

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

СЕЛЕГЕЙ АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 669.162.28-66.046.511.2

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ УПРАВЛІННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯМ
ДОМЕННОЇ ПЕЧІ ШИХТОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ З УРАХУВАННЯМ
ЇХ ДИСПЕРСНОСТІ**

Спеціальність: 05.16.02–металургія чорних і кольорових металів та спеціальних
сплавів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національній металургійній академії України
Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Іващенко Валерій Петрович,
Національна металургійна академія України,
МОН України, перший проректор, м. Дніпро.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий
співробітник
Меркулов Олексій Євгенович,
заступник директора Інституту чорної металургії
ім. З.І. Некрасова НАН України,
м. Дніпро.

доктор технічних наук, професор,
Пазюк Михайло Юрійович,
завідувач кафедри автоматизованого управління
технологічними процесами Інженерного
навчально-наукового інституту Запорізького
національного університету.
м. Запоріжжя.

доктор технічних наук, професор,
Сігарьов Євген Миколайович,
завідувач кафедри металургії чорних металів ім.
професора В.І. Логінова Дніпровського
державного технічного університету,
м. Кам'янське

Захист відбудеться «__» вересня 2021р. об 11-00 на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 при Національній металургійній
академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національної
металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий «__» _____ 2021р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.084.03,
доктор технічних наук, професор

Людмила Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Металургійний комплекс відноситься до стратегічних галузей національної промисловості, грає важливу роль в наповненні дохідної частини торгового балансу, забезпечує життєдіяльність багатьох регіонів і міст країни. В металургійній галузі виробництво чорних металів займає провідне місце і становить близько 95% від загального обсягу виробництва металів. За даними фахівців Всесвітньої асоціації сталі, внесок металургійного комплексу в виробництво глобального валового внутрішнього продукту (ВВП) оцінюється у розмірі 2900 млрд. дол. США (або 3,8% глобального ВВП), в глобальну зайнятість трудових ресурсів - в 96 млн. робочих місць. Найбільш поширеним способом отримання заліза з руди є доменний процес, який залишиться основною технологією отримання первинного заліза з природної рудної і техногенної сировини, а чавун - основним компонентом металошихти у виробництві сталі. Переважна більшість технологій отримання сталі в Україні та світі потребує доменного чавуну. Перед усім це виплавка сталі у конвертерах та електропечах. Невід'ємною технологічно-економічною передумовою збільшення обсягів виробництва і споживання сталі є зростання в світових масштабах виробництва чавуну, переважна кількість якого (91,6%) проводиться методом доменної плавки. Фахівці зазначають, що як у близькій, так і далекій перспективі, ця тенденція зберігатиметься. В сучасних економічних та екологічних умовах промислового виробництва зростають вимоги до раціонального використання природних ресурсів та зменшення показників шкідливого навантаження на навколишнє середовище. Важливим науково-технічним завданням ефективного розвитку доменного виробництва є підвищення продуктивності, зниження питомої витрати сировини та енергоносіїв. Розв'язання цього завдання можливе заходами як оновлення основного устаткування для завантаження доменних печей, так і вдосконаленням режимів його роботи. Одним з основних прийомів управління доменним процесом є раціоналізація режимів завантаження печі.

Вирішенню проблеми ефективності завантаження доменних печей присвячені наукові роботи відомих науковців - академік Академії Наук України д.т.н., проф. Большаков В.І., д.т.н., проф. Грузинов В.К., д.т.н., проф. Ковшов В.М., д.т.н., проф. Логінов В.І., д.т.н., проф. Тарасов В.П., д.т.н., проф. Лялюк В.П., д.т.н., проф. Муравйова І.Г., д.т.н., с.н.с. Меркулов О.Є., д.т.н., проф. Товаровський Й.Г., д.т.н., проф. Довгалюк Б.П., д.т.н., проф. Тараканов А.К., д.т.н., проф. Бочка В.В. Провідними установами з цього питання є Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України та Національна металургійна академія України. В численних наукових працях автори вказують на багатокомпонентність доменної шихти, що обумовлено прагненням підвищення ефективності виробництва чавуну. Раціональне розподілення компонентів шихти на колошнику печі забезпечує максимальне використання потенціалу газового потоку. В свою чергу, взаємопов'язаними є параметри режиму завантаження та розподіл матеріалів по радіусу колошника. Накопичений досвід наукових та експериментальних досліджень вказує на

необхідність встановлення характеру взаємозв'язку та розробки програм завантаження сучасних доменних печей. Змінення технологічних умов роботи доменних печей потребує коригування існуючих режимів завантаження. Розвиток систем моніторингу процесів доменної плавки значно розширює можливості оперативного коригування доменного процесу з метою підвищення продуктивності та зменшення питомої витрати енергоносіїв. Основним завданням раціонального режиму завантаження є підвищення ефективності використання теплового та хімічного потенціалу відновлювальних газів в товщі стовпа шихтових матеріалів печі. Застосування безконусних завантажувальних пристроїв в значній мірі розширило можливості з розподілу шихтових матеріалів на колошнику.

Сучасний ступінь автоматизації доменного виробництва в значній мірі залежить від наявності чіткого алгоритму роботи та корекції режимів завантаження конкретної доменної печі. На сьогоднішній день можливості оперативного коригування розподілу шихтових матеріалів на колошнику за допомогою безконусних завантажувальних пристроїв використовуються в недостатньому обсязі. Технологічні та шихтові умови роботи доменної печі постійно змінюються. Для ефективного усунення негативних наслідків змінення потрібен чіткий алгоритм корекції управляючих впливів завантажувального пристрою печі, який би базувався на комплексному аналізі не тільки фактичного складу колошникових газів, а й фактичного розподілення шарів шихтових матеріалів вздовж радіусу колошника, що є актуальним для доменних печей великого корисного об'єму. Це потребує достовірної та своєчасної інформації про характер руху матеріалів з урахуванням їх фракційного складу по тракту завантажувального пристрою та знаходженням на поверхні засипу шихти.

Високопродуктивна і економічна робота доменної печі багато в чому залежить від того, як організовано рух і розподіл газів і шихти в її робочому просторі. Одним з основних факторів, що впливає на характер руху газів в печі, є розподіл шихти на колошником під час завантаження. Цим, в свою чергу, пояснюється прагнення до вдосконалення конструкцій завантажувальних пристроїв доменної печі і розширення можливостей в їх управлінні

Комплексний розв'язок науково-практичної проблеми підвищення техніко-економічних показників роботи сучасної доменної печі має ґрунтуватися на інтегральному аналізі як газодинамічних показників роботи печі, так і характеристик розподілення та руху шихтових матеріалів у печі. Поєднання даних по розподілу газів по радіусу колошника та розташуванню шихтових матеріалів в печі з конкретними характеристиками має бути використано для забезпечення найкращих умов відновлення залізовмісної сировини за умови найнижчої витрати енергоносіїв у доменному процесі. Застосуванням систем моніторингу технологічних параметрів доменної плавки та розвиток засобів автоматизації у сукупності є значним резервом для вирішення важливої наукової проблеми – підвищення продуктивності та зниження питомої витрати енергоносіїв для доменного процесу, що потребує

комплексного підходу для оперативної корекції розподілення матеріалів на колошнику сучасної доменної печі.

Враховуючи вищезазначене, вирішення питання підняття продуктивності доменних печей та зменшення питомої витрати енергоносіїв шляхом раціоналізації розподілення шихтових матеріалів на колошнику з урахуванням газодинамічних параметрів плавки та гранулометрії шихти, а також фактичного її розміщення, є важливою науково-практичною проблемою, розв'язок якої в значній мірі допоможе забезпечити найкращі умови функціонування обладнання та металургійного підприємства в цілому.

Зв'язок роботи з науковими програмами, завданнями, планами, темами.

Поставлені і отримані в дисертаційній роботі конкретні рішення актуальної проблеми в області теорії і технології одержання металів та сплавів відповідають пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України на період до 2021 року: згідно з п.1 «Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави; п.3 «Енергетика та енергоефективність» Статті 3 Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2021 року Закону України від 11.07.2001 № 2623-III; Державної програми з розвитку науки і техніки (згідно закону України № 2519-17 від 12.10.2010 р.). Зміст роботи відповідає сучасним напрямкам міжвузівської комплексної цільової програми «Метал», планам науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України та Національної металургійної академії України у відповідності до напрямків науково-дослідної діяльності кафедри теоретичних основ металургійних процесів. Науково-технічні проблеми, вирішені в роботі, відповідають пріоритетам розвитку фундаментальних досліджень в області теорії і технології доменного виробництва.

В основу дисертації покладені результати наукових досліджень, що увійшли до звіту з науково-дослідної роботи «Гнучка система формування багатокомпонентних порцій шихти для завантаження в доменну піч», № Держ. реєстрації 0116U008358.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності доменного процесу за рахунок забезпечення раціональних показників газодинаміки колошникової зони печі із застосуванням інформації систем моніторингу стану поверхні засипу та фактичних показників гранулометрії шихтових матеріалів.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- розглянути і проаналізувати відомі методи управління рельєфом поверхні засипу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі з точки зору їх застосування спільно з системами моніторингу поверхні засипу шихти;

- дослідити особливості реалізації управління рельєфом засипу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі за допомогою систем моніторингу поверхні засипу та аналізу колошникового газу;

- визначити і обґрунтувати методика, що дозволяє досягати раціональних параметрів газодинаміки сухої зони доменної печі за допомогою управління системою завантаження;

- дослідити зміни газодинамічних параметрів плавки при коригуванні програми завантаження доменної печі;

- визначити вплив шихтових умов ведення доменної плавки на газодинаміку колошникової зони;

- оцінити в промислових умовах ефективність реалізації корегування запропонованої методики зміни рельєфу засипу шихтових матеріалів;

- визначити умови та комплексні методи забезпечення заданої програми завантаження за допомогою керуючих впливів завантажувального пристрою печі;

- запропонувати і обґрунтувати методи корекції траєкторій потоків шихтових матеріалів колошниковому просторі;

- розробити і обґрунтувати методи інтенсифікації процесу доменної плавки за допомогою зміни керуючих впливів завантажувальних пристроїв доменних печей з використанням інформації щодо геометрії поверхні засипу та аналізу колошникового газу у режимі реального часу;

- проаналізувати можливості забезпечення найбільш раціональних параметрів газодинаміки верхньої зони доменної печі за допомогою управління системою завантаження;

- розробити, обґрунтувати та експериментально перевірити ефективність моніторингу процесу завантаження доменної печі безконусним завантажувальним пристроєм на підставі аналізу параметрів колошникового газу;

- дослідити і визначити взаємозв'язок між параметрами завантаження шихтових матеріалів на колошнику доменної печі і характеристиками складу колошникового газу;

- дослідити кореляційні зв'язки між техніко-економічними показниками роботи доменної печі та газодинамічним станом «сухої зони» доменної печі;

- апробувати і оцінити точність коригування ходу доменної плавки за допомогою зміни параметрів завантаження і раціоналізацією складу колошникового газу по радіально-кільцевим зонам.

Об'єкт дослідження: динамічні процеси руху шихтових матеріалів по трактах завантажувальних пристроїв доменних печей різних типів та газодинамічні процеси, що впливають на відновлення залізовмісної частини шихти у колошниковій зоні.

Предмет дослідження: Режими роботи доменної печі при різних параметрах завантаження з урахуванням гранулометричних характеристик шихтових матеріалів, що завантажуються на колошник. Формування раціонального газодинамічного стану колошникової зони печі для створення найкращих умов відновлення заліза.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використовувалися комплексні методи досліджень. У роботі використаний метод теоретичних досліджень динамічних параметрів потоку шихти з використанням теорії руху сипучих середовищ і математичного моделювання взаємодії потоку шихти і напрямних елементів. Теоретичні дослідження виконувалися з використанням сучасних методів математичного моделювання і за допомогою прикладних комп'ютерних програм: Excel, Mathcad. Експериментальні дослідження виконувалися на діючому заводському обладнанні з використанням методу планування експерименту.

Наукові положення розроблені здобувачем та їхня новизна.

1. Вперше встановлено закономірності зміни швидкості шихтових матеріалів по трактам завантажувального пристрою в залежності від гранулометричного складу потоку доменної шихти при використанні засипних апаратів конусного і безконусного типів, які полягають у реалізації врахування крупності шихти при визначенні координати падіння потоку на поверхню засипу. Це дозволяє підвищити точність прогнозування газодинамічного режиму роботи доменної печі, знизити витрату коксу і природного газу, а також збільшити міжремонтні терміни експлуатації печі

2. Вперше встановлено закономірності комплексного впливу конструктивно-технологічних параметрів систем завантаження доменних печей на рельєф шихти на колошнику. Це дозволило здійснювати оперативну корекцію рельєфу шихти на колошнику, що призвело скорочення витрат енергоносіїв на 1,5%.

3. Вперше встановлені інтегральні закономірності між кінематичними параметрами потоку шихтових матеріалів по елементам систем завантаження і їх пропускною спроможністю. Раніше такі дані носили фрагментарний характер. Це дозволило підвищити ефективність завантаження доменних печей і, як наслідок, підвищити показники плавки в цілому.

4. Вперше експериментально встановлено і теоретично обґрунтовано, що корекцію рельєфу шихтових матеріалів на колошнику можна проводити як окремо зміною кута нахилу лотка-розподільника і величиною відкриття шихтового затвора бункера БЗП так і спільною зміною зазначених параметрів.

