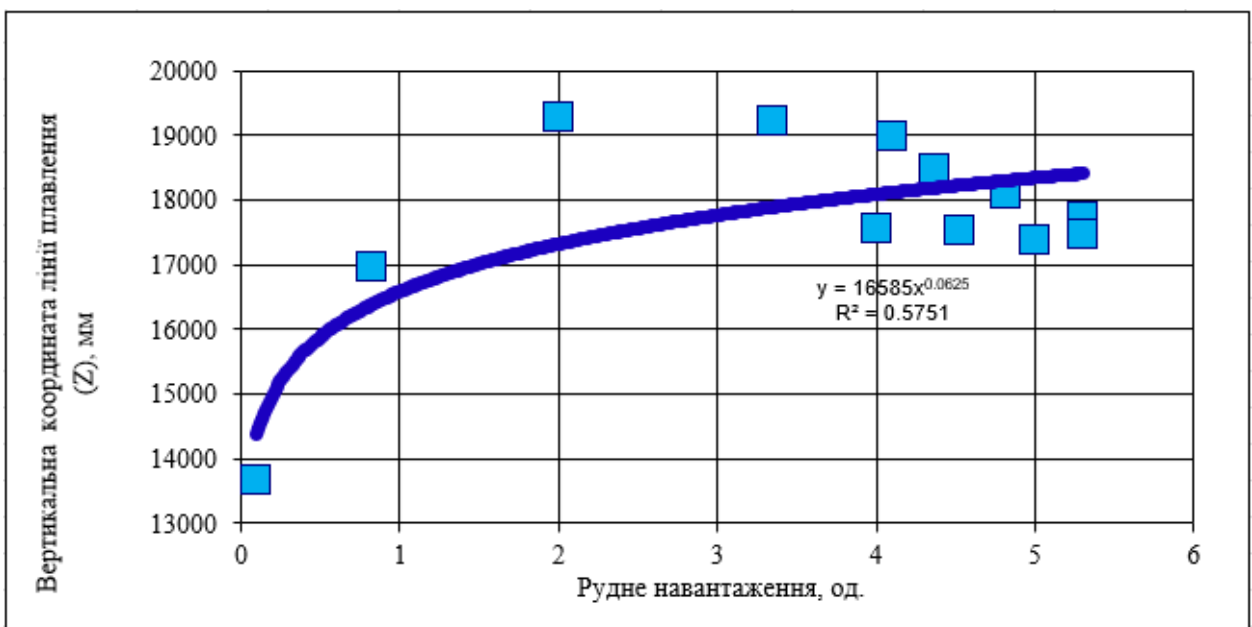
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.3 – Зв'язок вертикальної координати лінії плавлення (z) у кільцевій зоні доменної печі з рудним навантаженням у цій зоні (а – г – дослідницькі періоди 1 – 4)

Як видно з рис. 5.2 зв'язок вертикальної координати лінії плавлення у кільцевій зоні доменної печі з температурою газу над поверхнею засипу у цій зоні характеризується досить високим значенням коефіцієнта достовірності апроксимації, який знаходиться в діапазоні 0,5 – 0,77. Зв'язок вертикальної координати лінії плавлення z з рудним навантаженням (рис. 5.3)

характеризується значенням коефіцієнта достовірності апроксимації, який у переважній більшості випадків приймає значення 0,5 - 0,58.

Показані на рис. 5.2 та рис. 5.3 результати безперечно свідчать про можливість розробки та використання методів контролю положення та форми пластичної зони з використанням даних термовимірювальних зондів, а також про можливість корегування параметрів цієї зони шляхом зміни розподілу рудного навантаження по радіусу колошника доменної печі.

Основними характеристиками пластичної зони, які мають істотний вплив на продуктивність та інші показники роботи доменної печі, прийнято вважати її форму, положення у печі та товщину. На даний час загальноприйняті достатньо суворі у математичному відношенні визначення форми пластичної зони не розроблені.

З відомих робіт у цьому напрямку можливо відзначити ряд публікацій, де викладені найбільш повні (хоча й недостатньо універсальні) результати вирішення даної задачі [75, 81]. У зв'язку з цим, у повсякденній практиці технологи при наявності відповідних систем контролю та математичних моделей на доменній печі вдаються до візуальної оцінки раціональності форми пластичної зони, виходячи з власного об'єму знань та технологічного досвіду. Прийнято вважати кращою  $\Lambda$ -подібну форму пластичної зони, однак, як свідчить технологічна практика, це положення не може бути поширене на безліч варіантів технологічних умов роботи доменних печей. Це підтверджується результатами раніше виконаних та власних досліджень: неодноразово відмічені випадки високоефективної роботи доменних печей з формою пластичної зони, яка відрізняється від  $\Lambda$ -подібної. З цього можливо зробити висновок, що форма пластичної зони не може бути використана для оцінки рівня раціональності режиму плавки, без урахування інших показників.

Для комплексної оцінки рівня раціональності пластичної зони та відповідності її параметрів технологічним умовам плавки у роботі розроблено критерій оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі. Цей

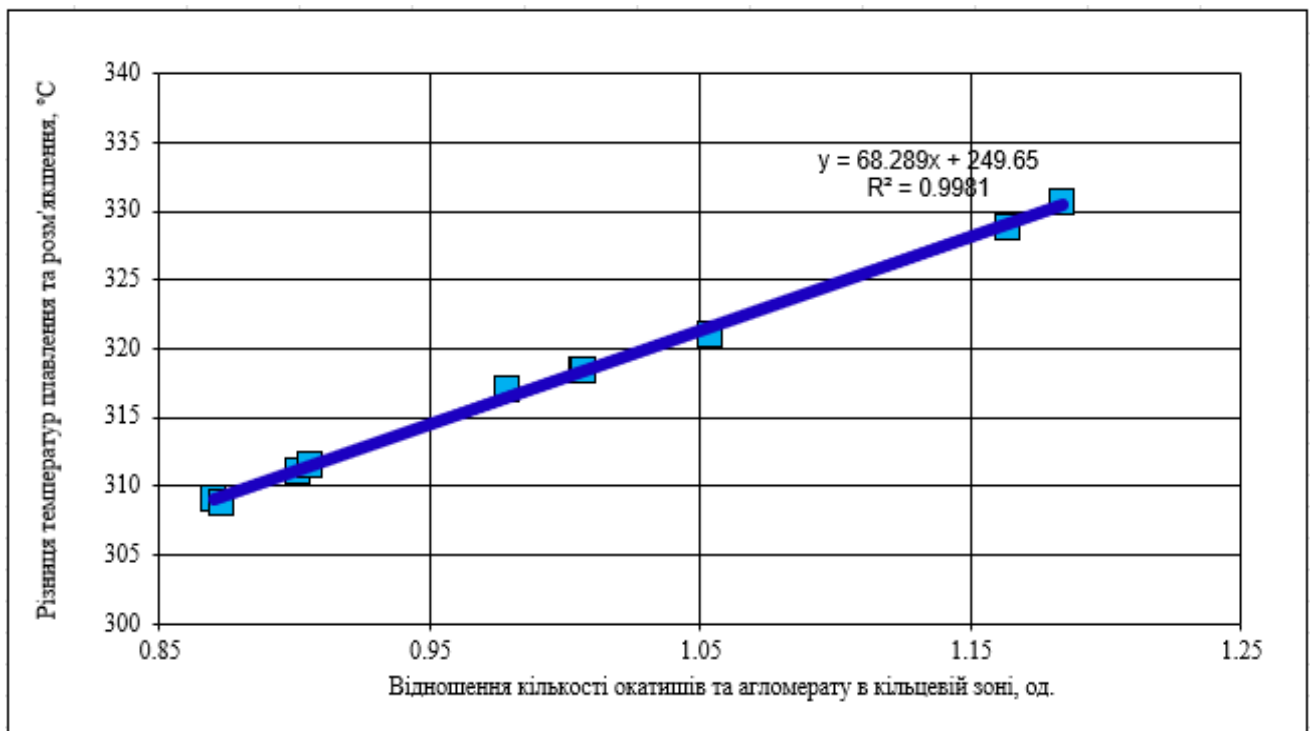
критерій може використовуватися, як інструмент, для визначення необхідності корегування параметрів пластичної зони в цілому.

Обмежуючі пластичну зону лінії розм'якшення та плавлення визначаються відповідними температурами. В умовах завантаження доменної печі багатокомпонентною шихтою температури розм'якшення та плавлення шихтових матеріалів у конкретній кільцевій зоні визначаються складом суміші матеріалів у цій зоні та їх індивідуальними високотемпературними властивостями.

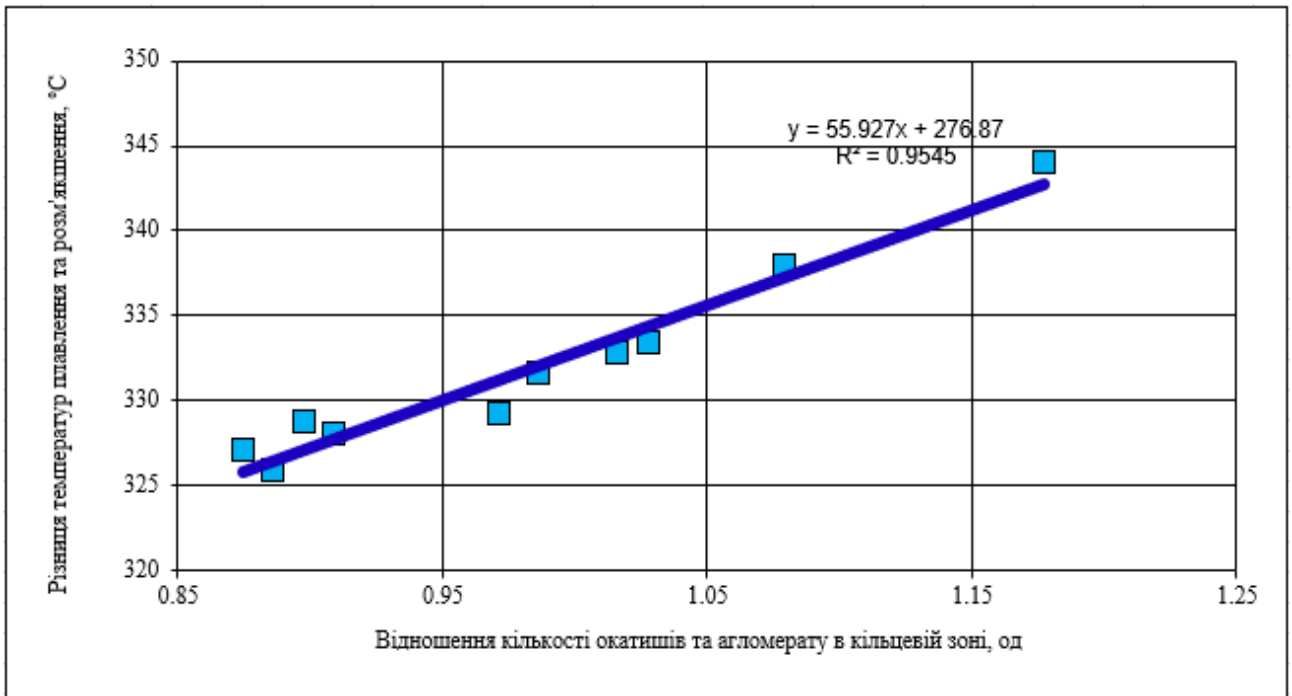
В ІЧМ постійно проводяться комплексні лабораторні та аналітичні дослідження високотемпературних властивостей та особливостей формування рідких фаз сумішей шихтових матеріалів різного складу. Отримані результати, у сукупності з результатами моделювання розподілу компонентів шихти за допомогою комплексної математичної моделі, забезпечують можливість прогнозу особливостей поведінки сумішей шихтових матеріалів при відновлювально - теплової обробці та властивостей утворених розплавів в зоні доменної печі, що розглядається. Аналіз характеристик та властивостей розплавів, що формуються у різних зонах робочого простору доменної печі, дозволив виявити взаємозв'язки характеристик розподілу шихтових матеріалів з параметрами пластичної зони, що дозволило обґрунтувати та сформулювати основні положення управління ними шляхом направленою корегування режиму завантаження. Для обґрунтованого вибору управляючого впливу це особливо важливо з урахуванням багатократно підтверджених дослідженнями ІЧМ відмінностей високотемпературних властивостей сумішей та їх складових. Температури розм'якшення та плавлення суміші залізорудних і добавок не являються середньозваженим наслідком відомих високотемпературних властивостей компонентів - складових суміші. Взаємодія компонентів при високотемпературній обробці та під час розвитку відновлювальних процесів призводить до того, що суміш компонентів шихти з відомими високотемпературними властивостями проявляє себе, як новий вид

шихтового матеріалу з властивостями, які істотно відрізняються від властивостей складових суміші.

Непрямим показником товщини пластичної зони – параметра, що характеризує її газопроникність, є різниця температур плавлення та розм'якшення. Встановлений взаємозв'язок відношення окатишів та агломерату у суміші з різницею температур плавлення та розм'якшення цієї суміші дозволяє зробити висновок про можливість використання вказаного відношення у якості управляючого параметру при корегуванні товщини пластичної зони. Основою для цього висновку є високий коефіцієнт достовірності апроксимації – не нижче 0,96, що підтверджує тісний взаємозв'язок різниці температур розм'якшення та плавлення з вказаним відношенням (рис. 5.4).



а)



б)

Рисунок 5.4 – Зв'язок різниці температур плавлення та розм'якшення сумішей залізовмісних шихтових матеріалів у кільцевих зонах колошника з відношенням кількості окатишів і агломерату у цих зонах (а – дослідницькі періоди 1, 2; б – дослідницькі періоди 3, 4)

Геометрично товщина пластичної зони може бути також визначена, як різниця координат точок перетину ліній розм'якшення та плавлення зі середніми лініями цієї зони на відповідному рівні. На рис. 5.5 наведено результати досліджень зв'язків відношення вмісту окатишів до вмісту агломерату з різницею вертикальних координат (товщини) пластичної зони ( $Z$ ) у кільцевих зонах печі. Коефіцієнт достовірності апроксимації виявленого зв'язку складає 0,52, що свідчить про принципову можливість використання зміни відношення основних залізовмісних компонентів у кільцевій зоні для корегування геометричних параметрів пластичної зони.

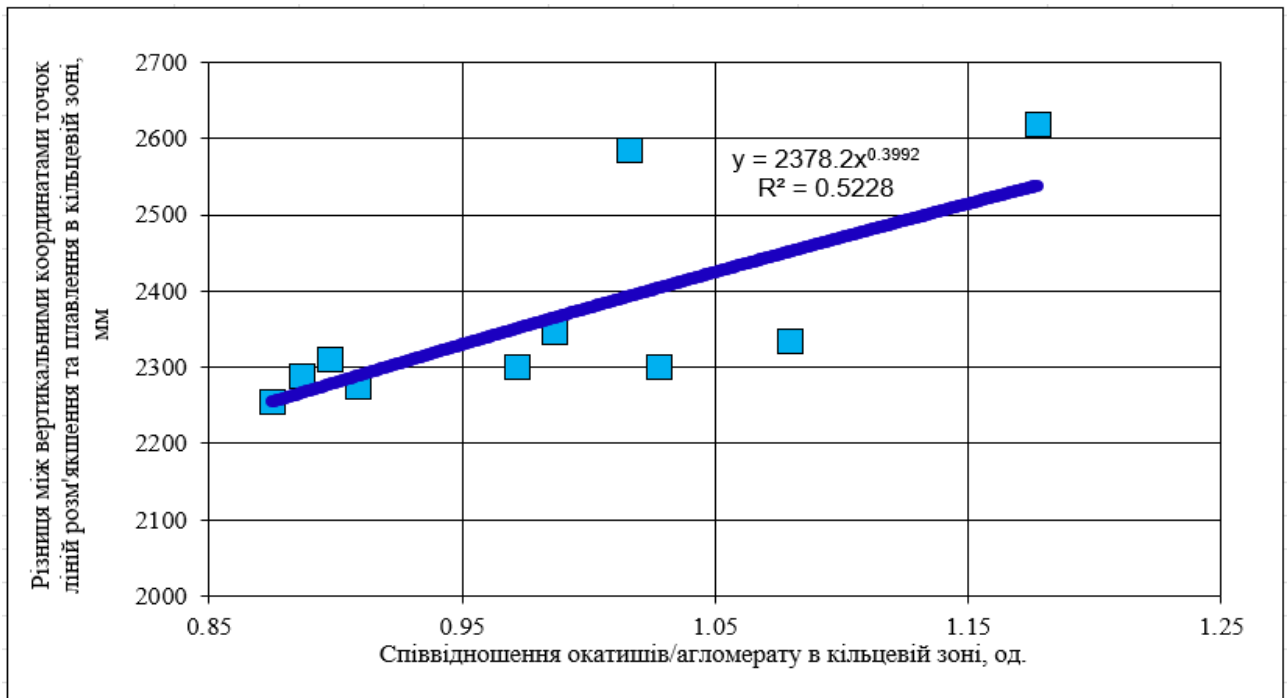


Рисунок 5.5 – Зв'язок різниці вертикальних координат ліній розм'якшення та плавлення (товщини пластичної зони ( $\Delta Z$ )) у кільцевій зоні доменної печі з відношенням кількості окатишів і агломерату у цій зоні

Необхідне корегування параметрів пластичної зони у певних межах може бути реалізовано також шляхом зміни розподілу добавок у поєднанні зі зміною розподілу основних компонентів шихти або виключно перерозподілом добавок.

Цей висновок підтверджується прикладом введення конвертерного шлаку, наведеним нижче, який показує, що наявність цього компонента - конвертерного шлаку у шихті суттєво змінює високотемпературні властивості сумішей залізовмісних матеріалів та особливості їх поведінки при відновлювально - тепловій обробці. У табл. 5.1 наведені результати виконаних відділом металургії чавуну лабораторних досліджень високотемпературних властивостей залізовмісних матеріалів, які використовуються на одному з металургійних підприємств України, у суміші з конвертерним шлаком. Аналіз даних, наведених у табл. 5.1, показує, що введення конвертерного шлаку у суміш залізородних матеріалів значно змінює основні високотемпературні характеристики суміші – температуру 45% - ї усадки шару суміші ( $T_{45}$ ),

температуру початку фільтрації розплаву через коксову насадку ( $T_{пф}$ ), температуру максимуму фільтрації розплаву ( $T_{мф}$ ) та кількість первинного шлаку ( $M_{пш}$ ) (рис. 5.6, рис. 5.7).

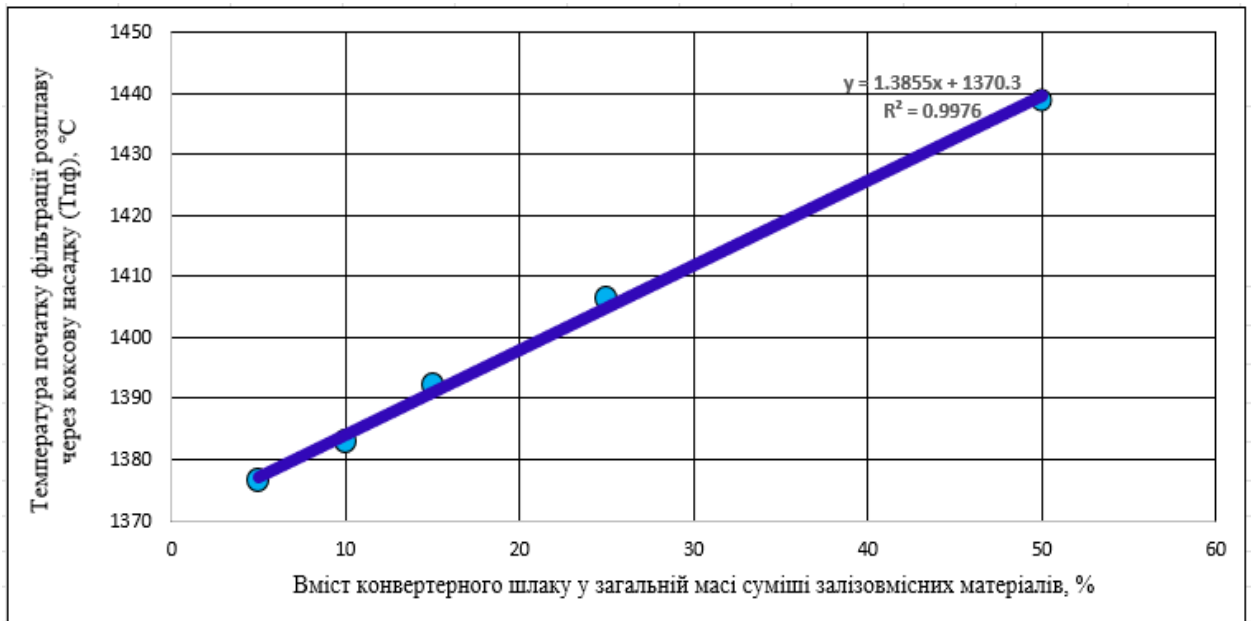


Рисунок 5.6 – Зміна температури початку фільтрації ( $T_{пф}$ ) розплаву в залежності від вмісту конвертерного шлаку у суміші залізовмісних матеріалів (при додаванні конвертерного шлаку у суміш агломерату (75%) з окатишами (25%))

Таблиця 5.1 – Хімічний склад та розрахункові властивості сумішей залізородних матеріалів