5. Вперше отримано залежності для визначення фактичної крупності шихтових матеріалів, що завантажуються безпосередньо на поверхню засипу колошника при використанні завантажувальних пристроїв конусного та безконусного типу.

6. Розроблено алгоритм для ефективного завантаження шихтовими матеріалами доменних печей, обладнаних безконусними завантажувальними пристроями та системами моніторингу поверхні засипу шихтових матеріалів на колошнику.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблені наукові основи корекції програм завантаження доменних печей, що забезпечують раціональні режими плавки на конкретних використовуваних шихтових умовах.

- встановлено та експериментально підтверджено, що для ефективного управління потоками шихтових матеріалів в трактах завантаження необхідно змінювати не тільки кут нахилу лотка-розподільника безконусного завантажувального пристрою, але і кут відкриття шиберного затвора накопичувального бункера. Це дає можливість найбільш точно забезпечувати рудню навантаження по радіально-кільцевих зон колошника доменної печі.

- запропоновано новий метод визначення раціональних параметрів шарів шихтових матеріалів в сухій зоні доменної печі, що забезпечують найкращу газодинаміку при існуючих шихтових умовах.

- запропоновано новий алгоритм роботи автоматичної системи управління завантаженням доменної печі, що дозволяє коригувати програми завантаження для конкретних умов, а також при їх активному зміні.

- підтверджена ефективність техніки моніторингу процесу динамічного зміни профілю засипу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі за допомогою радарної техніки. Розроблений пілотний алгоритм завантаження і його корекції впроваджені в систему автоматичного управління завантаженням доменної печі успішно випробуваний на моделі.

Основні положення дисертації використовуються в навчальному процесі під час виконання магістерських та бакалаврських дипломних робіт студентами Національної металургійної академії України.

Розроблені в дисертаційній роботі методики та технічні рішення щодо визначення раціональних параметрів завантаження доменних печей, технології ведення плавки і основних характеристик завантажувального пристрою, дозволяють аналітично визначати параметри для коригування програм завантаження і створюють основу для повної автоматизації процесу завантаження.

Методики і технічні рішення, отримані в даній роботі, впроваджені на ПрАТ "ДнепроГідроМаш", а також на Золотоніському машинобудівному заводі ім. І. І. Лепсе, з їх допомогою проводиться проектування сучасних завантажувальних пристроїв доменних печей, які плануються до експлуатації на ПАТ ДМКД, ПАТ "Азовсталь", ПАТ "Запоріжсталь".

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійною роботою автора. У дисертації не використані ідеї співавторів публікацій. У роботі автором обґрунтовані і постановлені завдання досліджень, обрані наукові підходи і методи дослідження, розроблено та обґрунтовано методики лабораторних експериментів, проведені теоретичне обґрунтування і реалізація математичних моделей, проаналізовані та описані отримані експериментальні дані, сформульовані висновки і технологічні рекомендації за результатами досліджень. В процесі планування, підготовки і проведення досліджень, обробки отриманих результатів та підготовки публікацій за результатами досліджень внесок автора був визначальним. Наукові і практичні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані автором самостійно і в співавторстві, відповідно до публікаціями, які наведені в додатку. У роботах, які були опубліковані в співавторстві, здобувачем виконано наступне: - проаналізовані переваги і недоліки методів розрахунку динамічних

характеристик потоків шихтових матеріалів в трактах завантажувальних пристроїв доменних печей, а також визначення напрямків вдосконалення зазначених методик [14,15,22,23]; - розроблені підходи до визначення параметрів рельєфу поверхні засипу на колошнику доменної печі з урахуванням даних газодинамічних параметрів колошникової зони доменної печі [1,9,11,16]; - отримані закономірності зміни складу колошникового газу в залежності від рудних і газових навантажень по радіально-кільцевих зонах колошника доменної печі [24,25];- отримані на діючому металургійному обладнанні експериментальні дані для визначення основних технологічних характеристик потоків шихтових матеріалів в трактах завантажувальних пристроїв доменних печей [17,20,21]; - визначено раціональні газодинамічні параметри і показники завантаження доменної печі з урахуванням фактичних значень порозности шихтових матеріалів, а також розташування складових шихти на колошнику доменної печі [4,5]; - розроблені раціональні режими завантаження доменних печей, обладнаних безконусним завантажувальним пристроєм, що базуються на газодинамічних параметрах колошникової зони печі і фактичними показниками гранулометрії використовуваних шихтових матеріалів [2,3,6,10,12,13,18,26,27-29]. Отримані теоретичні та практичні рекомендації сформульовані особисто автором. У роботах, які опубліковані зі співавторами, автору належать постановка теоретичних завдань, розробка методик розрахунку і результати експериментальних і теоретичних досліджень параметрів роботи завантажувальних пристроїв доменної печі.

Апробація результатів дисертації. Наукові положення і результати дисертації представлені в доповідях на наукових семінарах кафедри теорії металургійних процесів та хімії, металургії чавуну, автоматизації. Основні ідеї, принципи, положення і результати дисертаційних досліджень пройшли апробацію на наукових конференціях і семінарах:**Селегей А.Н.** Создание информационной модели загрузки шихты в доменную печь / **А.Н. Селегей**, В. И. Головки, М.А. Рыбальченко, И.Г. Тригуб, И.А. Маначин. // «XII Міжнародна конференція з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості»: Зб. тез доповідей (м. Дніпро, 23-24 листопада 2016 року). – Дніпро, НГУ. – 2016.; **Селегей А.М.** Model of movement of granular materials by elements of tree-free loading device domain furnace. / **Селегей А.М.**, Селегей С.М., Петренко В.О. Квасова Л.С. / Actual trends of modern scientific research. Abstracts of IV International Scientific and Practical Conference, Munich, Germany, 11 -13 October 2020; **Selegej A.N.** Research of the unloading of charge materials from the cone valve of the loading devices of the blast furnace. / **A.N.Selegej**, V.A.Petrenko, L.S.Kvasova. // Science, engineering and technology: global trends, problems and solutions. September 25–26, 2020 Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic 2020, September 25–26, – 2020; **Selegej A. N.** Flow dynamics of granular material / **A. N. Selegej**, S. N. Selegej, N. V. Mikhailovsky, L. S.Kvasova. // The 3 rd International scientific and practical conference “Science and education: problems, prospects and innovations” (December 2-4, 2020), Kyoto, Japan. – 2020. P. 107 – 113.; Темчур В.О. Розробка спеціалізованого програмного забезпечення для дослідження рудного навантаження доменної

печі / В.О.Темчур, Т.В. Селівьорстова, А.М. Селегей // Восьма ювілейна міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, присвячена 20-річчю ради молодих вчених дніпропетровської області «Молодь: наука та інновації» 26-27 листопада 2020 р., Дніпро – 2020. – с. 137.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 45 наукових праць, в тому числі: 21 - статті в наукових фахових виданнях, 3 - статті у виданнях, що входять в наукометричних баз SCOPUS, 4 - патентів, 7 - матеріали наукових конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів з висновками до кожного розділу, загальних висновків, переліку використаних джерел з 220 найменувань на 11 сторінках, додатків. Загальний обсяг роботи становить 361 сторінка тексту, в тому числі 348 основного тексту, 101 рисунок, 38 таблиць, 3 додатків - на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, надано загальну характеристику, сформульовано мету роботи та завдання дослідження. Розкрито наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено дані щодо апробації результатів дисертаційної роботи, публікації, які відображають зміст роботи. Зазначено внесок здобувача у розробку проблеми.

У першому розділі розглянуті особливості проблеми оперативного управління режимами завантаження сучасних доменних печей, обладнаних системами моніторингу за поверхнею засипу шихтових матеріалів. Проаналізовані недоліки та переваги існуючих систем завантаження доменних печей шихтовими матеріалами. Наведені основні положення існуючих методик для визначення динамічних параметрів потоку шихтових матеріалів, які рухаються трактами завантажувальних пристроїв. Визначено, що на сьогоднішній день найбільш досконалою методикою визначення параметрів розподілення шихтових матеріалів на колошнику доменної печі є так звана «інженерна методика», розроблена під керівництвом академіка Большакова В.І. у Інституті чорної металургії її імені З.І.Некрасова НАН України. Вказана методика базується на теоретичних розрахунках траєкторій потоків шихтових матеріалів в колошниковому просторі доменної печі. Однак слід зазначити, що на вид траєкторії та на координату точки падіння шихти на поверхні засипу впливає велика кількість факторів. Тому з достатньою точністю визначити фактичне розподілення шихтових матеріалів виявляється досить проблематичним. З розвитком систем моніторингу за поверхнею засипу шихтових матеріалів, з'явилася можливість у режимі реального часу визначати фактичне розподілення шихтових матеріалів по радіально-кільцевим зонам колошника доменної печі. Розробка методики по визначенню рудного навантаження в радіально-кільцевих зонах та загального рудного навантаження на основі даних радарних систем моніторингу, дає можливість отримання оперативних даних про стан розподілення шихтових матеріалів на колошнику доменної печі. Це дає можливість уникати застосування теоретичних

розрахунків та «інженерної методики» для визначення фактичних товщини шарів шихтових матеріалів вздовж радіуса колошника доменної печі. Також було розглянуто, що на виробництві розподіленням шихтових матеріалів при їх завантаженні в доменну піч керують за допомогою двох основних впливаючих факторів – кута нахилу лотка-розподільника та ступеню відкриття шиберного затвору накопичувального бункера. Відомо, що ступінь відкриття шиберного затвору в значній мірі впливає на траєкторію шихтових матеріалів у колошниковому просторі доменної печі. Це, в свою чергу, впливає на розподілення шихтових матеріалів та газодинамічні параметри «сухої зони» доменної печі. В існуючих на сьогодні методиках розрахунку параметрів розподілення шихти на колошнику доменної печі відсутня можливість інтегрального врахування як ступеня відкриття шиберного затвору накопичувального бункера, так і кута нахилу лотка-розподільника відносно вертикальної вісі печі. Окрім того, використовуючи відомі методики, враховувати такі параметри як гранулометрія шихтових матеріалів не представляється можливим. Основними компонентами, які враховуються вказаними вище методиками є коефіцієнти зовнішнього тертя та коефіцієнти загального опору руху шихти по направляючих елементах завантажувальних пристроїв.

Враховуючи вищезазначене, важливою науковою проблемою є розробка методології визначення динамічних параметрів потоків шихтових матеріалів по трактах завантажувальних пристроїв доменних печей з урахуванням виду матеріалу, його гранулометричних характеристик, ступеню відкриття затвору накопичувального бункера та кута нахилу лотка завантажувального пристрою. Окрім того, зважаючи на розвиток систем моніторингу за поверхнею засипу матеріалів на колошнику та системою газоаналізу дана методика повинна враховувати оперативні дані, що надаються цими системами.

У літературних джерелах не виявлено єдиного науково обґрунтованого підходу до опису формування рельєфу засипу шихти на колошнику, який оперував би параметрами потоку сипучого матеріалу, починаючи від приймальної воронки на завантажувальному пристрої і закінчуючи точкою приземлення шихти на поверхні засипу.

Аналіз наукової та промислової технічної інформації показав, що на сьогоднішній день актуальним є рішення комплексної проблеми управління доменними печами обладнаними як конусними так і безконусними завантажувальними пристроями. Сучасні системи завантаження дозволяють не тільки регулювати параметри засипу на колошнику, але і показати реальну картину її рельєфу. У зв'язку з тим, що фізико-хімічні, гранулометричні параметри шихтових матеріалів, що завантажуються в доменну піч постійно змінюються, для найбільш раціонального ведення плавки необхідно постійно змінювати керуючі впливи систем завантаження. Тому створення теоретичного і практичного комплексу заходів, які дозволять в режимі реального часу визначати необхідні параметри управління доменною плавкою і проводити швидко і точну їх корекцію, є важливим науковим завданням.

Таким чином показано, що існуючі на сьогоднішній день методики розрахунку кінематичних параметрів руху потоку шихти по трактах систем завантаження доменної печі ґрунтуються на розгляді характерної точки перетину і подальшого узагальнення її характеристик на весь потік. Дослідження сучасних методик і програм завантаження доменних печей дозволило визначити, що вони не можуть оперативно проводити корекцію керуючих параметрів при швидкій зміні умов завантаження.

Визначено основні недоліки систем завантаження доменних печей як з конусними так і безконусними завантажувальними пристроями, сформульовані подальші напрямки раціоналізації керуючих параметрів. Глибокий аналіз використовуваних на сьогоднішній день методик і програм завантаження доменних печей показав, що не знайдено аналітичну кореляцію між кінематикою потоку шихтових матеріалів з їх гранулометричним складом. Практичні дані про роботу доменних печей свідчать про наявність такої кореляції.

Показано, що в інтегральному вигляді проблема вдосконалення технології доменної плавки на основі управління рельєфом поверхні засипу шихти не вирішувалась. Обґрунтовано подальші напрямки досліджень щодо вдосконалення технології завантаження доменної печі з використанням інформації, отриманої за допомогою радарних комплексів, що дозволило сформулювати основні завдання роботи.

У другому розділі розглянуто теоретичні основи з визначення динамічних характеристик потоків шихтових матеріалів при їх русі по направляючим елементам завантажувальних пристроїв. Спершу приділено увагу застосуванню рівняння Бернуллі для потоку гранульованого матеріалу у випадку його вільно-дисперсного руху. Це дало можливість у розрахунках врахувати наступні фактори, що є важливими для завантажувальних пристроїв:

- врахування руху матеріалу як насипного вантажу, для якого справедливі закони механіки суцільного середовища;
- фазові стани потоку шихтових матеріалів (твердого тіла, в'язко-пластичне, вільно-дисперсне);
- обертання лотка щодо вертикальної осі.

Для розробки моделі руху шихтового матеріалу по лотку, першим етапом необхідно розглянути визначення потенціалу Π в вихідному рівнянні Бернуллі. Повний диференціал потенціалу Π дорівнює:

$$d\Pi = \frac{\partial\Pi}{\partial x} dx + \frac{\partial\Pi}{\partial z} dz. \quad (1)$$

Враховуючи (1), на підставі рівняння Бернуллі отриманий вираз :

$$-\frac{\omega^2 \cdot x^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{U^2}{2g} = const. \quad (2)$$

Вільно-дисперсний стан руху шихти по лотку виникає при кутах нахилу більше 40 градусів по відношенню до горизонту. Схема для визначення силових складових процесу показана на рис.1.

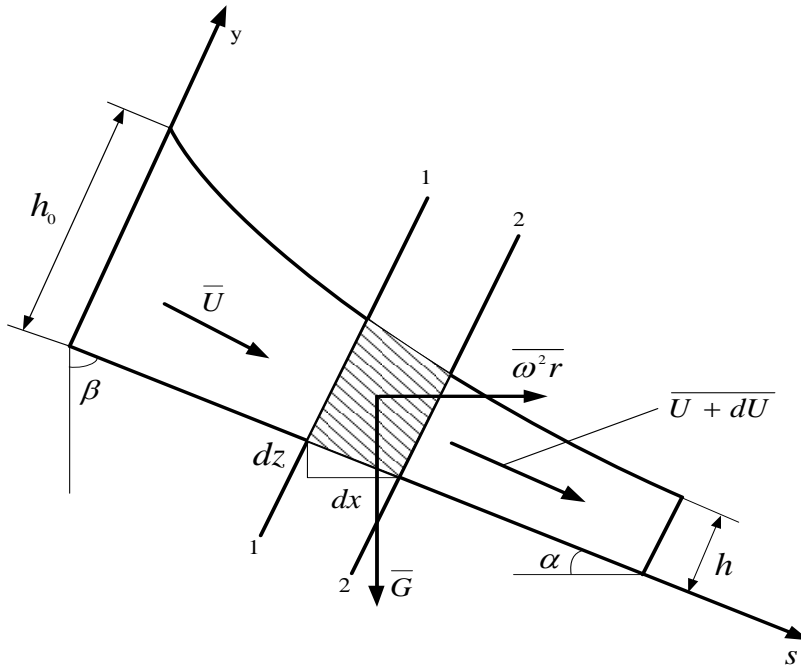


Рис. 1. Схема для визначення складових рівняння Бернуллі (3).

Лоток безкоштовного завантажувального пристрою при експлуатації може нахилитися під кутом в межах 17-53 градусів по відношенню до вертикалі. З огляду на інерційну складову прискорення в переносному русі шихти можна з упевненістю стверджувати, що шихтові матеріали рухаються по лотку БЗП у вільно-дисперсному стані.

Вільно-дисперсний стан шихти при його русі по лотку, що обертається описується рівняннями Нав'є-Стокса.

У зв'язку з цим для двох нормальних перетинів 1-1 і 2-2, розташованих на малій відстані по потоку (див. рис. 1), є можливість застосувати рівняння Бернуллі для плавно змінюваного потоку.

$$h' - \frac{\omega^2 \cdot dx^2}{2g} + dz + \frac{U^2}{2g} = h' + dh' - \frac{\omega^2 (x + dx)^2}{2g} + dh_{mp} + \frac{(U + dU)^2}{2g}, \quad (3)$$

де h' - глибина потоку шихти в перерізі 1-1, спроектована на вертикальну вісь z , м;

dz - вертикальне перевищення перетину 2-2 над перетином 1-1, м;

ω - кутова швидкість обертання лотка БЗП щодо вертикальної осі, c^{-1} ;

dh_{mp} - питомі втрати внутрішньої механічної енергії потоку шихти на ділянці між перетинами 1-1 і 2-2, м.

З рис.1 легко бачити, що виконуються наступні співвідношення:

$$\begin{cases} dh' = \cos \alpha \cdot dh \\ x = s \cdot \cos \alpha \\ dz = ds \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (4)$$

З урахуванням того, що при русі шихти по лотку БЗП її щільність не змінюється і зберігається масова витрата уздовж лотка, можна отримати вираз для швидкості:

$$U = \frac{Q}{hb}, \quad dU = -\frac{Q}{b} \cdot \frac{1}{h^2} dh, \quad (5)$$

де Q - витрата шихти по лотку БЗП, m^3/c ;

b - ширина лотка, м.

Втрати внутрішньої механічної енергії потоку шихти dh_{mp} на ділянці ds лотка визначаються за формулою Шезі:

$$dh_{mp} = \frac{V^2 ds}{C^2} R_z, \quad (6)$$

де C - швидкісний множник (коефіцієнт Шезі), що характеризує втрату механічної енергії при русі потоку шихти по лотку БЗП, м^{0.5}/с;

R_z - гідравлічний радіус, м.

Подальші перетворення приводять до диференціального рівняння першого порядку:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\sin \alpha + \frac{\omega^2 s \cdot \cos^2 \alpha}{g} - \frac{Q^2}{C^2 \cdot b^2 h^2 R_z}}{\cos \alpha - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g}}. \quad (7)$$

Рівняння (7) є диференціальним рівнянням, що характеризує зміну товщини шару шихтових матеріалів по довжині лотка БЗП. Розв'язок задачі Коші для цього рівняння дасть криву поверхні шару шихти на лотку БЗП. Знаючи товщину шару при сходженні шихти з вільного кінця лотка і геометрію лотка можна отримати значення швидкості потоку шихтових матеріалів, яка в комплексі з кутом нахилу лотка дає можливість точного розрахунку параметрів засипу поверхні шихти в просторі доменної печі.

Розв'язок рівняння (7) знайдено у вигляді:

$$h(s) = \frac{\xi \cdot s^2 + \psi \cdot s + \delta}{\chi \cdot s + \varepsilon}, \quad (8)$$

де $\xi = a_2 a_0 - a_1 a_2 s_0 + a_0 a_3 s_0 + a_2^2 s_0^2 - a_1 a_3 s_0^2$,

$\psi = a_1 a_2 - a_0 a_3 - 2a_2^2 s_0 + 2a_1 a_3 s_0$, $\delta = a - a_1 a_3$, $\chi = -a_3$, $\varepsilon = a_2 + a_3 s_0$.

Коефіцієнти a_0, a_1, a_2, a_3 визначаються відповідно рівнянню (7).

Таким чином, розроблена математична модель, яка дозволяє за допомогою відносно простих математичних виразів визначати геометричні параметри потоку шихтових матеріалів, що рухаються по похилому лотку-розподільнику, який обертається. Отримана методика дозволяє враховувати найбільшу кількість факторів, що впливають на динаміку руху шихти як насипного вантажу. Серед них хочеться відмітити такі характеристики як гранулометрія, геометрія направляючих елементів, тип руху частинок, частота обертання лотка та ін. Використовуючи дані початкового руху шихтових матеріалів на лотку та знаючі об'ємну витрату та параметри лотка виникає можливість точного розрахунку швидкості потоку шихти, що сходять з лотка у колошниковий простір доменної печі. Важливою перевагою способу визначення швидкості є врахування крупності частинок шихтових матеріалів, що завантажуються в піч, адже саме цей параметр шихти найбільше змінюється в процесі експлуатації доменної печі. Це, в свою чергу, пов'язано зі зміною стану сит на грохотах системи шихтоподачі, міцності на удар сировини, тощо.

В зв'язку з вищевикладеним, врахування гранулометричних характеристик при розрахунку динаміки потоку шихтових матеріалів при їх русі по трактах завантажувальних пристроїв має вирішальне значення при корекції ходу доменної плавки при зміні шихтових умов.

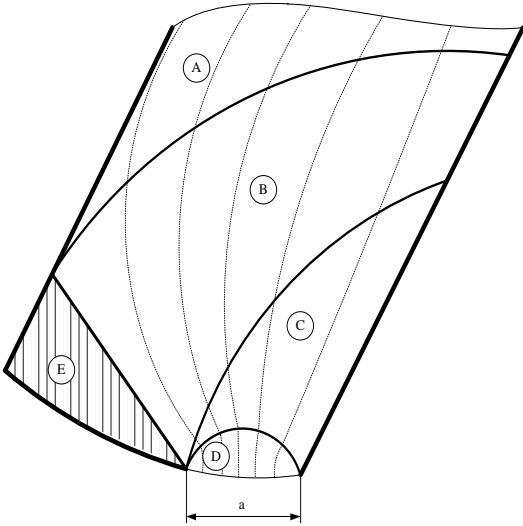


Рис. 2. Розподіл зон рухливості всередині бункера БЗП

Наступним кроком розглянутий виток шихтових матеріалів з бункерів БЗП. На схемі (рис. 2) показано розподіл зон різних станів матеріалів всередині шихтового бункера. Випускний отвір виберемо у вигляді щілини з шириною a і довжиною b . На рисунку також показані відповідні зони в'язко-пластичного стану гранульованого матеріалу.

Витрату шихтових матеріалів з бункера БЗП можна визначити за допомогою наступної залежності:

$$Q = \frac{2}{3} b a^{1.5} \sqrt{g} \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}} \frac{K_1^{1.5}}{(K_1 - \chi')} \left[1 - \left(\frac{\chi'}{K_1} \right)^{1.5} \right], \quad (9)$$

де $K_1 = \frac{1}{2} (f + \sqrt{1+f^2})$; f - коефіцієнт внутрішнього тертя сипучого вантажу; $\chi' = f + \frac{1}{f} - \sqrt{1+f^2}$; ζ - коефіцієнт місцевих втрат при русі сипучого вантажу в зоні обвалення, що характеризує втрати механічної енергії потоку сипучого вантажу при зіткненні частинок між собою. Зазначений коефіцієнт можна розрахувати таким чином:

$$\zeta = K_1 K_2 \frac{k^2 d^2}{a^2}, \quad (10)$$

де k - безрозмірний коефіцієнт, що залежить від форми частинок ($k = 10-13$); K_2 - деякий безрозмірний коефіцієнт, що залежить від умов витоку сипучого вантажу з бункера (пряме або бічне витікання сипучого вантажу з бункера), який визначається з експерименту.

d - середній діаметр частинок сипучого вантажу, м;

У подальшому в дисертаційній роботі розроблений розрахунок параметрів витоку шихтових матеріалів з бункера БЗП і визначення початкових параметрів потоку по похилих тічках завантажувального пристрою.

Для визначення фізико-механічних параметрів руху шихти по тічці було застосовано рівняння Бернуллі у вигляді:

$$dx \cdot \sin \alpha + \frac{V^2}{2g} = dh \cos \alpha + \frac{(V + dV)^2}{2g} + dh_{тр} \quad (11)$$

При розрахунках радіус поперечного перерізу тички приймався рівним 0,5м. Висота h розбита на 10 рівних частин і змінюється від 0 до 0,5 м.

Лінійна регресія призводить до наступного рівняння:

$$S(h) = 0,8h - 0,03 \quad (12)$$

При розробці математичної моделі руху сипучого матеріалу по елементам БЗП необхідно знати чисельне значення коефіцієнта Шезі. Слід зазначити, що вказаний коефіцієнт повинен враховувати ряд параметрів, серед яких необхідно виділити геометрію каналу руху сипучого матеріалу, його крупність.

Коефіцієнт Шезі для лотка напівкруглої форми можна визначати за допомогою виразу:

$$C = \frac{2b \sqrt{\frac{6gh^5}{R_r}}}{5kd(0,8h - 0,03)} \quad (13)$$

Використовуючи (13) на рис. 3 були побудовані залежності коефіцієнта Шезі від глибини потоку сипучих матеріалів для лотка напівкруглої форми.

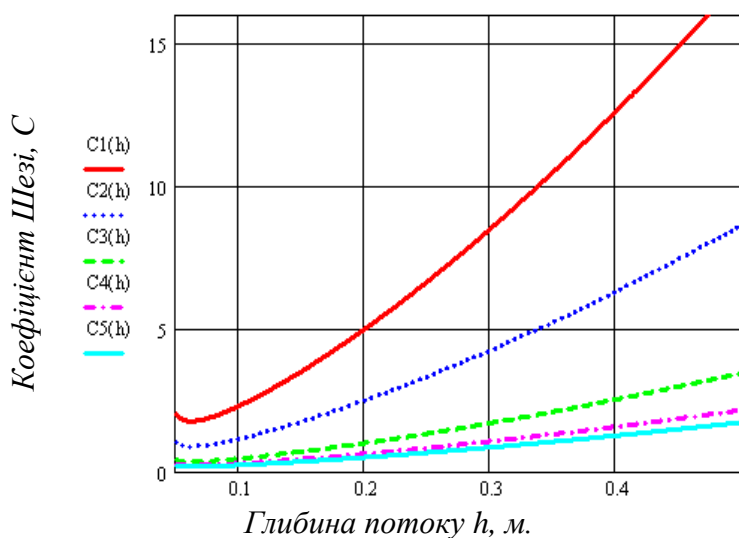


Рис. 3. Залежності коефіцієнта Шезі від глибини потоку для різних крупностей шихтових матеріалів.

науково-технічною задачею.