Склад суміші	Хімічний склад, %						CaO/SiO <sub>2</sub>	Властивості							
	Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO		FeO, %	T <sub>45</sub> , °C	T <sub>пф</sub> , °C	T <sub>мф</sub> , °C	R <sub>1050</sub> , %	M <sub>пш</sub> , %	M <sub>зал</sub> , %	П <sub>к</sub> , бал
Агломерат (А) ЕМЗ	53,43	8,94	13,77	12,00	2,14	1,17	1,45	14,94	1244,4	1378,8	1510,7	78,34	16,74	15,32	10,72
Окатиші (О) ПівГЗК	62,06	7,55	2,84	2,00	1,17	0,39	0,38	44,46	1233,2	1369,0	1397,0	68,54	43,34	2,99	12,93
Шлак (Ш) конвертерний	13,10	20,30	53,60	17,16	2,03	8,70	2,64	-	1488,2	1555,2	1969,5	114,11	-	70,97	-
97% А + 3% Ш	52,22	9,28	14,96	12,15	2,14	1,40	1,61	11,25	1251,7	1384,0	1524,5	79,41	14,57	16,99	9,90
95% А + 5% Ш	51,41	9,51	15,76	12,26	2,13	1,55	1,66	8,79	1256,6	1387,6	1533,6	80,13	13,13	18,10	9,35
90% А + 10% Ш	49,40	10,08	17,75	12,52	2,13	1,92	1,76	2,65	1268,8	1396,4	1556,6	81,92	9,52	20,88	7,97
85% А + 15% Ш	47,38	10,64	19,74	12,77	2,12	2,30	1,85	-	1281,0	1405,2	1579,5	83,70	5,91	23,67	6,60
75% А + 25% Ш	43,35	11,78	23,73	13,29	2,11	3,05	2,01	-	1305,4	1422,9	1625,4	87,28	-	29,23	3,85
50% А + 50% Ш	33,27	14,62	33,69	14,58	2,09	4,94	2,30	-	1366,3	1467,0	1740,1	96,22	-	43,14	-
97% О + 3% Ш	60,59	7,93	4,36	2,45	1,20	0,64	0,55	39,89	1240,8	1374,6	1414,1	69,90	40,38	5,03	12,04
95% О + 5% Ш	59,61	8,19	5,38	2,76	1,21	0,81	0,66	36,84	1245,9	1378,3	1425,6	70,82	38,40	6,39	11,44
90% О + 10% Ш	57,16	8,83	7,92	3,52	1,26	1,22	0,90	29,22	1258,7	1387,6	1454,2	73,10	33,46	9,79	9,96
85% О + 15% Ш	54,72	9,46	10,45	4,27	1,30	1,64	1,10	21,60	1271,4	1396,9	1482,8	75,37	28,52	13,19	8,47
75% О + 25% Ш	49,82	10,74	15,53	5,79	1,39	2,47	1,45	6,35	1296,9	1415,6	1540,1	79,93	18,65	19,99	5,51
50% О + 50% Ш	37,58	13,93	28,22	9,58	1,60	4,55	2,03	-	1360,7	1462,1	1683,3	91,32	-	36,98	-
97% (70% А + 30% О) + 3% Ш	54,73	8,88	11,78	9,24	1,85	1,17	1,33	-	1369,9	1469,6	1747,0	96,76	-	43,98	-
95% (70% А + 30% О) + 5% Ш	53,87	9,11	12,65	9,41	1,86	1,32	1,39	10,02	1254,2	1385,8	1529,1	79,77	13,85	17,54	9,62
90% (70% А + 30% О) + 10% Ш	51,73	9,70	14,80	9,82	1,87	1,71	1,53	5,72	1262,7	1392,0	1545,1	81,02	11,32	19,49	8,66
85% (70% А + 30% О) + 15% Ш	49,58	10,29	16,96	10,22	1,88	2,10	1,65	-	1274,9	1400,8	1568,1	82,81	7,72	22,27	7,29
75% (70% А + 30% О) + 25% Ш	45,29	11,47	21,27	11,04	1,89	2,88	1,85	-	1293,2	1414,0	1602,5	85,49	2,30	26,45	5,23
50% (70% А + 30% О) + 50% Ш	34,56	14,41	32,05	13,08	1,94	4,82	2,22	-	1335,8	1444,9	1682,8	91,75	-	36,19	0,42
97% (75% А + 25% О) + 3% Ш	54,31	8,94	12,31	9,73	1,90	1,21	1,38	-	1303,6	1420,8	1577,1	83,06	10,51	24,09	4,51
95% (75% А + 25% О) + 5% Ш	53,46	9,18	13,17	9,88	1,90	1,36	1,43	38,37	1243,4	1376,5	1419,9	70,36	39,39	5,71	11,74
90% (75% А + 25% О) + 10% Ш	51,34	9,76	15,29	10,27	1,91	1,75	1,57	33,03	1252,3	1383,0	1439,9	71,96	35,93	8,09	10,70
85% (75% А + 25% О) + 15% Ш	49,21	10,35	17,42	10,65	1,92	2,13	1,68	25,41	1265,0	1392,3	1468,5	74,23	30,99	11,49	9,22
75% (75% А + 25% О) + 25% Ш	44,97	11,52	21,68	11,42	1,93	2,91	1,88	13,97	1284,2	1406,3	1511,5	77,65	23,58	16,59	6,99
50% (75% А + 25% О) + 50% Ш	34,34	14,45	32,32	13,33	1,96	4,84	2,24	-	1328,8	1438,8	1611,7	85,63	6,30	28,48	1,79

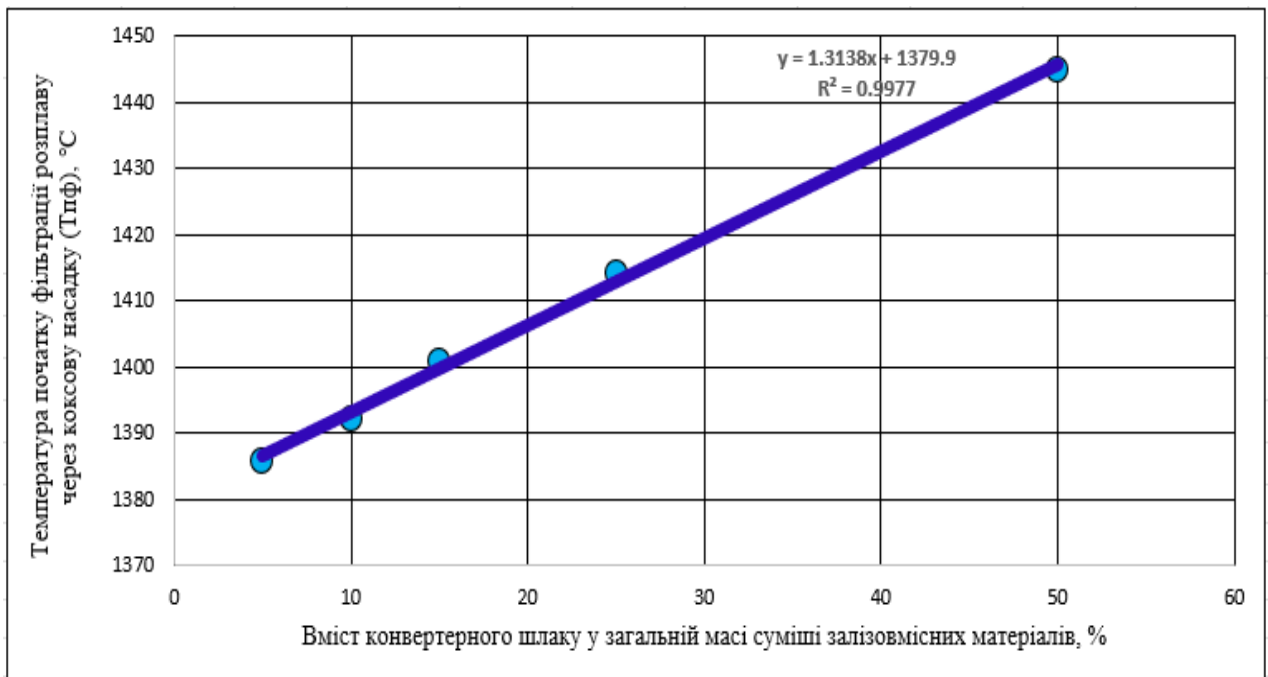


Рисунок 5.7 – Зміна температури початку фільтрації ( $T_{пф}$ ) розплаву в залежності від вмісту конвертерного шлаку у суміші залізовмісних матеріалів (при додаванні конвертерного шлаку у суміш агломерату (70%) з окатишами (30%))

Слід відзначити, що при підвищенні вмісту конвертерного шлаку у діапазоні 5 – 50%  $T_{пф}$  суміші підвищується, орієнтовано, на 1,3 – 1,5 °С на кожний 1% збільшення вмісту шлаку. Збільшення вмісту окатишів у вихідній суміші посилює вплив конвертерного шлаку на величину  $T_{пф}$ . Таким чином, отримані результати дозволяють зробити висновок, що потрібне корегування параметрів пластичної зони у певних межах може бути реалізоване також шляхом зміни розподілу добавок.

Відмінність високотемпературних властивостей залізовмісних компонентів по відношенню до властивостей їх сумішей (табл. 5.1) підтверджує наведене вище положення про те, що суміш шихтових матеріалів з певним складом при температурно – відновлюваній обробці виявляє нові властивості, які значно відрізняються від властивостей вхідних компонентів. З цього слідує, що управління параметрами пластичної зони, вибір напрямку та величини корегуючого впливу у кожному конкретному випадку повинні

засновуватися на результатах математичного моделювання розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника, визначенні складу сумішей компонентів шихти у різних зонах печі, прогнозуванні їх високотемпературних властивостей та тенденцій зміни цих властивостей при зміні компонентного складу суміші.

Розроблена в ІЧМ комплексна математична модель завантаження шихти в бункер БЗП, вивантаження з нього та розподілу шихтових матеріалів на колошнику забезпечує можливість визначення вмісту компонентів шихти, що вивантажуються, у різних кільцевих зонах доменної печі [66]. В ІЧМ на протязі останніх декількох десятиріч виконані унікальні експериментальні та аналітичні дослідження обладнання та процесів завантаження шихтових матеріалів у доменну піч, на основі яких розроблено нові способи управління розподілом шихтових матеріалів на колошнику печі. Результати цих досліджень покладені в основу розробленої технології завантаження багатокомпонентної шихти у доменну піч. Як впливає з положень цієї технології, для регулювання розподілу конкретного компонента змішаної залізорудної порції по радіусу колошника у якості управляючого параметру може бути використана уставка початку вивантаження дози цього компонента на конвеєр або у скіп, виражена, як правило у відносних одиницях, одиницях маси, іноді – у одиницях часу.

Для забезпечення можливості оперативної оцінки характеристик розподілу компонентів шихти та спрощення практичного використання результатів досліджень технологіями - доменщиками на підставі результатів багатократного математичного моделювання режимів завантаження доменних печей з варіюванням програм розподілу шихтових матеріалів, з різним вмістом компонентів у шихті та зміною параметрів формування багатокомпонентних порцій, а також з використанням багаторічного досвіду експериментальних досліджень розподілу шихтових матеріалів у доменній печі, отримані залежності для оцінки вмісту компонентів у кільцевій зоні колошнику, що розглядається, з прийнятною для технологічних розрахунків точністю [82, 83].