На малюнку 4 показаний графік залежності з використанням наступних даних:

$$C_1 = 0,85; C_2 = 0,15;$$

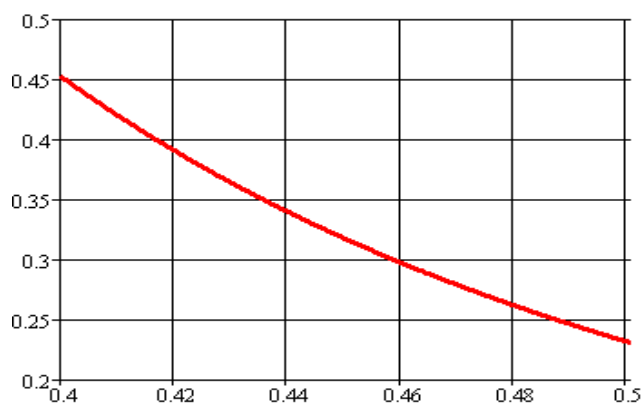
$$\rho_1 = 5,8 \text{ т / м}^3,$$

$$\rho_2 = 3,3 \text{ т / м}^3;$$

$$k = 13; d_1 = 11\text{мм};$$

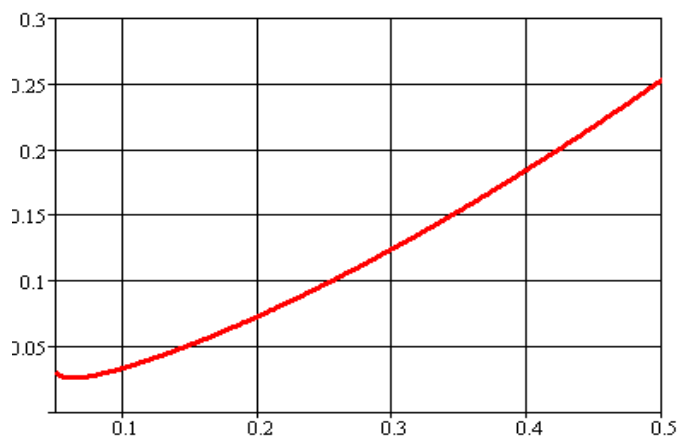
$$d_2 = 8\text{мм}.$$

Графіки були побудовані для фракцій матеріалу 0,01, 0,02, 0,05, 0,08, 0,1 метра. На сьогоднішній день завдання по визначенню значення коефіцієнта місцевих втрат механічної енергії потоку сипучого матеріалу для суміші декількох видів матеріалів не вирішена. У зв'язку з викладеним, визначення коефіцієнта для однорідної суміші хоча б двох видів шихтових матеріалів є актуальною



Глибина потоку, м.

Рис. 4. Залежність коефіцієнта місцевих втрат механічної енергії потоку для суміші шихтових матеріалів від глибини потоку.



Глибина потоку, м.

Рис. 5. Залежність коефіцієнта Шезі від глибини потоку при вільно-дисперсному русі суміші шихтових матеріалів елементами завантажувальних пристроїв доменних печей.

Таким чином, встановлений аналітичний зв'язок між коефіцієнтом місцевих втрат механічної енергії потоку для суміші шихтових матеріалів та глибиною потоку. Це дає можливість проводити ефективну корекцію режиму завантаження конкретної доменної печі при конкретних шихтових умовах з урахуванням того факту, що завантаження у більшості випадків відбувається сумішшю шихтових матеріалів.

Аналогічним чином був визначений коефіцієнт Шезі для двокомпонентної суміші. Результати показані на рис. 5.

Аналізуючи наведені графічні залежності можна зробити висновок, що розглянуті коефіцієнти в значній мірі залежать від глибини потоку матеріалу, тому цей параметр має бути врахований для досягнення точного результату.

В третьому розділі дисертації розглянуті результати теоретичного дослідження роботи елементів систем завантаження і визначення їх раціональних параметрів. Використовуючи попередні наукові матеріали було визначено параметри витoku шихтових матеріалів з завантажувального пристрою конусного типу доменної печі. На рисунку 6 показана графічна залежність загальної за проміжок часу витрати коксу крупністю 50 та 80 мм для великого конуса діаметром 5000 мм.

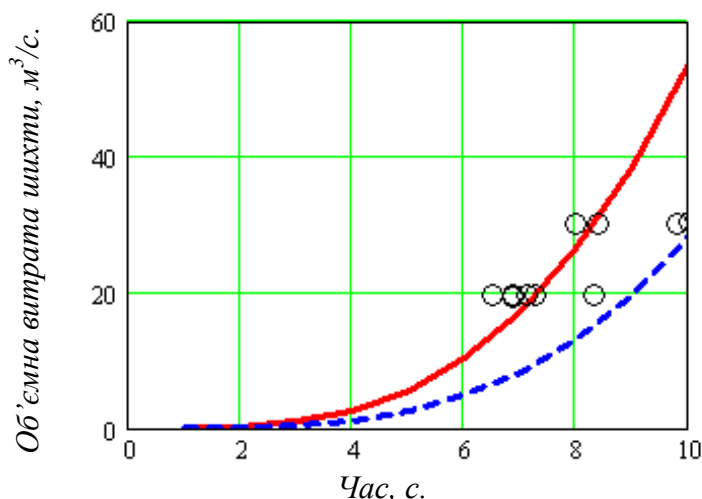


Рис. 6. Залежність загальної витрати за проміжок часу відкриття великого конуса.

По осі абсцис відкладено час в секундах, по осі ординат - витрата в метрах кубічних за секунду. Суцільна крива для коксу крупністю 50 мм, переривчаста для 80 мм відповідно. Кружками показані експериментальні дані на заводі.

Використовуючи наведені вище матеріали, представляється можливим розробити методику визначення кількості дрібної фракції в шихті, яка подається безпосередньо в піч з міжконусного простору. отримана залежність виду $d = f(Q, t)$, що дозволяє визначити середній розмір частинок шихти (в даному випадку коксу) при відомих фактичних значення дози, що зсипали з міжконусного простору і відповідного часу її витоку.

Графік залежності для коксу при дозі $Q = 30,29 \text{ м}^3$ має вигляд, показаний на рис. 7.

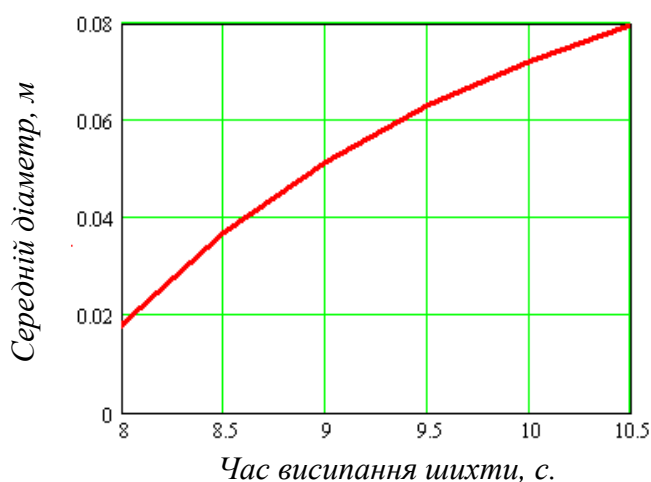


Рис. 7. Залежність середнього розміру коксу в дозі $30,29 \text{ м}^3$ від часу витоку.

Перетворивши (14) можна отримати:

$$\phi = \frac{D - dm}{D + d}. \quad (15)$$

В роботі була побудована графічна залежність виду $\phi = f(dm)$ для $D = 0,05 \text{ м}$, $dm = 0,02 \text{ м}$. Залежність представлена на рис. 8.

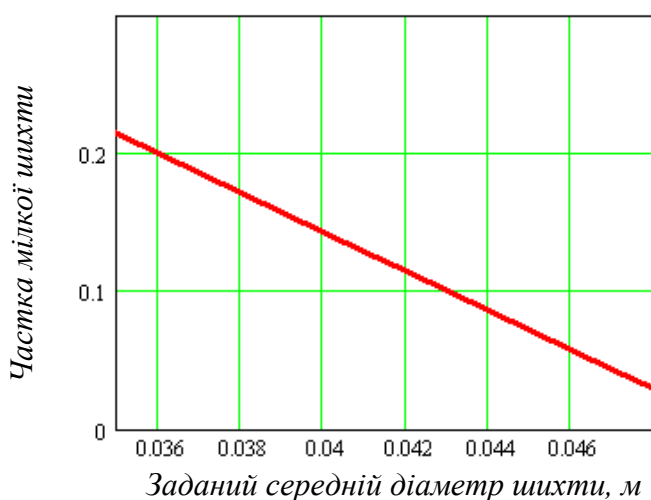
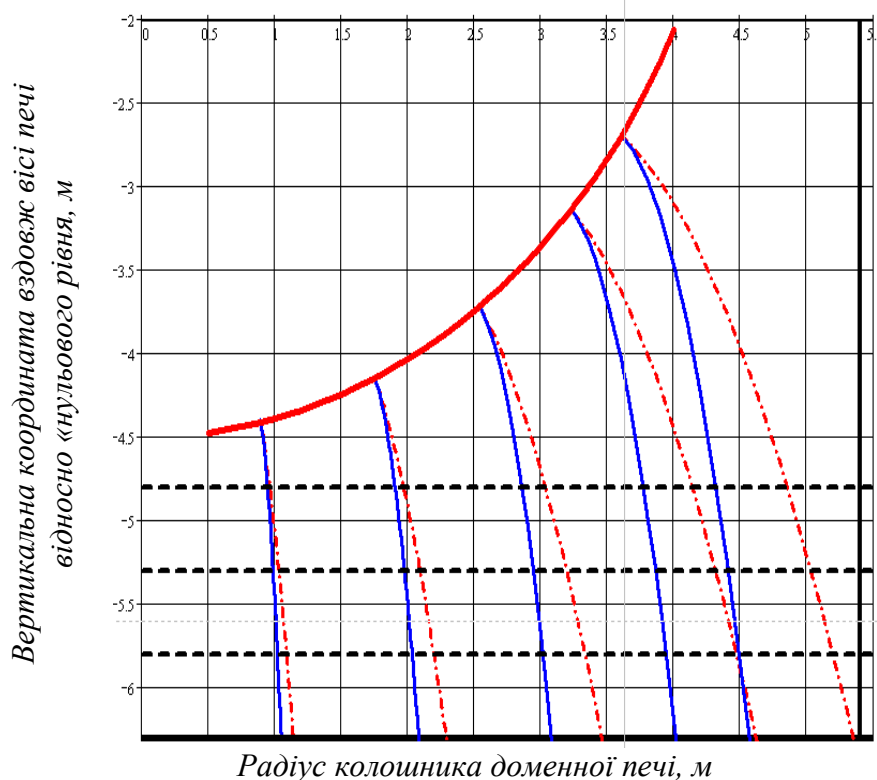


Рис. 8. Залежність частки дрібної фракції від середнього еквівалентного діаметру.

В подальшому в дисертаційній роботі розглянуто процес руху потоків шихтових матеріалів в колошниковому просторі доменної печі.



Радіус колошника доменної печі, м
Рис. 9. Траєкторії руху шихти.

На рис. 9 показані траєкторії для коксу крупністю 50 мм (суцільна крива) та агломерату розміром 20 мм (штрихпунктирна крива) для доменної печі №9 ПАТ АрселлорМіттал Кривий Ріг.

Жирна горизонтальна лінія - це рівень «-1,5м».

Горизонтальними пунктирними лініями показані рівні засипу з кроком 0,5 м. Величина відкриття шиберного затвора накопичувального

бункера БЗП 30 градусів. Показано 5 положень лотка-розподільника - для кутів нахилу 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,93 радіана (11,5; 23; 34,5; 46; 53 градусів) відповідно.

Аналіз графіків показує, що при однаковому відкритті шиберного затвора накопичувального бункера траєкторії коксу і агломерату не збігаються і на великих кутах нахилу лотка і певних значеннях величин відкриття шиберного затвора бункера БЗП кокс не може долетіти до периферії колошника. У зв'язку з цим, при розробці програм завантаження доменних печей, обладнаних БЗП, для забезпечення необхідного рудного навантаження необхідно рекомендувати не тільки кути нахилу лотка-розпорядника, але і ступінь відкриття шихтового затвора на бункері. Крім того, корекцію траєкторії шихтового матеріалу з тими чи іншими характеристиками можливо проводити за допомогою як зміни ступеня відкриття затвора бункера і величиною кута нахилу лотка-розподільника, так і спільним варіюванням зазначених параметрів.

Аналогічним чином побудовані графіки, представлені на рисунку 10. Досліджуваний матеріал був з тими ж характеристиками. Відмінністю є те, що траєкторії коксу побудовані для кута відкриття шиберного затвора бункера БЗП 60 градусів, а траєкторії агломерату - 15 градусів.

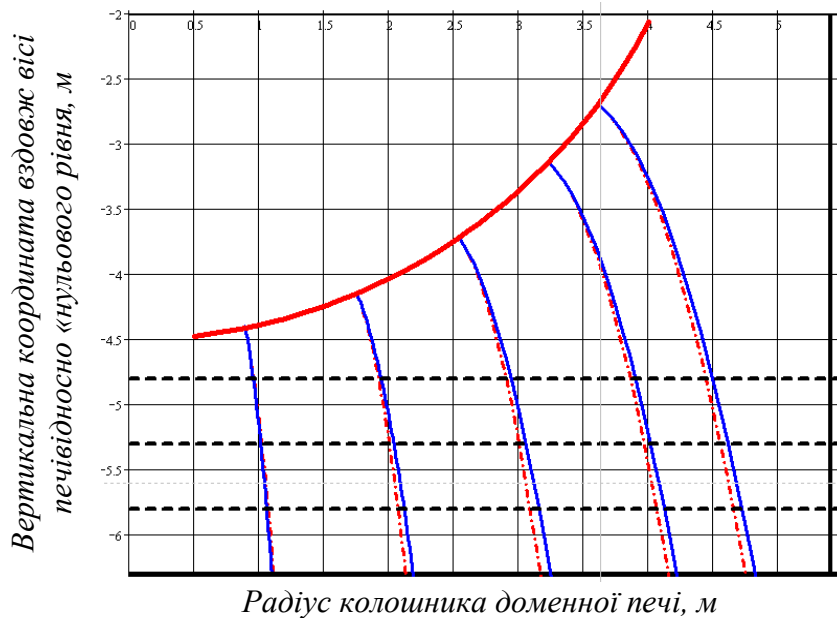


Рис. 10. Траєкторії руху шихти при різних ступенях відкриття шиберного затвора накопичувального бункера БЗП.

Слід зазначити, що одночасна зміна кута нахилу лотка-розподільника та ступеня відкриття шиберного затвора накопичувального бункера сьогодні використовується на металургійних підприємствах. Однак відсутня аналітична методика, яка б дозволяла розраховувати зміну координати точки зустрічі потоку

шихти з поверхнею засипу на колошнику печі. Розроблена методика враховує важливі показники гранулометрії, тому може буде застосована як для корекції програм завантаження так и корекції режиму завантаження для досягнення показників, які задані програмою завантаження, яка використовується у даний момент часу.

Таким чином, знаючи фізико-механічні характеристики шихтового матеріалу і задаючи параметри α і β можна аналітично визначати координату гребеня шихтових матеріалів, що зсипають з лотка-розподільника БЗП.

Графічне представлення такої залежності показано на рис. 11.

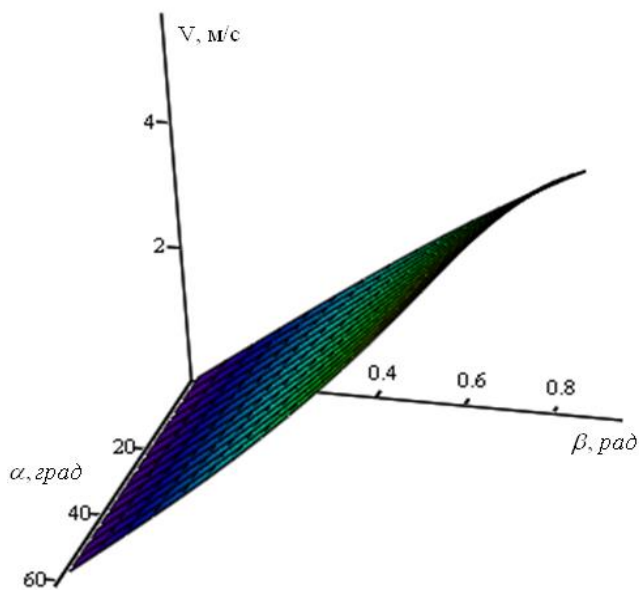


Рис. 11. Залежність координати x від керуючих параметрів α і β .

В роботі було проведено фізичне моделювання процесу вивантаження шихтових матеріалів з накопичувального пристрою доменної печі.

На рис. 12 наведені залежності витрати шихтових матеріалів від величини відкриття шиберного затвора моделі бункера. Точками 1 показані середні значення експериментальних витрат для одного положення шиберного затвора для модельного шихтового матеріалу у вигляді агломерату. Аналогічним чином нанесені значення 2 для коксу. Криві 3 і 4 являють собою теоретичні

залежності для витрати, отримані за допомогою виразу для залізрудних матеріалів і коксу відповідно. Коефіцієнти детермінації для експериментальних і теоретичних залежностей в цьому випадку склали 0,95 і 0,97 для коксу і

агломерату. Криві 5, 6 являють собою регресивні залежності для агломерату і коксу.

Як видно, теоретична і регресійна крива з досить високою точністю описують процес витоків шихтових матеріалів з моделі бункера БЗП доменної печі (абсолютні відхилення менше 2%).

Для оцінки адекватності регресійних кривих автором був обраний метод найменших квадратів як найбільш ефективний в даному випадку. Цей метод дозволяє за допомогою нескладного математичного апарату швидко і з високою точністю оцінити збіжність двох залежностей - експериментально-регресійної і теоретичної. Розрахована на підставі положень методу сума квадратів відхилень для залізородних матеріалів склала $1,152 \cdot 10^{-8}$ та $1,661 \cdot 10^{-8}$ відповідно для регресійної і теоретичної кривої.

Відхилення для кривих витрати коксу рівні таким величинам: $5,26 \times 10^{-9}$ і $1,482 \times 10^{-8}$. Отримані значення відхилень значно менше 1%, тому залежності можна успішно застосовувати на практиці. Проведені автором розрахунки і візуальний аналіз кривих доводить хорошу збіжність експериментальних і теоретичних результатів. За результатами натурного моделювання встановлено, що $Q(\alpha) = \lambda \cdot \alpha^\xi + \psi$, де значення λ , ξ і ψ залежать від виду шихтового матеріалу і його фізико-механічних характеристик.

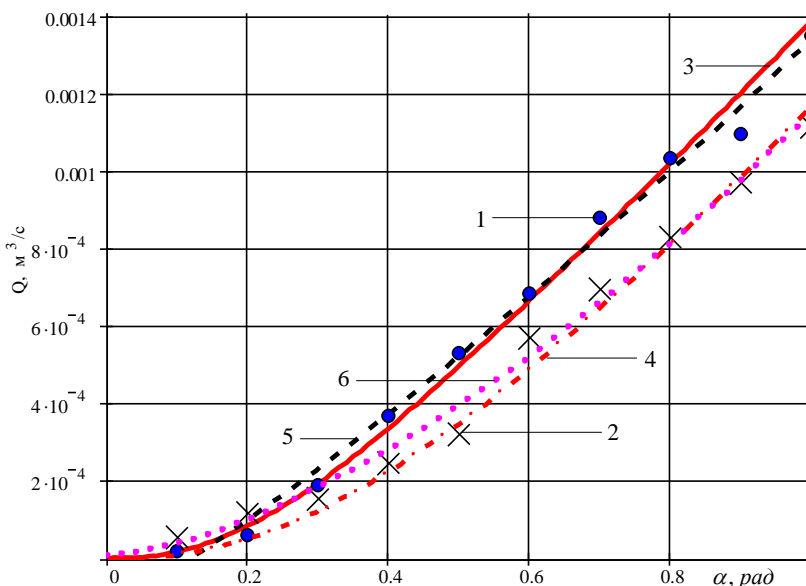


Рис. 12. Залежність витрати шихти від кута відкриття шиберного затвора моделі бункера завантажувального пристрою доменної печі.

Отримані критерії моделювання справедливі для всієї системи елементів завантажувального пристрою сучасної доменної печі. Найбільший вплив на об'ємну витрату дає гранулометричний склад і тип шихтових матеріалів. Збільшення параметра α в межах від 0 до 1 радіана підвищує об'ємну витрату шихтових матеріалів від 0 до $0,0014 \text{ м}^3/\text{с}$.

У четвертому розділі дисертації акцентовано увагу на розробку наукових основ корекції режимів завантаження на підставі даних газодинаміки верхньої частини доменної печі та поверхні засипу на колошнику. Для створення ефективної програми завантаження або раціональної корекції існуючої необхідно задати рудне навантаження по радіусу колошника доменної

печі. Однак на ступінь використання газів в доменній печі в значній мірі впливає і так зване газове навантаження.

Крім усього іншого, фактичне рудне навантаження в доменній печі до сьогодення визначалося тільки за допомогою інженерної розрахункової методики, яка не дає можливості з високою точністю визначати, куди ж потрапляє шихтовий матеріал на поверхні засипу. З появою на доменних печах профілемірів виникла можливість визначати фактичний рельєф поверхні на колошнику доменної печі в реальному часі. Засікаючи зміну товщини шарів під час спорожнення бункерів БЗП можна розрахувати фактичну кількість того чи іншого шихтового матеріалу, який завантажується в піч за цикл подачі. Таким чином, з'являється можливість визначення фактичного рудного навантаження по РКЗ. Дослідження профілів були проведені для 2 діаметрів даної доменної печі. Це діаметри чавунних льоток номер один і три, а також два і чотири доменної печі №9 ПрАТ ArcelorMittal Кривий Ріг.

Автором дисертаційної роботи отримана методика, що дозволяє визначати фактичні показники завантаження шихтових матеріалів на колошнику, обладнаному датчиками, здатними фіксувати параметри рельєфу засипу в реальному часі. Методика полягає в наступному. Після вивантаження чергової порції шихтових матеріалів фіксується профіль засипу для двох взаємно перпендикулярних діаметрів. Маючи криву поверхні засипу шихтових матеріалів фіксуються значення рівня для чотирьох точок взаємно перпендикулярних діаметрів кожної радіально-кільцевої зони. Наступним етапом є розрахунок середньої різниці координат для кожної радіально-кільцевої зони. Дана різниця координат є висотою пологого циліндра, обсяг якого займає матеріал в кожній радіально-кільцевій зоні. Маючи дані про фактичний обсяг шихти того чи іншого виду в кожній радіально-кільцевій зоні з урахуванням її насипної маси представляється можливим визначення розподілу фактичної маси матеріалу на колошнику доменної печі. Фактична маса обчислюється таким чином:

$$M_{ркз} = \gamma \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \Delta h, \quad (16)$$

де γ - насипна маса шихтового матеріалу;

D і d - зовнішній і внутрішній діаметр радіально-кільцевих зон відповідно;

Δh - середнє значення різниці координат по чотирьох точках радіально-кільцевої зони.

На рис. 13 наведено профілі порцій шихтових матеріалів, які висипані з накопичувального бункера БЗП на поверхню колошника доменної печі. Дані отримані за допомогою радарної системи моніторингу за поверхнею засипу на колошнику. На підставі обробки даних радарної системи моніторингу отримано реальний розподіл рудних навантажень вздовж радіуса колошника доменної печі, показаний на рис. 14.

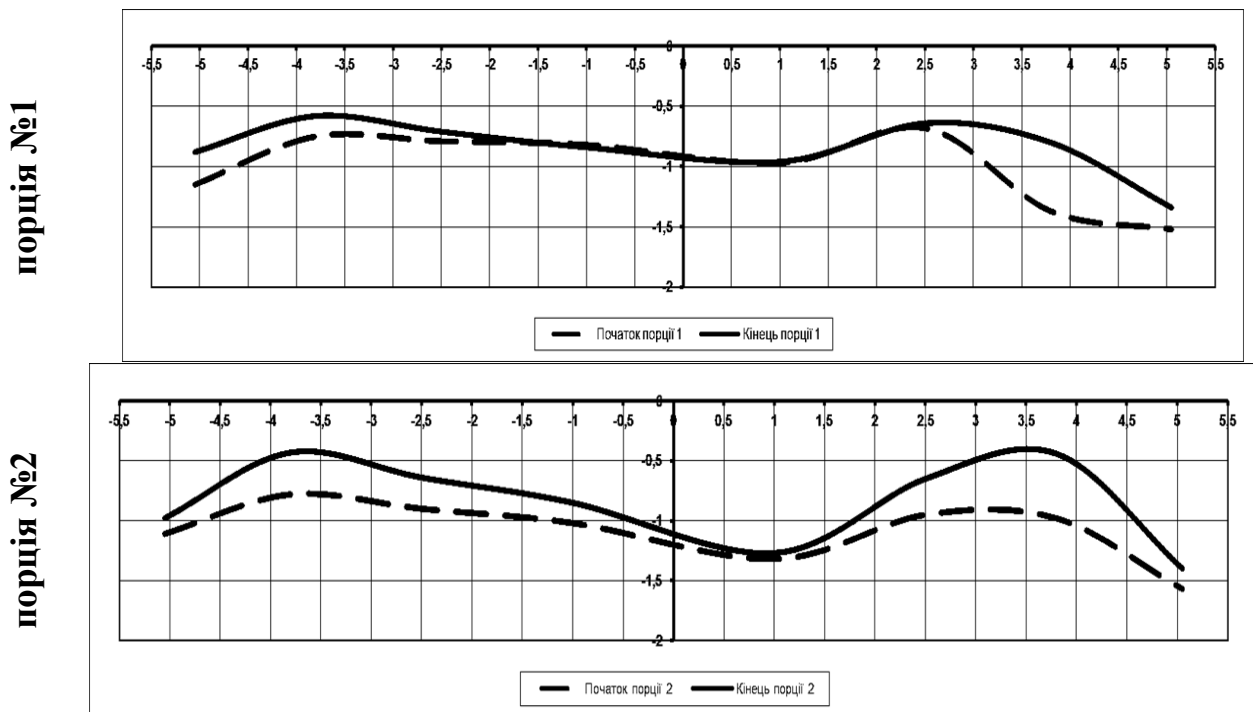


Рис.13. Рельєф поверхні засипу на колошнику по перетину чавунних льоток №1 і №3 ДП №9 при вивантаженні порцій №1 і №2.