Для визначення вмісту агломерату:

$$C_{ai} = [(a_{aAa} \cdot C_{aи} + b_{aAa}) \cdot m_{yo} + (a_{bAa} \cdot C_{aи} + b_{bAa})] \cdot r_i^3 + [(a_{aBa} \cdot C_{aи} + b_{aBa}) \cdot m_{yo} + (a_{bBa} \cdot C_{aи} + b_{bBa})] \cdot r_i^2 + [(a_{aCa} \cdot C_{aи} + b_{aCa}) \cdot m_{yo} + (a_{bCa} \cdot C_{aи} + b_{bCa})] \cdot r_i + [(a_{aDa} \cdot C_{aи} + b_{aDa}) \cdot m_{yo} + (a_{bDa} \cdot C_{aи} + b_{bDa})], \quad (5.1)$$

де

$j$  – індекс компонента;

$i$  – индекс кільцевої зони колошника;

$a_{aAa}, b_{aAa}, a_{bAa}, b_{bAa}, a_{aBa}, b_{aBa}, a_{bBa}, b_{bBa}, a_{aCa}, b_{aCa}, a_{bCa}, b_{bCa}, a_{aDa}, b_{aDa}, a_{bDa}, b_{bDa}$  – чисельні коефіцієнти;

$C_{aи}$  – кількість агломерату в порції по відношенню до загальної маси порції, од.;

$m_{yo}$  – відносна маса уставки початку вивантаження дози окатишів на конвеєр, од.;

$r_i$  – відстань від осі печі до середньої лінії  $i$  – ої кільцевої зони (відносне значення), од.

Для визначення вмісту окатишів:

$$C_{oi} = [(a_{aAo} \cdot C_{oи} + b_{aAo}) \cdot m_{yo} + (a_{bAo} \cdot C_{oи} + b_{bAo})] \cdot r_i^3 + [(a_{aBo} \cdot C_{oи} + b_{aBo}) \cdot m_{yo} + (a_{bBo} \cdot C_{oи} + b_{bBo})] \cdot r_i^2 + [(a_{aCo} \cdot C_{oи} + b_{aCo}) \cdot m_{yo} + (a_{bCo} \cdot C_{oи} + b_{bCo})] \cdot r_i + [(a_{aDo} \cdot C_{oи} + b_{aDo}) \cdot m_{yo} + (a_{bDo} \cdot C_{oи} + b_{bDo})], \quad (5.2)$$

де

$a_{aAo}, b_{aAo}, a_{bAo}, b_{bAo}, a_{aBo}, b_{aBo}, a_{bBo}, b_{bBo}, a_{aCo}, b_{aCo}, a_{bCo}, b_{bCo}, a_{aDo}, b_{aDo}, a_{bDo}, b_{bDo}$  – чисельні коефіцієнти;

$C_{oи}$  – кількість окатишів у порції по відношенню до загальної маси порції, од.

Для визначення вмісту добавок:

$$C_{di} = [(a_{aAd} \cdot C_{dи} + b_{aAd}) \cdot m_{yd} + (a_{bAd} \cdot C_{dи} + b_{bAd})] \cdot r_i^3 + [(a_{aBd} \cdot C_{dи} + b_{aBd}) \cdot m_{yd} + (a_{bBd} \cdot C_{dи} + b_{bBd})] \cdot r_i^2 + [(a_{aCd} \cdot C_{dи} + b_{aCd}) \cdot m_{yd} + (a_{bCd} \cdot C_{dи} + b_{bCd})] \cdot r_i + [(a_{aDd} \cdot C_{dи} + b_{aDd}) \cdot m_{yd} + (a_{bDd} \cdot C_{dи} + b_{bDd})], \quad (5.3)$$

де

$a_{aAd}, b_{aAd}, a_{bAd}, b_{bAd}, a_{aBd}, b_{aBd}, a_{bBd}, b_{bBd}, a_{aCd}, b_{aCd}, a_{bCd}, b_{bCd}, a_{aDd}, b_{aDd}, a_{bDd}, b_{bDd}$  – чисельні коефіцієнти;

$C_{дш}$  – кількість добавок в порції по відношенню до загальної маси порції, од.

$m_{y\delta}$  – відносна маса уставки початку вивантаження дози добавок на конвеєр, од.

Перетворення цих залежностей дозволило отримати формули для визначення необхідної величини управляючого впливу – уставки розташування дози компонента в об'ємі порції (у системах з конвеєрною доставкою шихти на колошник - уставки початку виваження дози компонента на конвеєр) - при заданих вмісті компонента у кільцевій зоні та вмісті його у шихті. Як правило, першим у бункер БЗП завантажується агломерат. В цьому випадку величина уставки початку вивантаження агломерату у системах з конвеєрною доставкою шихти на колошник дорівнює 0. Потрібний вміст агломерату у заданій зоні колошнику досягається зміною розташування дози окатишів у об'ємі порції шляхом реалізації розрахункової величини уставки початку вивантаження цього компоненту, яка визначається за формулою:

$$m_{y\delta} = \frac{\left\{ C_{ai} - \left[ \frac{(a_{bAa} \cdot C_{аш} + b_{bAa}) \cdot r_i^3 + (a_{bBa} \cdot C_{аш} + b_{bBa}) \cdot r_i^2 + \right]}{(a_{bCa} \cdot C_{аш} + b_{bCa}) \cdot r_i + (a_{bDa} \cdot C_{аш} + b_{bDa})} \right\}}{\left[ (a_{aAa} \cdot C_{аш} + b_{aAa}) \cdot r_i^3 + (a_{bBa} \cdot C_{аш} + b_{bBa}) \cdot r_i^2 + (a_{aCa} \cdot C_{аш} + b_{aCa}) \cdot r_i + (a_{aDa} \cdot C_{аш} + b_{aDa}) \right]}, \quad (5.4)$$

де

$m_{y\delta}$  – відносна маса уставки початку вивантаження дози окатишів на конвеєр, од.;

$C_{ai}$  – потрібний вміст агломерату в  $i$ -ій (заданій) зоні колошника;

$a_{aAa}, b_{aAa}, a_{bAa}, b_{bAa}, a_{aBa}, b_{aBa}, a_{bBa}, b_{bBa}, a_{aCa}, b_{aCa}, a_{bCa}, b_{bCa}, a_{aDa}, b_{aDa}, a_{bDa}, b_{bDa}$  – чисельні коефіцієнти;

$C_{аш}$  – кількість агломерату в порції по відношенню до загальної маси порції, од.;

$r_i$  – відстань від осі печі до середньої лінії  $i$ -ої кільцевої зони (відносне значення), од.

Для забезпечення потрібного вмісту окатишів у заданій кільцевій зоні колошника уставка початку вивантаження цього компонента може визначатися з виразу:

$$m_{yoo} = \frac{\left\{ C_{oi} - \left[ (a_{bAo} \cdot C_{oш} + b_{bAo}) \cdot r_i^3 + (a_{bBo} \cdot C_{oш} + b_{bBo}) \cdot r_i^2 + \right] \right.}{\left. \left[ (a_{aAo} \cdot C_{oш} + b_{aAo}) \cdot r_i^3 + (a_{bBo} \cdot C_{oш} + b_{bBo}) \cdot r_i^2 + (a_{aCo} \cdot C_{oш} + b_{aCo}) \cdot r_i + (a_{aDo} \cdot C_{oш} + b_{aDo}) \right] \right\}}{\quad}, \quad (5.5)$$

де

$m_{yoo}$  - відносна маса уставки початку вивантаження дози окатишів на конвеєр, од.;

$C_{oi}$  - потрібний вміст окатишів в  $i$ -ій (заданій) зоні колошника;

$a_{aAo}, b_{aAo}, a_{bAo}, b_{bAo}, a_{aBo}, b_{aBo}, a_{bBo}, b_{bBo}, a_{aCo}, b_{aCo}, a_{bCo}, b_{bCo}, a_{aDo}, b_{aDo}, a_{bDo}, b_{bDo}$  - чисельні коефіцієнти;

$C_{oш}$  - кількість окатишів у порції по відношенню до загальної маси порції, од.

Потрібний вміст добавок у заданій кільцевій зоні колошника досягається шляхом реалізації розрахункової величини уставки початку вивантаження дози добавок, яка визначається за формулою:

$$m_{yд} = \frac{\left\{ C_{di} - \left[ (a_{bAd} \cdot C_{дш} + b_{bAd}) \cdot r_i^3 + (a_{bBд} \cdot C_{дш} + b_{bBд}) \cdot r_i^2 + \right] \right.}{\left. \left[ (a_{aAd} \cdot C_{дш} + b_{aAd}) \cdot r_i^3 + (a_{bBд} \cdot C_{дш} + b_{bBд}) \cdot r_i^2 + (a_{aCд} \cdot C_{дш} + b_{aCд}) \cdot r_i + (a_{aDд} \cdot C_{дш} + b_{aDд}) \right] \right\}}{\quad}, \quad (5.6)$$

де

$m_{yд}$  - відносна маса уставки початку вивантаження дози добавок на конвеєр, од.;

$C_{di}$  - потрібний вміст добавки в  $i$ -ій (заданій) зоні колошника;

$a_{aAd}, b_{aAd}, a_{bAd}, b_{bAd}, a_{aBд}, b_{aBд}, a_{bBд}, b_{bBд}, a_{aCд}, b_{aCд}, a_{bCд}, b_{bCд}, a_{aDд}, b_{aDд}, a_{bDд}, b_{bDд}$  - чисельні коефіцієнти;

$C_{дш}$  - кількість добавки у порції по відношенню до загальної маси порції, од.

Аналогічні залежності отримані для доменних печей, які оснащені системами завантаження зі скіповою доставкою шихти на колошник.

Отримані результати досліджень дозволили встановити зв'язки параметрів пластичної зони (розраховані за допомогою запропонованого

методу їх визначення) з показниками розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника доменної печі. Встановлені зв'язки показників розподілу шихти по радіусу колошника, що включають такі параметри, як рудне навантаження та вміст компонентів шихти в зонах колошника, з параметрами пластичної зони з'явилися основою для розробки способу обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі.

Запропонований спосіб може бути представлений сукупністю приведених нових та відомих методів рішення поставленої задачі – обґрунтування корегування характеристик режиму завантаження шихти та вибору параметрів, що корегуються, з метою забезпечення формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі. Основні положення запропонованого способу та послідовність їх реалізації наведені нижче.

1. Визначення характеристик розподілу компонентів шихти у кільцевих зонах за радіусом колошника.

2. Розрахунково-аналітичний прогноз температур розм'якшення та плавлення залізовмісних компонентів шихти в кільцевих зонах.

3. Розрахунково – аналітичне та графічне моделювання пластичної зони з використанням засобів контролю температури газового потоку та поверхні засипу на основі запропонованого методу.

4. Визначення значень критерію оцінки форми та положення пластичної зони в доменній печі у поточних умовах доменної плавки та допустимих діапазонів його зміни. Оцінка рівня раціональності сформованої пластичної зони та адекватності її поточним параметрам (показникам) процесу плавки за допомогою розробленого критерію.

5. Експертна оцінка необхідних змін форми, розташування та товщини пластичної зони, яка заснована на результатах розрахунків за допомогою запропонованого методу, та враховуюча об'єктивні технологічні параметри процесу плавки, а також свідчення засобів контролю розподілу шихти та газового потоку.

б. Вибір можливого напрямку корегування режиму завантаження в залежності від необхідної зміни параметрів пластичної зони.

Вибір коригуючого впливу здійснюється в залежності від необхідності рішення конкретної задачі, основні з яких наведено нижче.