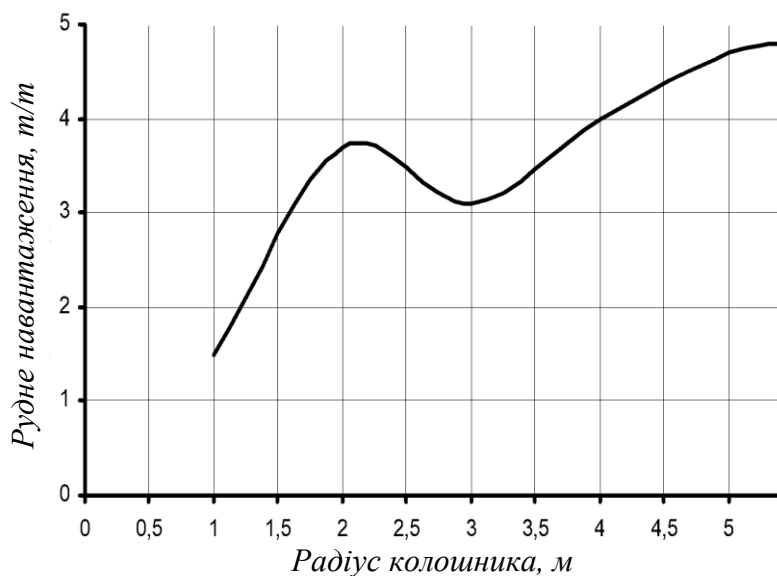


Рис. 14. Реальний розподіл рудних навантажень по радіусу колошника ДП №9.

В цей же період часу роботи даної доменної печі були проаналізовані дані колошникового газу, що відходить. На рис. 15 представлений графік, що характеризує зміну ступеня використання газу CO по радіусу колошника доменної печі №9 в досліджуваний період часу. Аналізуючи графік, слід зазначити, що задовільний ступінь використання монооксида вуглецю спостерігається в кільцевих зонах колошника, що

знаходяться в значеннях радіуса 2,7-5,1 метра.

Деяке зменшення ступеня використання газу CO спостерігається на радіусах колошника 3,2-4,7 м. Хоча рудне навантаження в цьому діапазоні росте. У зв'язку з цим виникає припущення, що в зазначеному діапазоні можливе збільшення ступеня використання газу за рахунок коригування програми завантаження.

Автором дисертаційної роботи був побудований графік, що характеризує зміну порозности залізовмісної частини шихтових матеріалів по радіусу колошника доменної печі. Графік наведено на малюнку 16.

Для аналізу впливу газового навантаження на залізовмісній частині шихтових матеріалів необхідно знати реальну їх кількість (масу), яка знаходиться в радіально кільцевої зоні колошника. Для цього автором був побудований графік, що характеризує зміну маси залізорудних матеріалів по радіусу колошника за цикл (10 подач).

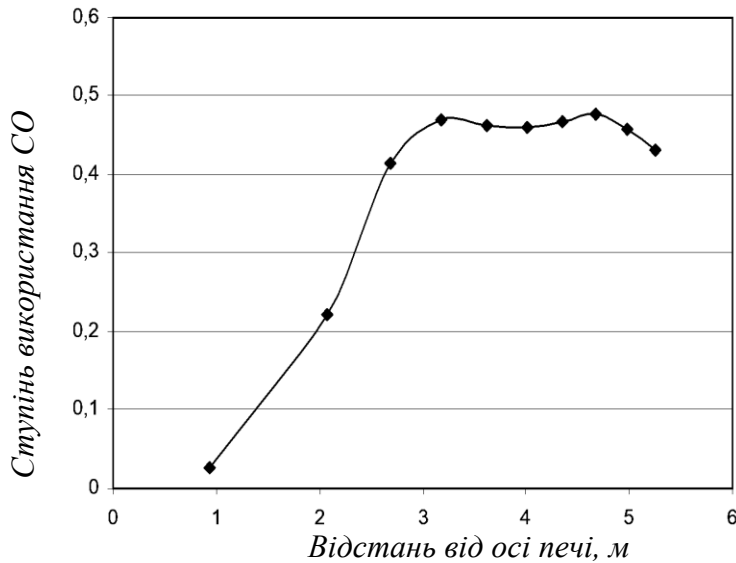


Рис.15. Зміна ступеня використання газу по радіусу колошника доменної печі №9.

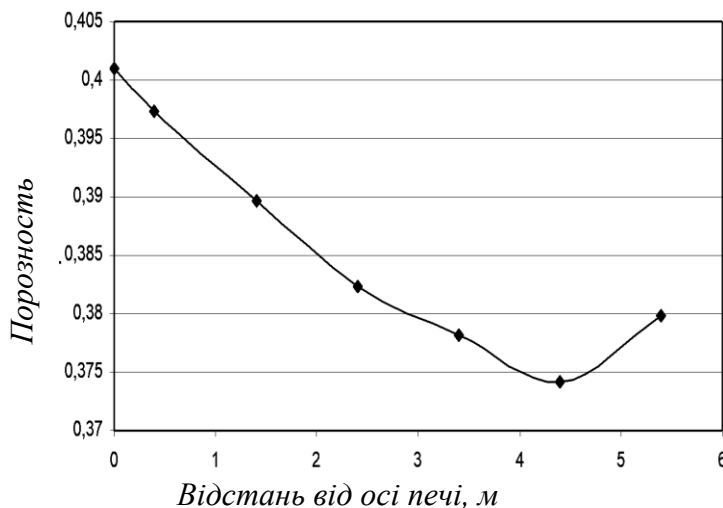


Рис. 16. Розподіл порозності залізовмісної частини шихтових матеріалів на колошнику доменної печі.

використання газу CO і збільшення кількості агломерату (тонн). Після значення 3,2 м по радіусу йде зниження ступеня використання газу CO і зменшення кількість агломерату при збільшенні рудного навантаження.

Таким чином, виходить, що при збільшенні товщини шару більше газу CO відпрацьовує на відновлення Fe_2O_3 до Fe_3O_4 . Після значення радіуса приблизно 3,2 м ми спостерігаємо зниження як кількості агломерату так і ступеня використання газу CO, тобто газ CO, що знаходиться в колошниковому газі в надлишку, «не допрацьовує», тому ступінь використання падає.

Кількість залізорудних матеріалів визначалась з використанням даних радарних датчиків рівня.

Реальне газове навантаження показане на рис. 17.

Для ефективного газорозподілу на колошнику доменної печі необхідно виконання умови рівності кількості газу, що проходить через одиницю маси залізорудної складової доменної шихти по радіусу печі.

У зв'язку з цим критерієм ефективності запропоновано ввести коефіцієнт нерівномірності газорозподілу на колошнику, чисельно рівний відношенню газового навантаження до маси залізорудної складової шихти у кожній РКЗ.

Аналізуючи графік можна зробити наступні висновки. При радіусі від 3,15м спостерігається деяке спочатку збільшення ступеня

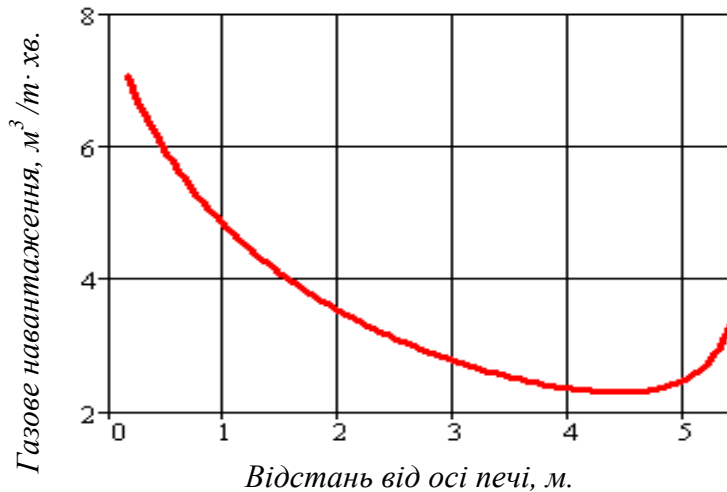


Рис. 17. Реальний розподіл газових навантажень по радіусу колошника.

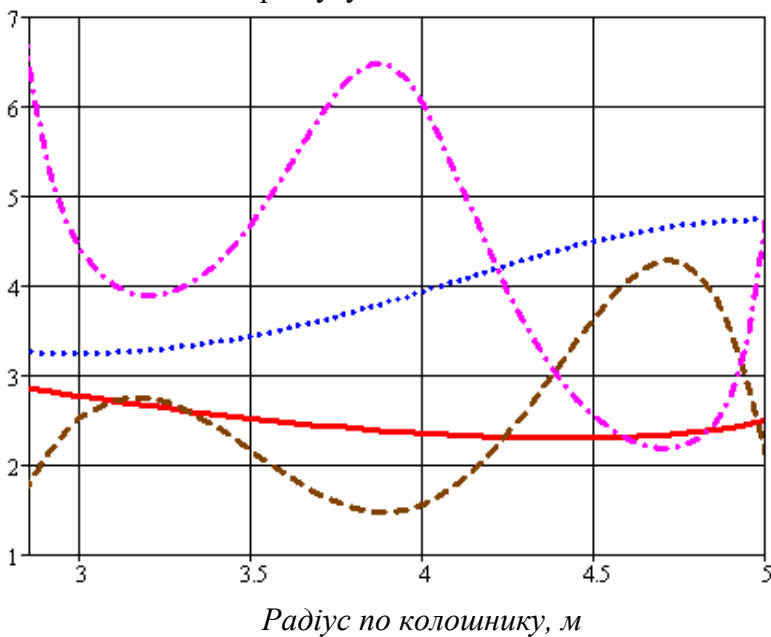


Рис. 18. Розподіл газового навантаження, рудного навантаження, кількості залізорудного матеріалу і коефіцієнта нерівномірності газорозподілу по радіусу колошника.

- - газове навантаження;
- +++++ - рудне навантаження;
- - - - - кількість залізорудного матеріалу;
- · - · - · - коефіцієнт нерівномірності газорозподілу.

ведення коефіцієнта k_{H_2} . Коефіцієнт чисельно дорівнює відношенню газового навантаження по радіусу до маси агломерату завантаженого у відповідні кільцеві зони по радіусу доменної печі.

$$k_{H_2} = \frac{Q_{H_2}}{M_A}. \quad (17)$$

Фізично він показує, яке ж газове навантаження припадає на тону агломерату в даному радіусі доменної печі. Тому, згідно з принципом

В діапазоні 4-5 м ми спостерігаємо збільшення ступеня використання газу CO , а також значне збільшення кількості агломерату, який висипаний в дані РКЗ. При цьому зростає рудне навантаження. Газове навантаження в діапазоні від 3,2 метра та до 4,2 метра падає, після цього плавно збільшується.

У зв'язку з вищевикладеним матеріалом, пропонуються наступні зміни в програму завантаження. У діапазоні від 3,2 метра до 4,2 м слід збільшити кількість агломерату в даних кільцевих зонах. Це спричинить за собою зниження газового навантаження, проте збільшиться ступінь використання газу CO . При цьому дотримуються умови "ідеального" розподілу матеріалів і газів, згідно з яким в будь-якому перетині печі одиниця залізорудного матеріалу оброблялася б однаковою кількістю відновлювального газу.

Запропоновано

«ідеального» розподілу матеріалів і газів в доменній печі, цей коефіцієнт в ідеалі повинен бути постійним для будь-якої точки шихти на колошнику доменної печі. За допомогою даного коефіцієнта зручно коригувати програму завантаження. Крива, що характеризує зміну коефіцієнта $k_{не}$ повинна бути якомога більш прямою. Тобто відповідно до наших пропозицій ми прибираємо «горб» кривої коефіцієнта $k_{не}$ в проміжку від 3,2 м радіусу колошника до радіуса 4,2 метра. Для зменшення коефіцієнта нерівномірності необхідно довантажити зазначену зону залізовмісними шихтовими матеріалами. Це дещо знизить газове навантаження, проте значно підвищить ступінь омивання відновлювальними газами рудної частини шихти. Зазначені заходи дозволяють підвищити рудне навантаження всієї печі, а також стабілізувати газорозподіл в колошниковій зоні.

У подальшому в дисертації наведені результати створення програмного забезпечення для моніторингу фактичного рудного навантаження на колошнику доменної печі. Для виконання програмної реалізації було обрано середовище C ++ Builder. Додаток називається «Blast_Furnace_Loading» - «Завантаження доменної печі».

Товщина шару заданої точки кільцевої зони дорівнює:

$$h_i = (U_i^{\text{кон}} - U_i^{\text{нач}}) + V_{\text{сх}} \cdot t, \quad (18)$$

де $U_i^{\text{нач}}$ - відстань до поверхні засипки перед вивантаженням порції;

$U_i^{\text{кон}}$ - відстань до поверхні засипки після вивантаження порції;

$V_{\text{сх}}$ - швидкість опускання шихти в печі, приймаємо рівною 0,13 м/хв.;

t - час засипання порції, приймаємо рівним 1 хвилині.

Середня товщина шару в кожній кільцевій зоні дорівнює:

$$h_{\text{ср}} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4}. \quad (19)$$

Обсяг шихтових матеріалів при вивантаженні однієї порції:

$$V = \frac{\pi h_{\text{ср}}}{4} (D^2 - d^2), \quad (20)$$

де D - зовнішній діаметр кільцевої зони, d - внутрішній діаметр кільцевої зони.

Маса шихти в кільцевій зоні:

$$m = \gamma V = \frac{\gamma \pi h_{\text{ср}}}{4} (D^2 - d^2), \quad (21)$$

де $\gamma_A = 2 \text{ т/м}^3$, $\gamma_k = 0,5 \text{ т/м}^3$ - насипна маса агломерату і коксу.