*б.1. Зміна положення «кореня» та/або вершини пластичної зони в осі печі.*

*б.1.1. Зміна положення «кореня» та/або вершини пластичної зони в осі печі зі зміною форми пластичної зони.*

*б.1.2. Зміна положення «кореня» та/або вершини пластичної зони в осі печі без зміни форми пластичної зони.*

*б.2. Зміна об'ємного розташування пластичної зони.*

*б.3. Зміна температурного інтервалу («товщини») пластичної зони.*

Задачі по п. б.1 вирішуються шляхом зміни рудного навантаження та/або шляхом зміни розподілу компонентів по радіусу колошника.

П. б.2 реалізується в основному зміною загального рудного навантаження в шихті.

Задача по п. б.3 вирішується виключно шляхом зміни розподілу компонентів.

Вибір керуючих параметрів для корегування режиму завантаження у кожному конкретному випадку визначається ступенем технологічної значимості можливих впливів, у числі яких розподіл рудного навантаження є превалюючим по відношенню до вмісту компонентів шихти в кільцевих зонах по радіусу колошника.

При цьому необхідно враховувати, що згідно з отриманими результатами, зміна рудного навантаження на одну й ту ж величину у різних зонах доменної печі може обумовлювати зміщення лінії плавлення, яке відрізняється у 3 – 5 рази: для заданої зміни вертикальної координати лінії плавлення в осьовій та приосьовій зонах потрібна, як правило, значно менша зміна рудного навантаження, ніж у проміжній та периферійній зонах.

При виборі величини керуючого впливу доцільно орієнтуватися на відносні величини рудного навантаження.

Зміна рудного навантаження у вибраній зоні обумовлює однозначну зміну вертикальної координати лінії плавлення, тобто у даному випадку, напрямок варіювання керуючого впливу співпадає з напрямком зміни параметра, який потребує корегування. У зв'язку з різноманіттям відмінностей процесів плавки та її режимів на різних доменних печах, отримання універсальних розрахункових залежностей, що забезпечують можливість розрахункового визначення потрібної величини зміни рудного навантаження для реалізації заданої зміни вертикальної координати пластичної зони, у даний час не представляється можливим. Тому, необхідні зміни можуть досягатися шляхом ітераційної зміни величини рудного навантаження у заданій зоні з кроком  $\approx 0,1$  (абс.) або  $\approx 0,02$  (відн.) з поточною оцінкою змін розподілу температури газового потоку (поверхні засипу) та змін координат лінії плавлення, що відбуваються.

Встановлені особливості зміни координат лінії плавлення при зміні рудного навантаження в різних кільцевих зонах колошника в технологічних умовах роботи доменної печі з використанням пиловугільного палива – зміна координати лінії плавлення на одиницю зміни рудного навантаження в осьовій та приосьовій зонах в 1,7, а у проміжній та периферійній зонах – в 2,2 рази менше, ніж при роботі доменної печі без використання пиловугільного палива.

Зміну розподілу компонентів шихти по радіусу колошника доцільно також здійснювати ітераційним шляхом. Крок зміни вмісту компонента на першому етапі приближення можливо прийняти 5 – 10% (відн.) загального вмісту компонента у шихті. Склад суміші шихтових матеріалів з спрямовано зміненим складом компонентів використовується у якості початкових даних для розрахунково – аналітичного прогнозу високотемпературних властивостей суміші. В залежності від отриманого результату або продовжуються ітераційні процедури, або змінюється напрямок зміни вмісту компонента. Переважним впливом є зміна характеристик розподілу основних

компонентів шихти. Зміну розподілу добавок більш доцільно використовувати, як додатковий керуючий вплив, у зв'язку з істотними технологічними обмеженнями, накладеними на розподіл добавок по радіусу колошника. При визначенні складу суміші, що володіє необхідними властивостями в процесі температурно – відновлювальної обробки, та виборі керуючих впливів слід у кожному випадку враховувати технологічні обмеження, які стосуються розподілу компонентів, їх сумішей та розплавів, які з них утворюються. Після закінчення ітераційних процедур з вибору необхідного состава суміші шихтових матеріалів у зоні доменної печі, що розглядається, необхідні зміни параметрів формування порцій шихти (установок положення доз компонентів в об'ємах порцій), які забезпечують потрібний вміст компонентів у суміші, визначаються в залежності від структури системи завантаження по формулам (5.4) – (5.6).

Як слідує із представленого способу, вплив розподілу рудного навантаження є превалюючим по відношенню до впливу розподілу компонентів шихти, однак, оптимізація розподілу компонентів в поєднанні з раціональним розподілом рудного навантаження також є одним з істотних резервів підвищення економічності плавки. У зв'язку з цим, розробка раціонального режиму завантаження доменної печі повинна здійснюватися в два, а при необхідності - в три етапи.

На першому етапі розробка програми завантаження повинна здійснюватися на базі аналізу та вибору раціонального розподілу рудного навантаження по радіусу колошника; на другому етапі повинен проводитися вибір раціонального (найбільш економічного) розподілу компонентів порцій шихтових матеріалів з мінімізацією відхилень розподілу рудного навантаження від прийнятого на першому етапі. Якщо по результатам розрахунково – аналітичного прогнозу високотемпературних властивостей суміші компонентів в зонах печі досягти заданих температур розм'якшення та плавлення не вдається, треба змінювати склад шихтових матеріалів з

урахуванням технологічних обмежень, які стосуються розподілу компонентів, їх сумішей та розплавів, які з них утворюються (третій етап).

Слід відмітити, що встановлені взаємозв'язки параметрів пластичної зони з показниками режиму завантаження шихти, на основі аналізу яких встановлені емпіричні рівняння, отримані для матриці початкових даних, що складена на основі показників роботи конкретної доменної печі у чотирьох періодах. Причому, ці періоди характеризували роботу доменної печі в різних технологічних умовах, які значно відрізнялися використанням паливних добавок. Не дивлячись на це, отримані взаємозв'язки мають достатньо високий (для взаємозв'язків, отриманих на основі даних про роботу реального промислового об'єкту) коефіцієнт достовірності апроксимації та можуть бути використані для цього конкретного об'єкту з метою визначення напрямку необхідних управляючих впливів для корегування параметрів та положення пластичної зони в печі.

Отримані емпіричні залежності не можуть бути універсальними, що пов'язано з особливостями технології доменної плавки на різних печах. З метою отримання емпіричних залежностей для визначення необхідних управляючих впливів для корегування параметрів та положення пластичної зони для доменних печей, які працюють в різних технологічних умовах, запропонований спосіб передбачає:

- визначення параметрів та положення пластичної зони в доменній печі за допомогою запропонованого методу (розрахунок вмісту компонентів шихти в кільцевих зонах печі, визначення їх високотемпературних властивостей, розрахунок площі поверхні плавлення; візуалізація пластичної зони в об'ємі доменної печі; визначення координат ліній плавлення та розм'якшення);

- встановлення зв'язків координат ліній розм'якшення та плавлення з розподілом рудного навантаження та залізовмісних компонентів шихти по радіусу колошника та отримання відповідних емпіричних виразів.

На рис. 5.8 представлена блок – схема вирішення задачі вибору коригуючих впливів на режим завантаження шихти з метою забезпечення раціональних параметрів пластичної зони.

Запропонований спосіб обґрунтованого корегування параметрів пластичної зони розширює технологічні можливості управління плавкою за рахунок використання розподілу компонентів шихти за радіусом колошника у якості управляючого параметру на додаток до традиційно використовуваного розподілу рудного навантаження. Врахування характеристик розподілу компонентів шихти забезпечує можливість визначення складу сумішей залізовмісних матеріалів, а також розрахункового прогнозу їх високотемпературних характеристик та властивостей розплавів у різних зонах доменної печі, сприяючи тим самим підвищенню точності визначення координат ліній розм'якшення та плавлення, які обмежують пластичну зону.

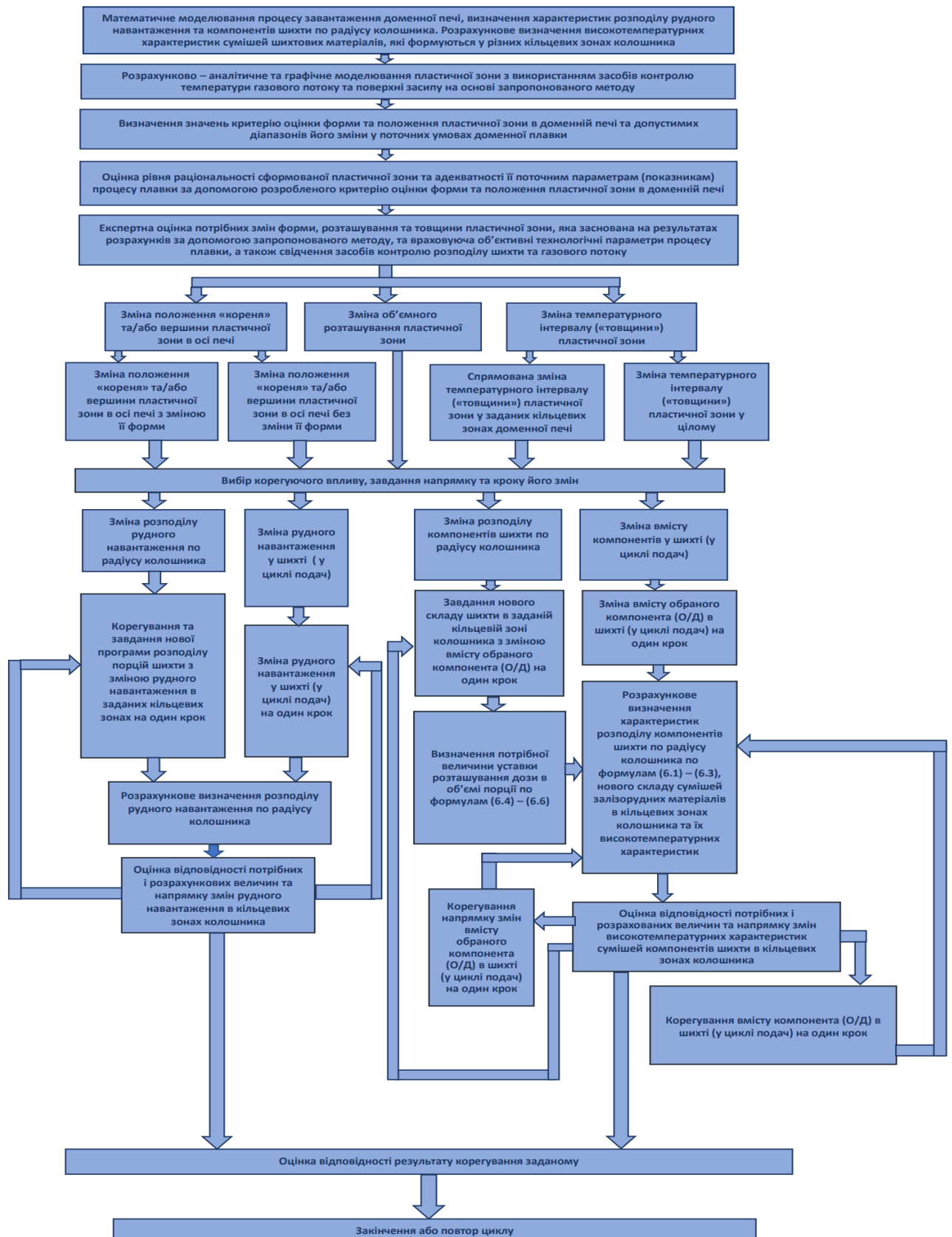


Рисунок 5.8 - Блок – схема вирішення завдання вибору коригуючих впливів на режим завантаження шихти з метою забезпечення раціональних параметрів пластичної зони

## Висновки до розділу 5

1. Ґрунтуючись на отриманих за допомогою запропонованого методу результатах визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі у чотирьох періодах її роботи, виконані дослідження з встановлення взаємозв'язків параметрів пластичної зони з температурою газу над поверхнею засипу шихти. Виявлені взаємозв'язки вертикальних координат точок лінії плавлення з температурою газу над поверхнею засипу та рудним навантаженням у рівних за площею кільцевих зонах доменної печі, що свідчить про можливість розробки методів контролю положення та форми пластичної зони з використанням даних термовимірювальних зондів, а також про можливість корегування параметрів цієї зони шляхом зміни розподілу рудного навантаження по радіусу колошника доменної печі. Встановлено, що зв'язок вертикальної координати лінії плавлення у кільцевій зоні з рудним навантаженням у цій зоні характеризується достатньо високими значеннями коефіцієнтів достовірності апроксимації, які знаходяться в діапазоні від 0,5 до 0,58.