Рудне навантаження необхідно порахувати для циклу, що складається з 10 подач.

$$R = \frac{\xi \sum_1^{10} \frac{R_i \delta_i}{\xi + R_i}}{1 - \sum_1^{10} \frac{R_i \delta_i}{\xi + R_i}}, \quad (22)$$

де $\xi = \frac{\gamma_A}{\gamma_k}$, $R_i = \frac{m_A}{m_k}$. m_A - маса агломерату, m_k - маса коксу, – задається для кожної подачі в частках. Результати застосування програмного забезпечення наведені на рис. 19.

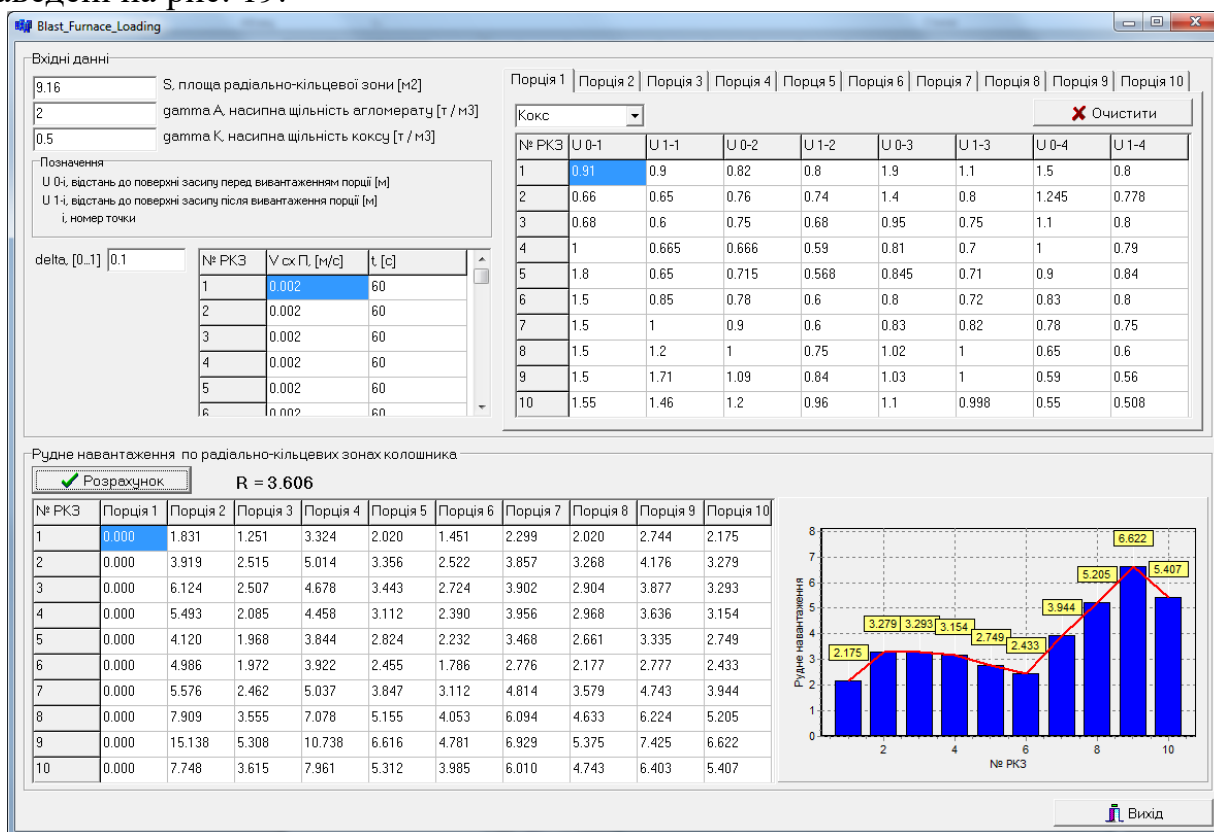


Рис. 19 - Додаток «Blast_Furnace>Loading», результат обчислення фактичного рудного навантаження.

Наступним кроком в роботі була розглянута розроблена автором методика визначення фактичних гранулометричних характеристик шихтових матеріалів, що вивантажуються з накопичувальних бункерів БЗП. Отримана залежність сумарної витрати шихти від середнього діаметра частинок і ступеня відкриття шиберного затвора бункера, наведена на рис. 20.

Для визначення залежності середнього діаметру частинок шихтових матеріалів від середньої сумарної витрати і кута відкриття шиберного затвора бункера запропоновано провести так звану площину рівня, перпендикулярну осі витрати. Перетин цієї площини і поверхні витрати дасть графічну залежність між кутом відкриття шиберного затвора і крупністю матеріалу для конкретного значення витрати. Криві перетину для інших значень витрат мають той же характер і можуть бути з досить високою точністю апроксимувати прямими.

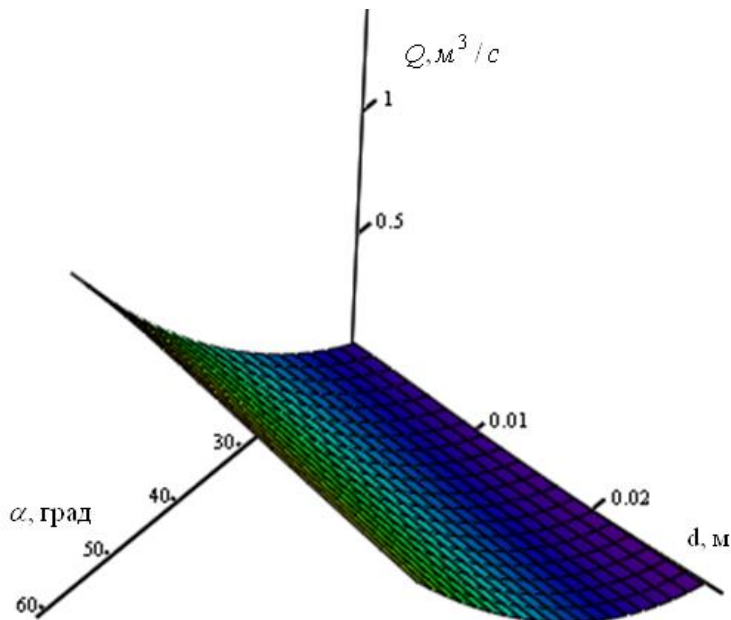


Рис. 20. Залежність сумарної витрати шихти від середнього діаметра частинок і ступеня відкриття шиберного затвора бункера.

Таким чином, використовуючи наведені наукові матеріали, стає можливим визначати фактичні гранулометричні характеристики шихтових матеріалів, що завантажуються безпосередньо в доменну піч. Це дає змогу більш ефективно прогнозувати та корегувати хід доменної плавки.

Для ефективної корекції газодинамічних параметрів колошникової зони та досягнення найвищого можливого при

даних шихтових умовах рудного навантаження в роботі було розглянуто методику визначення оптимальної геометрії шарів залізовмісних шихтових матеріалів на колошнику печі. Проведений аналіз даних дав можливість виявити залежність для визначення раціонального значення вказаного показника вздовж радіусу колошника доменної печі:

$$H(R_x) = e^{-2,25+1,2R_x - 0,62R_x^2 + 0,06R_x^3}, \quad (23)$$

де R_x - радіус колошника.

У п'ятому розділі дисертації наведено результати дослідження впливу газодинамічних параметрів колошникової зони доменної печі та параметрів завантаження на техніко-економічні показники плавки. Повнота використання відновного потенціалу, а також фізичної теплоти газу CO, що утворюється при взаємодії нагрітого повітряного дуття з вуглицем коксу в окислювальній зоні горна, залежить від багатьох чинників: фізико-хімічних властивостей компонентів шихти, що змінюються під впливом нагріву при її сході, фракційного складу компонентів шихти, температури дуття, витрати коксу і співвідношення коксу/ природний газ при використанні газу, а також в значній мірі від газопроникності стовпа шихтових матеріалів. Ці фактори визначають стабільність перебігу фізико-хімічних процесів і особливості ходу печі. Так, зменшення витрат коксу, збільшення частки дрібних фракцій погіршує газопроникність шихти. Важливим інструментом створення раціональної газопроникності є обґрунтований вибір схеми завантаження шихтових матеріалів на колошнику, яка визначає їх розподіл по перетину і висоті печі. При цьому необхідно враховувати зміни в кількості горнового газу і температурі в окислювальній зоні горна.

Вибір температурної зони дослідження фізико-хімічних процесів заснований на тому, що в інтервалі температур $600 \div 1000$ °C відбувається

відновлення оксидів шихти газом CO, інтенсивність якого у великій мірі залежить від стабільності умов газопроникності сформованого шару, тобто, від раціонального розподілу компонентів шихти, яка завантажується.

Основним джерелом CO₂ є реакції непрямого відновлення оксидів заліза, інтенсивний розвиток яких відбувається в інтервалі температур 600 ÷ 900 °С. Певний вплив на кінцевий склад колошникового газу вносить реакція розпаду CO з утворенням сажистого вуглецю і CO₂. Цілком обґрунтованим, особливо при проведенні спрощених розрахунків по визначенню впливу на технологічні параметри доменного процесу газодинамічних умов, представляється використання в якості визначального параметра вмісту в колошниковому газі CO₂ або параметра (CO/CO₂) після встановлення їх зв'язку у вигляді функціональної залежності CO₂ від CO, що враховує фізико-хімічні особливості доменного процесу. Виходячи з особливостей процесів на характерних ділянках по висоті доменної печі необхідно відзначити, що зміна способу завантаження певним чином має впливати на розподіл шихтових матеріалів і, відповідно, газопроникність стовпа шихтових матеріалів. Ці фактори, в свою чергу, визначають ступінь використання потенціалу корисних властивостей CO - його теплової та хімічної енергії.

При вирішенні поставленого в роботі завдання по розробці раціонального способу завантаження і, відповідно, розподілу шихтових матеріалів у доменній печі на основі використання даних про склад колошникових газів обрано такі умови і прийнято ряд нижченаведених припущень.

1. Як об'єкт відновлення обрана зона печі з температурою 600 - 900 °С, де інтенсифікуються, в основному, реакції непрямого відновлення оксидів заліза і мінімізовано розвиток реакцій розкладання CO та перебіг відновлення оксидів кремнію і марганцю за прямим чи непрямым механізмом.

2. Розрахунок можливого збільшення рудного навантаження ґрунтується на використанні даних про вміст газоподібного продукту відновлення оксидів заліза - CO₂ в колошниковому газі при зміні способу розподілу шихтових матеріалів.

3. Виключення реакцій непрямого і прямого відновлення кремнію і марганцю з їх оксидів (SiO₂ і MnO) обґрунтовано термодинамічною заборонаю їх перебігу в інтервалі температур дослідження. Зазначені реакції можуть протікати за механізмом прямого відновлення при більш високих температурах (> 1500 °С), а основна частина кремнію і марганцю відновлюється з (SiO₂), в основному, при проходженні крапель шлаку в горні між шматками коксу.

4. Розрахунки основних показників процесу виробляли з використанням реакції непрямого відновлення Fe₂O₃ монооксидом вуглецю для умов повного відібрання кисню з утворенням Fe і CO₂.

5. Зважаючи на відсутність будь-якої кореляційної (функціональної) зв'язку між змістами CO і CO₂ в колошниковому газі і незначною відмінністю вмісту CO при зміні розподілу шихти розрахунки можливого збільшення рудного навантаження, зниження витрати коксу і інші показники процесу розраховували по фактичній зміні (збільшенню) змісту в газах CO₂ при зміні способу завантаження шихти.

6. Оцінка теплового стану об'єкта дослідження проводилася на основі розрахунку питомої теплопродуктивності (або теплоспоживання) досліджуваних реакцій в заданому інтервалі температур.

Підтвердженням доцільності обраного для дослідження впливу способу завантаження температурного інтервалу по висоті доменної печі є і встановлене в роботах S-образний розподіл температур по висоті доменної печі. Величина залишкового вмісту CO в колошниковому газі залежить від умов транспорту газу в шарі шихтових матеріалів, які визначаються способом завантаження і розподілу матеріалів, тобто, газопроникністю шару. Цей параметр в кінцевому підсумку і визначає повноту використання потенціалу відновлювальних та теплових властивостей CO. Величина ж вмісту CO₂ є сумою продуктів різних реакцій, як екзотермічних так ендотермічних, які реалізуються в умовах доменної плавки в інтервалі температур 200 - 1250 °С. Відомо, що при мінімізації діапазону зміни фракційного складу компонентів вихідної шихти, досягається кращий розподіл газу по перетину печі без прояву ряду небажаних для доменного процесу явищ, тобто, забезпечується рівномірна газопроникність стовпа шихти і розподіл газового потоку по перетину печі. Визначенню раціональних компонентного і фракційного складу шихти присвячена велика кількість досліджень, результати яких використовуються в практиці доменного виробництва. Тому важливим фактором, що вимагає всебічного аналізу та який визначає умови транспорту газу-відновника, ступінь використання його відновлювальних і теплових властивостей і в підсумку кінцеві результати процесу, є розподіл шихтових матеріалів по перетину і висоті доменної печі. Зміна способу завантаження певним чином впливає на розподіл шихтових матеріалів і, відповідно, газопроникність стовпа шихтових матеріалів, що в свою чергу визначає ступінь використання потенціалу корисних властивостей CO - його теплової та хімічної енергії. Відсутність якої-небудь значущої кореляційної (функціональної) залежності між вмістом в газах CO₂, на яке надає певний вплив зміна способу завантаження шихти, і CO, яке в умовах зміни газопроникності стовпа шихтових матеріалів практично не змінюється ймовірно, може бути пояснено таким. На верхніх горизонтах шихти в інтервалі температур 200 ÷ 600 °С на свіжовідновлених частинках заліза відбувається реакція розкладання CO з утворенням C і CO₂ та виділенням значної кількості теплової енергії. Незначні відхилення у вмісті CO в колошниковому газі можуть свідчити про створення практично однакових умов для перебігу непрямого відновлення оксидів заліза при зміні способу розподілу шихтових матеріалів. Зміни умов передачі теплоти при зміні способу завантаження призводять до перерозподілу вкладів непрямого і прямого відновлення оксидів заліза. На кінцевий вміст CO і CO₂ надає певний вплив і реакція розпаду CO на свіжовідновлених частинках заліза в інтервалі температур 400 -1000 °С

Для реалізації поставленого в роботі завдання необхідно виділити основні параметри, які можуть зазнавати зміни при коригуванні алгоритму роботи системи завантаження. До цих параметрів, які найбільшою мірою впливають на продуктивність і витрату коксу, необхідно віднести наступні: рудне навантаження по печі; розподіл рудного навантаження по радіально-кільцевим

зонам колошника; ступінь використання CO і показники, які визначають газодинамічні умови у шарі шихти «сухої» зони.