2. Встановлено, що в якості регулюючого параметру при корегуванні температурного рівня поверхонь розм'якшення та плавлення у різних кільцевих зонах доменної печі може використовуватися відношення кількості окатишів і агломерату у цих зонах. Основою для цього є високий коефіцієнт достовірності апроксимації взаємозв'язку різності температур розм'якшення та плавлення з вказаним відношенням – не нижче 0,96.

3. Встановлено зв'язки значень вертикальних координат точок перетину середніх ліній кільцевих зон з лініями розм'якшення та плавлення та значень відношення кількості окатишів і агломерату у цих зонах. Коефіцієнт достовірності апроксимації зв'язків відношення вмісту окатишів до вмісту агломерату та різниці вертикальних координат поверхонь (товщини) пластичної зони у кільцевих зонах доменної печі лінійною функцією складає 0,52, що говорить про можливість використання зміни співвідношення

основних залізовмісних компонентів у кільцевій зоні для корегування геометричних параметрів зони розм'якшення – плавлення.

4. Показано, що наявний вид зв'язків та їх спрямованість у діапазоні, що розглядається, визначаються складом суміші шихтових матеріалів у конкретній зоні доменної печі, який визначає її високотемпературні властивості і тенденції їх зміни при зміні компонентного складу суміші та властивостей компонентів. Це підтверджується прикладом введення конвертерного шлаку, який показує, що наявність цього компонента у шихті суттєво змінює високотемпературні властивості сумішей залізовмісних матеріалів та особливості їх поведінки при відновлювально - теплової обробці. При підвищенні вмісту конвертерного шлаку до 50% температура фільтрації суміші підвищується, орієнтовно, на 1,3 – 1,5°C на кожний 1% збільшення вмісту шлаку. Збільшення вмісту окатишів у вихідній суміші посилює вплив конвертерного шлаку на величину температури фільтрації при збереженні напрямку впливу. Таким чином потрібне корегування параметрів пластичної зони у певних межах може бути реалізоване також шляхом зміни розподілу добавок.

5. Управління параметрами пластичної зони, вибір напрямку та величини управляючого впливу у кожному конкретному випадку повинні засновуватися на результатах математичного моделювання розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника, визначенні складу сумішей компонентів шихти у різних зонах печі та прогнозуванні їх високотемпературних властивостей та тенденцій зміни цих властивостей при зміні компонентного складу суміші. Для регулювання розподілу конкретного компонента змішаної залізородної порції по радіусу колошника у якості управляючого параметру може бути використана уставка розташування дози цього компонента на конвеєрі або у скіпі. Отримані формули для визначення цієї величини при заданих вмісті компонента у кільцевій зоні та вмісті його у шихті для доменних печей з різною структурою системи завантаження.

6. Встановлені зв'язки рудного навантаження в кільцевих зонах колошника доменної печі з координатами положення точок лінії плавлення у цих зонах та показано, що залежність цих параметрів може бути представлена степеневою функцією. Згідно з отриманими результатами встановлено, що зміна рудного навантаження на одну й ту ж величину у різних зонах доменної печі може обумовлювати зміщення лінії плавлення, яке відрізняється у 3 – 5 рази: для заданої зміни вертикальної координати лінії плавлення в осьовій та приосьовій зонах потрібна, як правило, значно менша зміна рудного навантаження, ніж у проміжній та периферійній зонах.

7. У зв'язку з неможливістю отримання універсальних розрахункових залежностей для визначення потрібної величини зміни рудного навантаження для реалізації заданої зміни вертикальної координати пластичної зони, необхідні зміни можуть досягатися шляхом ітераційної зміни величини рудного навантаження у заданій зоні з кроком  $\approx 0,1$  (абс.) або  $\approx 0,02$  (відн.) з поточною оцінкою змін розподілу температури газового потоку (поверхні засипу) та змін координат лінії плавлення, що відбуваються.

8. Встановлені особливості зміни координат лінії плавлення при зміні рудного навантаження в різних кільцевих зонах колошника в технологічних умовах роботи доменної печі з використанням пиловугільного палива - зміна координати лінії плавлення на одиницю зміни рудного навантаження в осьовій та приосьовій зонах в 1,7, а у проміжній та периферійній зонах – в 2,2 рази менше, ніж при роботі доменної печі без використання пиловугільного палива.

9. Доцільно зміну розподілу компонентів шихти по радіусу колошника здійснювати ітераційним шляхом - на першому етапі приближення крок зміни вмісту компонента можливо прийняти 5 – 10% (відн.) загального вмісту компонента у шихті. Склад суміші шихтових матеріалів із спрямовано зміненим складом компонентів використовується у якості початкових даних для розрахунково – аналітичного прогнозу високотемпературних властивостей суміші. Переважним впливом є зміна характеристик розподілу основних компонентів шихти. Зміну розподілу добавок більш доцільно

використовувати, як додатковий керуючий вплив, у зв'язку з істотними технологічними обмеженнями, накладеними на розподіл добавок по радіусу колошника.

10. На основі встановлених зв'язків параметрів пластичної зони з показниками розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника доменної печі (рудне навантаження та вміст компонентів шихти в зонах колошника) розроблено спосіб обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі. Розроблено блок - схему вирішення задачі обґрунтування вибору управляючих впливів корегуванням параметрів режиму завантаження шихти з метою забезпечення формування раціональної пластичної зони в доменній печі.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконаний аналіз відомих методів визначення форми та положення пластичної зони в доменній печі та заснованих на цій інформації способів управління доменною плавкою показав, що найбільшу перспективу подальшого використання для вирішення задач підвищення ефективності плавки шляхом управління формуванням пластичною зоною має розробка нових методів оперативного визначення її параметрів із застосуванням різних засобів контролю розподілу шихти та газового потоку на доменних печах. Показано, що одним з основних способів впливу на основні параметри пластичної зони доменної печі є режим завантаження шихтових матеріалів, який визначає величину площі поверхні плавлення залізозмісних матеріалів (нижню поверхню пластичної зони) та товщину «кокових вікон».

2. Удосконалена математична модель визначення площі поверхні плавлення пластичної зони. Запропонований підхід передбачає розрахунково - аналітичне визначення тепла, яке утворюється у нижній зоні доменної печі, на відміну від відомого, згідно з яким ця величина задається константою та не враховує особливості поточної технології.

3. Запропоновано новий метод визначення параметрів пластичної зони у доменній печі, оснащених термовимірювальними зондами над поверхнею засипу. Метод базується на систематизованій сукупності математичних моделей із застосуванням нового способу визначення ліній розм'якшення та плавлення у доменній печі, який передбачає використання інформації, отриманої від термовимірювальних зондів або інших засобів контролю розподілу температур газового потоку та поверхні засипу.

4. Виконано аналіз технологічних показників роботи доменної печі у чотирьох дослідних періодах, які відрізняються технологічними умовами плавки, зокрема використанням різних видів паливних добавок: робота без паливних добавок у дутті, з природним газом у дутті, з природним газом та пиловугільним паливом,

з пиловугільним паливом. Вибір базових режимів здійснено шляхом визначення найбільш економічного та стабільного інтервалу роботи доменної печі в межах кожного із чотирьох досліджуваних періодів за допомогою запропонованого показника ефективності плавки ( $\epsilon$ ).

5. Використовуючи запропонований метод визначення форми та положення пластичної зони в доменній печі на основі розрахунку показників розподілу мас та хімічного складу суміші компонентів шихти в кільцевих зонах колошника при роботі печі у чотирьох досліджуваних періодах, за допомогою моделей прогнозування високотемпературних властивостей залізовмісних матеріалів, визначені температури початку їх розм'якшення та плавлення. Виконані розрахункові дослідження щодо визначення загального тепла у нижній частині доменної печі та площі поверхні плавлення, а також визначені координати положення ліній розм'якшення і плавлення та виконано візуалізацію розрахованих меж пластичної зони у доменній печі для чотирьох досліджуваних періодів її роботи.

6. Для підтвердження адекватності запропонованого методу визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі, оснащених термовимірювальними зондами над поверхнею засипу шихти, виконано факторний аналіз впливу технологічних умов доменної плавки на положення пластичної зони у доменній печі. Результати факторного аналізу дозволяють зробити висновок, що наявні зв'язки досліджених величин, які характеризуються отриманими факторними навантаженнями, підтверджують обґрунтованість та достовірність визначення положення пластичної зони в доменній печі за допомогою запропонованого методу.

7. Розроблено критерій оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі, оснащених термовимірювальними зондами над поверхнею засипу шихти. Відсутність технологічних параметрів у складі розробленого критерію дозволила підтвердити достовірність його оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі шляхом аналізу та встановлення зв'язків

критерію з основними технологічними параметрами процесу плавлення. Виконані розрахункові дослідження показали, що запропонований критерій може бути використаний для оцінки раціональності форми та положення пластичної зони доменної печі в технологічних умовах плавки, що склалися.

8. Виявлені взаємозв'язки вертикальних координат точок лінії плавлення з температурою газу над поверхнею засипу та рудним навантаженням у рівних за площею кільцевих зонах доменної печі, що свідчить про можливість розробки методів контролю положення та форми пластичної зони з використанням даних термовимірювальних зондів, а також про можливість корегування параметрів цієї зони шляхом зміни розподілу рудного навантаження по радіусу колошника доменної печі. Встановлено, що зв'язок вертикальної координати лінії плавлення у кільцевій зоні з рудним навантаженням у цій зоні характеризується достатньо високими значеннями коефіцієнтів достовірності апроксимації, які складають від 0,5 до 0,58. Згідно з отриманими результатами встановлено, що зміна рудного навантаження на одну й ту ж величину у різних зонах доменної печі може обумовлювати зміщення лінії плавлення, яке відрізняється у 3 – 5 рази: для заданої зміни вертикальної координати лінії плавлення в осьовій та приосьовій зонах потрібна, як правило, значно менша зміна рудного навантаження, ніж у проміжній та периферійній зонах.

9. Встановлено зв'язки значень вертикальних координат точок перетину середніх ліній кільцевих зон з лініями розм'якшення та плавлення та значень відношення кількості окатишів і агломерату у цих зонах. Коефіцієнт достовірності апроксимації зв'язків відношення вмісту окатишів до вмісту агломерату та різниці вертикальних координат поверхонь (товщини) пластичної зони у кільцевих зонах доменної печі лінійною функцією складає 0,52. Встановлено взаємозв'язки різності температур розм'якшення та плавлення з вказаним відношенням, які характеризуються високим коефіцієнтом достовірності апроксимації, який складає не менше ніж 0,96. Отримані результати свідчать про можливість використання зміни співвідношення

основних залізовмісних компонентів у кільцевій зоні для корегування геометричних параметрів пластичної зони.

10. Управління параметрами пластичної зони, вибір напрямку та величини управляючого впливу у кожному конкретному випадку повинні ґрунтуватися на результатах математичного моделювання розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника, визначенні складу сумішей компонентів шихти у різних зонах печі та прогнозуванні їх високотемпературних властивостей та тенденцій зміни цих властивостей при зміні компонентного складу суміші. Для регулювання розподілу конкретного компонента змішаної залізородної порції по радіусу колошника у якості управляючого параметру може бути використана уставка розташування дози цього компонента на конвеєрі або у скіпі. Отримані формули для визначення цієї величини при заданих вмісті компонента у кільцевій зоні та вмісті його у шихті для доменних печей з різною структурою системи завантаження.

11. На основі встановлених зв'язків параметрів пластичної зони з показниками розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника доменної печі (рудне навантаження та вміст компонентів шихти в зонах колошника) розроблено спосіб обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі. Розроблено блок - схему вирішення задачі обґрунтування вибору управляючих впливів корегуванням параметрів режиму завантаження шихти з метою забезпечення формування раціональної пластичної зони в доменній печі.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Большаков В. И., Муравьева И. Г., Гладков Н. А., Белошапка Е. А. Анализ методов определения формы и положения пластичной зоны в доменной печи. *Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. Днепропетровск. УДК: 669.162.21:005, 2011. № 23. С. 80–89.
2. Борц Ю. М., Серов Ю. В. Контроль и управление зоной плавления в доменных печах. *Черная металлургия. Бюллетень НТЭИ*. 1988. № 13. С. 1832.
3. Ueda S., Miki T., Murakami T., Nogami H., & Sato T.(2013). Agenda for low reducing agent operation of blast furnace - Reduction and melting phenomena of iron ore. *Tetsu-To-Hagane Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 99(1), 11. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.99-1>.
4. Некрасов З. И., Покрышкин В. Л., Бузоверя М. Т. Исследование состава твердых и жидких материалов в шахте и распаре доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup>. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1969. № 4. С. 3–12.
5. Некрасов З. И., Бузоверя М. Т. Исследование процессов восстановления в шахте доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup>. *Сталь*. 1969. № 2. С. 110–115.
6. Ивао Н. Разработка зондов. I. Гибкий вертикальный зонд погружения. *Тецу то хаганэ*. 1983. Т. 69. № 12. С. 867.
7. Хосидэ Й., Такаги С., Юномура А. Совершенствование технологии доменной плавки в Японии. *Черные металлы*. 1980. 325–26. С. 3–7.
8. A. United States Patent № 4,641,083. Date of patent 3.02.1987. Method and apparatus for supervising charges in blast furnace using electromagnetic waves. Appl. № 519,245. Filed 1.08.1983.
9. Шюрман Э., Гуденау Г. В., Петерс К. Х. Исследование пластичной зоны на доменной печи завода в Швельгерне. *Черные металлы*. 1982. № 6–7. С. 9–14.
10. Петерс К. Х., Потт Г., Петерс М. Исследование причин нарушения газопроницаемости в доменной печи. *Черные металлы*. 1986. № 22. С. 10–20.

11. Gudenau H. W., Kreibich K.. On the cohesive zone phenomena in the blast furnace. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 1982. № 11. P. 107–114.

12. Никитин Г. М. Формирование вязкопластичной зоны – как способ эффективного управления доменным процессом: диссертация на соискание ученой степени д-ра техн. наук: 05.16.02 / Геннадий Михайлович Никитин. Екатеринбург, 1996. 306 с.

13. Инада С., Кабаяси И., Исабэ М. Разработка и применение математической модели пластичной зоны доменной печи. *Тэцу то хаганэ*. 1984. Т. 34, № 4. С.59–64.

14. Непрерывное определение профиля зоны когезии в доменной печи. Хатига С, Оно Р, Фусэ К и др. *Тэцу то хаганэ*. 1986. Т. 36. №3 . С. 77–80.

15. Vecchida G., Giuli M. Amelioration realisees pour la deuxieme campagne du hautfourneau 5 de Tarente. *Revue de Metallurgie – CIT*. 1984. Vol. 81. № 5. P. 369–383. DOI 10.1051/metal/198481050369.

16. Betriebsverfahren mit dem Prozedursteuerungs und Optimierungssystem für den Hochofen Schweigern / Peters K. H., Alpeter W., Bachhofen H. Y. et al. *Stahl and Eisen*. 1984. Bd. 104. № 14. С. 59–62.

17. Development of monitoring system for lumpy and cohesive zones in the blast furnace / Yamamoto T, Shokyu T, Kanoshima H. et al. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1982. № 10. P. 774. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.22.774>.

18. Математическая модель зоны размягчения – плавления доменной печи и ее практическое применение / ВЦП, № И-2532. Пер. ст.: Ohno Y., Kondo K., Fukushima T. *Revue de Metallurgie. CIT*. 1983. № 10. P. 809–825, <https://doi.org/10.1051/metal/198380100809>.

19. Кувабара М. Оценка формы зоны размягчения и оплавления в доменной печи с помощью математической модели. *Тэцу то хаганэ*. 1981. Т. 67, № 12. С. 752.

20. Измерение параметров кусковой зоны доменной печи с использованием полученных результатов / Ёкэда М., Сёкю Т., Мацуи М. и др. *Тэцу то хаганэ*. 1984. Т. 70. № 9. С. 1146–1152.

21. Павлов А. В., Паршаков В. М., Полинов А. А., Третьяк А. А. Роль зоны плавления в работе доменной печи и в управлении ею. *Сборник трудов международного Союза Доменщиков*. 2017. Вып. 1. С. 17–34.

22. Непрерывный автоматический контроль параметров зоны плавления с помощью двумерной математической модели, функционирующей в реальном масштабе времени в составе АСУ ТП ДП-2 и ДП-10 ОАО «ММК» / Паршаков В. М., Полинов А. А., Павлов А. В. и др. *Сборник трудов международного Союза Доменщиков*. 2017. Вып. 1. С. 54–69.

23. Method for determining position of root of blast furnace cohesive zone through multi-source information fusion. Patent China CN 103593540A. Publication 19.02.2014, :<https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-12>.

24. Li S. Z., Cheng Jian, Ma W. Q. A Method to Forecast the Cohesive Zone of Blast Furnace. *Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd*. Dec. 2004, Vol. 471–472, P. 358–361. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.471-472.358.

25. Dong X. F., Yu A. B., Chew S. J., Zulli P. Modeling of Blast Furnace with Layered Cohesive Zone. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2009. *Metallurgical and Materials Transactions B*. April 2010, Vol. 41B, P. 330–349. <https://doi.org/10.1007/s11663-009-9327-y>

26. Bernasowski Mikolaj, Klimczyk Arkadiusz, Stachura Ryszard. Calculation of Coke Layers Situation in the Cohesive Zone of Blast Furnace. *Materials*. 2021. Vol. 14(1), P. 192. <https://doi.org/10.3390/ma14010192>.

27. Guha Mriganshu. Revealing cohesive zone shape and location inside blast furnace. June, 2017. *Ironmaking & Steelmaking*. Vol. 45(6). P. 1-6. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1338385>.

28. Guha Mriganshu, Rai Shailendra, Agarwal M.K., Ramna R.V. Model for real-time prediction of cohesive zone shape and location inside blast furnace. *Iron and Steel Technology Conference Proceedings* 2013/01/01. P. 657–664.

29. Dong Fu, Chenn Q. Zhou, Yongfu Zhao, John D'Alessio, Kyle J. Ferron. NUMERICAL SIMULATION OF BLAST FURNACE SHAFT PROCESS. *Proceedings of 4th International Conference on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking*. Düsseldorf, 27 June–1 July 2011. P. 1–10.

30. Matsuzaki Shinroku, Shinotake Akihiko, Naito Masaaki, Nishimura Tsunehisa, Kunitomo Kazuya, Sugiyama Takashi. Development of Mathematical Model of Blast Furnace. *Nippon Steel Technical Report*. JULY 2006. No. 94. P. 87–95. UDC 669.162.26 : 681.3.

31. Jiao Lulu, Kuang Shibo, Yu Aibing, Li Yuntao, Mao Xiaoming, Xu Hui. Three-dimensional modeling of an ironmaking blast furnace with a layered cohesive zone. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. Feb. 2020. P. 258–275. doi.org/10.1007/s11663-019-01745-3.

32. Dong Fu, Chenn Q. Zhou, Yongfu Zhao, John D'Alessio, Kyle J. Ferron. Numerical simulation of blast furnace shaft process. *Proceedings of 4th International Conference on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking*. Dusseldorf, 27 June–1 July 2011. P. 1–10.

33. Dong Fu, Yan Chen, Yongfu Zhao, John D'Alessio, Kyle J. Ferron, Chenn Q Zhou. CFD modeling of multiphase reacting flow in blast furnace shaft with layered burden. *Applied Thermal Engineering*. May 2014. Vol. 66. P. 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.065>.

34. Dong Fu, John Dalessio. Prediction of the cohesive zone in a blast furnace. *AISTech 2011 Proceedings*. Vol. 1. P. 695–708.

35. Zhou Ping, Jia-ling Li, Qi-quan Wen, En-xue Zu, Wei-hua Gui, Zhou Chenn Q. Soft-sensing method of cohesive zone shape and position in blast furnace shaft. *IFAC PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, Iss. 21. P. 48–52. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.391>.

36. Jialing Li, Zhu Rongjia, Zhou Ping, Song Yan-po, Zhou Chenn Q. Prediction of the cohesive zone in a blast furnace by integrating CFD and SVM modeling. *Ironmaking & Steelmaking* June 2020. Vol. 48, Iss. 3. P. 284–291. DOI:10.1080/03019233.2020.1771893.

37. Fan Zhengyun, Natsui Shungo, Ueda Shigeru, Yang Tianjun, Kano Junya, Inoue Ryo, Ariyama Tatsuro. Transient Behavior of Burden Descending and Influence of Cohesive Zone Shape on Solid Flow and Stress Distribution in Blast Furnace by Discrete Element Method. *ISIJ International*. 2010. Vol. 50, № 7. P. 946–953. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.946>.

38. Kuang Shibo, Li Zhaoyang, Yu Aibing. Review on modeling and simulation of blast furnace. *Steel research int.* 2018. Vol. 89, № 1. <https://doi.org/10.1002/srin.201700071>.

39. (ПФЭ 19) Ueda Shigeru, Kon Tatsuya, Kurosawa Hiroyuki, Natsui Shungo, Ariyama Tatsuro, Nogami Hiroshi. Influence of Shape of Cohesive Zone on Gas Flow and Permeability in the Blast Furnace Analyzed by DEM-CFD Model. *ISIJ International*. 2015. Vol. 55, № 6, P. 1232–1236. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.1232>.

40. Kon Tatsuya, Natsui Shungo, Matsushashi Shohei, Ueda Shigeru, Inoue Ryo, Ariyama Tatsuro. Influence of Cohesive Zone Thickness on Gas Flow in Blast Furnace Analyzed by DEM-CFD Model Considering Low Coke Operation. *Steel research int.* 2013. Vol. 84, № 11, P. 1146–1156. <https://doi.org/10.1002/srin.201300025>.

41. Товаровский И. Г. Доменная плавка : монография. 2-е издание. Днепропетровск : Пороги, 2009. 768 с.

42. Муравьева И. Г., Тогобицкая Д. Н., Семенов Ю. С., Иванча Н. Г., Белькова А. И., Шумельчик Е. И., Степаненко Д. А. Создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой. Новые подходы : монография. Киев. : Наукова думка, 2019. 272 с.

43. Разработка мероприятий по регулированию газопроницаемости столба шихты в доменной печи (Промышленные опыты) / Крафт В.и др. *Черные металлы*. 1987. № 13. С. 15–25.

44. Модельные опыты исследования газопроницаемости в доменной печи при вдувании больших количеств угольной пыли / Гуденау Х. В., Крайбих К., Кортах Б. и др. *Черные металлы*. 1988. № 19. С. 10–19.

45. Гуденау Х. В., Крайбих К., Петерс К. Х. Оптимизация профиля пластичной зоны доменной печи. *Черные металлы*. 1981. № 3. С. 13–18.

46. Эсфельд Г., Цишкале В, Кляффен У. Контроль газопроницаемости столба шихты в доменной печи. С. 17–19.

47. Петерс К. Х., Потт Г., Петерс М. Исследование причин нарушения газопроницаемости в доменной печи. *Черные металлы*. 1986. № 22. С. 10–20.

48. Повышение производительности доменных печей / Хартинг В., Лангнер К., Люнгер Г. Б. и др. *Черные металлы*. 1996. С. 17–25.

49. Экспериментальная оценка влияния режима загрузки на формирование пластичной зоны доменной печи / Егоров Н. А., Ковшов В. Н., Петренко В. А. и др. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1984. № 12. С. 25–26.

50. Работа доменной печи в форсированном режиме / Гришкова А. А., Клемперт В. М., Федулов Ю. В. и др. *Сталь*. 1987. № 9. С. 18.

51. Сысоев Н. П. Теория и технология доменной плавки с пониженной интенсивностью: дис. на соискание ученой степени доктора тех. Наук : 05.16.02 / Николай Петрович Сысоев. М., 1993. С. 169–171.

52. Никитин Г. М. Внедрение методов управления вязкопластичной зоной в доменных печах. Караганда : ДНТИ, 1990. 82 с.

53. Betriebsverfahren mit dem Prozedursteuerungs und Optimierungssystem für den Hochofen Schweigern \ Peters K. H., Alpeiter W., Bachhofen H. Y. et al. *Stahl and Eisen*. 1984. Bd. 104, № 14. S. 59–62.

54. Шюрман Э., Гуденау Г. В., Петерс К. Х. Динамическое изменение формы и положения пластичной зоны в доменной печи. *Черные металлы*. 1982. № 15/16. С. 17–20.

55. Шюрман Э., Гуденау Г. В., Петерс К. Х. Исследование пластичной зоны на доменной печи завода в Швельгерне. *Черные металлы*. 1982. № 6–7. С. 9–13.

56. Гуденау Г. В., Крайбих К., Номия Е. Влияние пластичной зоны на распределение газового потока в доменной печи. *Черные металлы*. 1979. № 2. С. 7–13.

57. Петерс К. Х., Пот Г., Петерс М. Исследование причин нарушения газопроницаемости в доменной печи. *Черные металлы*. 1986. № 22. С. 10–20.

58. Хосидэ Й., Такаги С., Юномура А. Совершенствование технологии доменной плавки в Японии. *Черные металлы*. 1980. № 25/26. С. 3–14.

59. Близииков В. С. Доменное производство Японии в новом столетии, исследования и технические разработки. *Новости черной металлургии за рубежом*. 2007. №4. С. 22–31.

60. Павлов А. В., Паршаков В. М., Полинов А. А., Третьяк А. А. Роль зоны плавления в работе доменной печи и в управлении ею. *Сборник трудов международного Союза Доменщиков*. 2017. Вып. 1. С. 17–34.

61. Порядок проведения операций по достижению оптимальных значений параметров зоны плавления и наилучших показателей плавки. / В. М. Паршаков, А. А. Полинов, А. В. Павлов и др. *Сборник трудов международного Союза Доменщиков*. 2017. Вып. 1. С. 69–75.

62. Гуденау Г. В., Крайбих К., Номия Е. Влияние пластичной зоны на проницаемость столба шихты в доменной печи. *Черные металлы*. 1980. № 25/26. С. 7–14

63. Курунов И. Ф. Совершенствование технологии и управления доменной плавкой за рубежом. *Черная металлургия*. 1981. № 18 (892). С. 18–35.

64. Гуденау Г. В., Крайбих К. Иошитака Н. Зоны когезии и размягчения как распределители газовых потоков в доменной печи. *Черные металлы*. 1979. № 22. С. 1204–1211.

65. Муравйова І. Г., Іванча М. Г., Щербачов В. Р., Вишняков В. І., Єрмоліна К. П., Білошапка О. О., Ходотова Н. Є. Метод визначення положення і форми пластичної зони в доменній печі з використанням показників розподілу температури газового потоку. *Збірник наукових праць Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України «Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії»*. 2022. Вип. 36.

66. Ivancha N. G., Murav'eva I. G., Shumel'chik E. I., Vishnyakov V. I., Semenov Yu.S. Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace. *Metallurgist*. May 2018. Vol. 62, Iss. 1–2, P. 95–100.

67. Іванча М. Г., Вишняков В. І., Муравйова І. Г., Щербачов В. Р., Білошапка О. О., Єрмоліна К. П. Удосконалення методів розрахунку розподілу компонентів шихти в об'ємі доменної печі. Вип. 2.

68. Приходько Э. В., Тогобицкая Д. Н., Хамхотько А. Ф., Степаненко Д. А. Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем. Днепропетровск : Пороги, 2013. 339 с.

69. Хамхотько А. Ф., Белькова А. И., Циватая Н. А., Скачко А. С., Лихачев Ю. М. Информационное обеспечение задач прогнозирования свойств щелочесодержащих шихтовых материалов доменной плавки. *Системные технологии. Сборник научных трудов*. Днепропетровск. 2013. Вып. 2 (85). С. 155 – 160.

70. Циватая Н. А., Тогобицкая Д. Н., Гладков Н. А. Прогнозирование свойств щелочесодержащих доменных шлаков на основе параметров межатомного взаимодействия. *Металлургические процессы и оборудование*. 2014. № 1. С. 19–26.

71. Тогобицька Д. М., Белькова А. І., Степаненко Д. О., Цюпа Н. О., Ліхачов Ю. М. Розвиток модельного комплексу експертної системи контролю та

управління шлаковим режимом доменної плавки в сучасних шихтових та технологічних умовах. *Фундаментальные и прикладные проблемы металлургии: сб. научн. трудов.* 2020. Вып. 34. С. 30–46.

72. Тогобицька Д. М., Белькова А. І., Муравйова І. Г., Іванча Н. Г., Степаненко Д. О., Нестеров О. С., Ліхачов Ю. М. Розробка та випробування алгоритмічного забезпечення експертної системи вибору оптимального складу багатокомпонентної доменної шихти у конкретних умовах роботи доменних печей. *Збірник наукових праць Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України «Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії».* 2022. Вип. 36. С. 67-81.

73. Муравьева И. Г., Тогобицкая Д. Н., Белькова А. И., Иванча Н. Г., Нестеров А. С. Прогнозирование состава и свойств конечных продуктов плавки на основе интегральных показателей доменной шихты и температурно-дутьевого режима. *Сталь.* 2021. № 8. С. 2–7.

74. Muravyova I. G., Togobitskaya D. N., Bel'kova A. I., Ivancha N. G., Nesterov A. S. Prediction of Composition and Properties of Final Smelting Products Based on Integral Indices of the Blast Furnace Burden and Temperature Blasting Mode. *Steel in Translation.* 2021. Vol. 51, № 8. P. 531–537. DOI: 10.3103/S096709122108009X.

75. Гуденау Г. В., Стендиш Н., Герлах В. Физические условия в области пластической зоны доменной печи. Часть 1. Основные принципы. *Черные металлы.* 1992. № 8. С. 34–41.

76. Определение теоретической температуры горения при вдувании в горн доменной печи природного газа и пылеугольного топлива / Д. А. Кассим, В. П. Лялюк, А. К. Тараканов и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2016. № 2. С 38–43.

77. Рамм А. Н. Определение технических показателей доменной плавки. Ленинград, 1960. 37 с.

78. Васюра Г. Г. Определение показателей доменной плавки при использовании пылеугольного топлива. *Бюллетень черная металлургия*. 2006. № 8. С. 29–33.

79. Петерс К. Х., Альтпетер В., Бахховен Г. Ю., Гюнтер Г., Крайбих К. Х. Опыт эксплуатации оптимизированной системы управления процессом доменной плавки в Швельгерне. *Черные металлы*. 1984. № 14. С. 27–30.

80. Иберла К. Факторный анализ. Пер. с нем. В. М. Ивановой. М. : Статистика, 1980. 399 с.

81. Kreibich K., Yotaro O., Fukushima T., Gudenau H. Schmelzlinienbestimmungsmodell zur vergleichenden Leistungsbeurteilung von Hochofenperioden. *Arch Eisenhüttenwes.* 1982. Vol. 53, № 1. P. 21–28.

82. Иванча Н. Г., Муравьева И. Г., Вишняков В. И., Щербачев В. Р., Ермолина К. П. Повышение энергоэффективности доменной плавки за счет выбора рациональных параметров режима загрузки многокомпонентной шихты. *Молдавия, Журнал «Проблемы региональной энергетики»*. 2022.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.05>

83. Муравйова І. Г., Тогобицька Д. М., Белькова А. І., Иванча М. Г., Нестеров О. С., Степаненко Д. О., Вишняков В. І. Створення інтелектуальних систем вибору оптимального складу багатоконпонентної доменної шихти. Нові підходи : монографія. Київ : Науково-видавнича рада, 2022. 232 с.