Раціональний розподіл рудного навантаження (відношення маси залізорудних матеріалів до коксу) по радіусу колошника дозволить значно збільшити ступінь використання газу CO, що призведе до більш повного завершення металургійних реакцій в зоні доменної печі, обмеженою температурним інтервалом $200 \div 900^{\circ}\text{C}$. При цьому раціональна організація розподілу компонентів вихідної шихти призведе до нових позитивних ефектів - можливості збільшити рудне навантаження - продуктивність печі. Розподіл рудного навантаження по радіусу колошника, надає певний вплив на хід фізико-хімічних перетворень в цій зоні. Крім того, раціонально обґрунтований вибір розмірів осової віддушини дозволяє домагатися такої газодинаміки в шарі доменної шихти, при якій створюються умови для стабільного без порушень ходу доменної плавки. Таким чином, керована ззовні взаємодія сукупності факторів (загального рудного навантаження, ступеня використання потенціалу корисних властивостей відновного газу, показників газодинаміки) повинна призводити до підвищення основних показників доменної плавки.

На основі аналізу даних роботи доменних печей була побудована наступна залежність виду $P = f(\eta_{\text{CO}})$:

$$P(\eta_{\text{CO}}) = \frac{1}{a + b \cdot \eta_{\text{CO}} + c \cdot \eta_{\text{CO}}^2}, \quad (24)$$

де P - продуктивність доменної печі, т/добу .;

η_{CO} - ступінь використання газу CO,

Графічно залежність за виразом (24) проілюстрована на рис. 21.

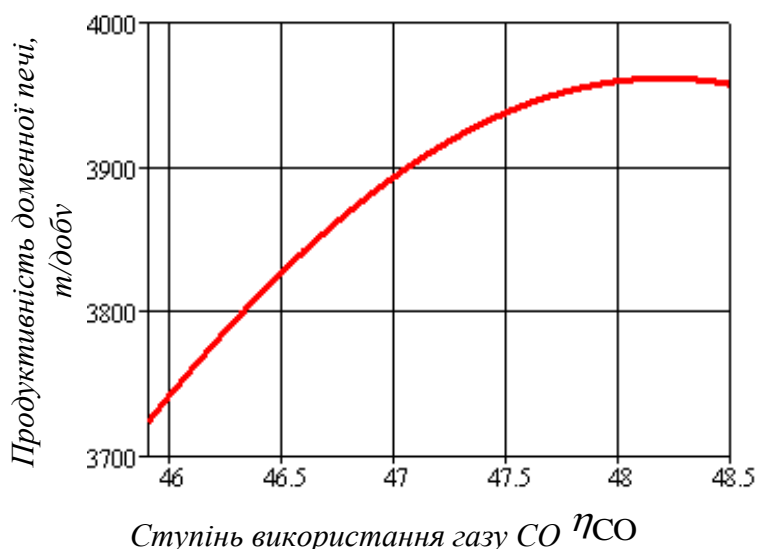


Рис. 21. Взаємозв'язок продуктивності доменної печі зі ступенем використання потенціалу корисних властивостей CO.

Розрахунки з використанням наведених вище даних, а також аналіз графічної залежності на рис. 21, показують, що збільшення ступеня використання газу CO на 5%, щодо максимального значення в процесі всіх експериментальних досліджень, призводить до підвищення продуктивності на ~ 6%.

На другому етапі обробки даних, проаналізовано вплив ступеня використання газу CO на витрату коксу. Результат отриманий у вигляді функціональної залежності:

$$PK(\eta_{CO}) = a + b \cdot \eta_{CO}^2 + c \cdot \eta_{CO}^3, \quad (25)$$

де $a = -306,79$, $b = 1,24$, $c = -1,84 \cdot 10^{-2}$, PK - витрата коксу, кг/т.

Графік залежності (25) показаний на рис. 22.

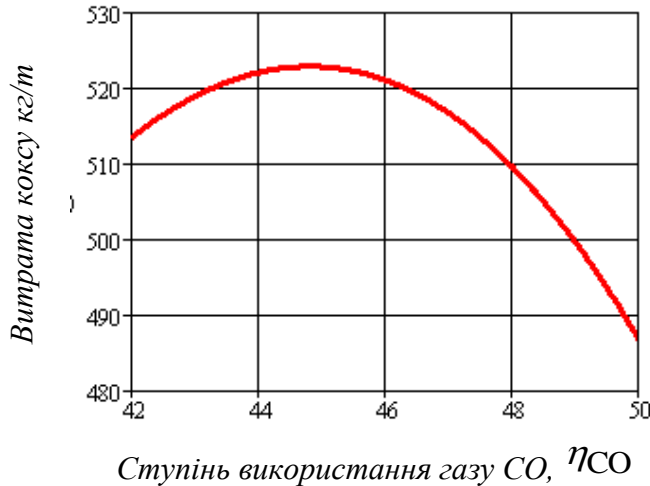


Рис. 22. Взаємозв'язок витрат коксу доменної печі зі ступенем використання газу CO.

На рис. 23 (гістограма) чітко простежується вплив способу розподілу шихтових матеріалів на вміст CO₂. Підтвердженням цього впливу є залежність продуктивності від комплексного параметра - η - ступеню використання CO - рис.24. Для зручності аналізу гістограми дані для продуктивності наведені помноженими на коефіцієнт 0,01.

Аналіз залежності на рис. 23 показує що максимум продуктивності доменної печі (3974 т / добу) може бути досягнуто при $\eta = 48$, яке відповідає змісту в газах CO - 22,9%, CO₂ - 21,4%.

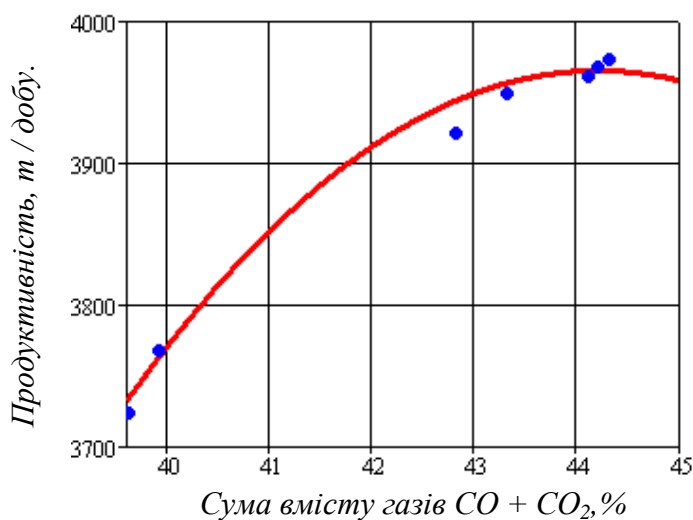


Рис. 24. Відповідність продуктивності сумарного процентного вмісту CO і CO₂ в колошниковому газі.

У шостому розділі роботи наведені наукові матеріали щодо розробці алгоритмів корекції режимів завантаження доменних печей, що обладнані системою радарного моніторингу за поверхнею засипу на колошнику завантаження конкретної доменної плавки.

Розроблені в дисертаційній роботі математичні моделі та методики розрахунку

взаємозв'язку керуючих впливів та технологічних показників доменного процесу дозволяють оперативно коригувати хід печі за допомогою системи завантаження з метою досягнення найкращих показників. Найкращого результату можна досягнути у разі комплексного використання наведених методик та способів розрахунків. Для реалізації цієї задачі необхідно розробити комплексний алгоритм розрахунку коригуючих параметрів завантаження доменної печі та його застосування з використанням існуючих систем моніторингу за газовою динамікою та параметрами засипу шихтових матеріалів на колошнику. Аналіз результатів промислових випробувань радіолокаційної системи визначення профілю засипу шихтових матеріалів показав, що її функціональні характеристики дозволяють ефективно визначати профіль поверхні засипу шихти.

Метою функціонування системи є отримання оперативної інформації про стан рельєфу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі, а також оперативного коригування керуючих впливів по ходу плавки для вирішення наступних завдань:

- 1) оперативного прогнозу ходу доменного процесу і теплового стану печі на момент завантаження в піч чергової порції матеріалів;
- 2) своєчасної реалізації обґрунтованих дій, що впливають на хід доменного процесу, адекватних його відхилень в процесі подальшого розвитку динамічного управління;
- 3) коригування управлінь завантажувального пристрою при зміні шихтових умов (гранулометричного складу, вмісту дрібної фракції агломерату, окатишів і ін.);
- 4) забезпечення заданого загального рудного навантаження та його розподілу по радіально-кільцевих зонах колошника;
- 3) поліпшення техніко-економічних показників роботи доменної печі.

Профіль засипу шихти на колошнику доменної печі визначається в результаті зондування заданих ділянок поверхні шихтових матеріалів

індикаторами рівня - радіодалекомірами-рівнемірами (РДУ), дія яких заснована на принципі радіолокації.

Система, що розробляється призначена для контролю стану засипу на колошнику доменної печі засобами КВП з трансляцією інформації в АСУ ТП, а також надання рекомендацій по корекції завантаження при зміні умов плавки.

Показання радарів РДУ, встановлених на колошнику ДП, знімаються за допомогою контролерів і передаються в систему управління в режимі реального часу. Величини рівня шихтового матеріалу, виміряні в заданих точках, приймаються від встановлених на колошнику печі радарів і вносяться в базу даних.

Перед початком завантаження ДП задані загальне і приватне (по 10-ти радіально-кільцевих зонах) рудне навантаження РКЗ1 ... РКЗ10, а також прийнята вихідна програма завантаження, що включає в себе наступні параметри:

- послідовність шихтових матеріалів (агломерат А і кокс К);
- маси відповідних шихтових матеріалів в кожній подачі m_i ;
- кути нахилу лотка БЗП β_i ;
- кути відкриття шиберів відповідних накопичувальних бункерів α_i .

Крім того, в базі даних містяться дані про насипну вагу, середній розмір шматків, а також коефіцієнти внутрішніх втрат Шезі і коефіцієнта місцевих втрат енергії потоку шихтових матеріалів.

Послідовно виконуються наступні етапи:

1) Здійснюється цикл завантаження, що складається з 10 послідовних подач шихтових матеріалів (по черзі по 5 подач з кожного бункера) відповідно до початкової програми завантаження.

2) Фіксуються 11 профілів засипу: початковий (перед циклом подач) і 10 профілів після кожної подачі.

3) Визначається фактичний розподіл загальної товщини шару залізорудних матеріалів (ЖРМ) за цикл подачі $\delta(x)$, де x - координата по радіусу печі.

4) Виконується порівняння фактичного розподілу товщини шару ЖРМ $\delta_f(x)$ з заданим розподілом $\delta_{зад}(x)$.

5) У разі невиконання умови $\delta_i = |\delta_{ф i} - \delta_{зад i}| < \Delta\delta_{доп}$ (де $\Delta\delta_{доп}$ - допустима похибка товщини шару ЖРМ: для коксу $\Delta\delta_{доп} = 3 d_{скв}$, а для агломерату і $\Delta\delta_{доп} = 5 d_{скв}$) розраховується необхідне зміщення центрів потоків шихтових матеріалів для кожної РКЗ - Δx_i .

6) Розраховується і вводиться в САУ необхідна зміна кутів нахилу лотка БЗП $\Delta\beta_i$ для кожної його позиції при максимальному відкритті шиберів α_{max} .

7) Якщо за розрахунком потік шихтових матеріалів потрапляє на стінку печі, то визначається необхідна зміна $\Delta\alpha_i$.

Через N циклів подачі перевіряється виконання умови п. 5 і, в разі необхідності, змінюються параметри завантаження на величину $\Delta\beta_i$ і $\Delta\alpha_i$ з метою найбільш ефективного виконання програми завантаження. Кількість циклів подачі N визначає майстер печі за результатами аналізу стану шихтових умов і ходу печі.

ВИСНОВКИ

1. Дослідження показали, що рух шихтових матеріалів, як насипного вантажу по трактах завантаження доменних печей в значній мірі залежить не тільки від виду матеріалу, а й від його показників гранулометрії. Встановлено, що зміна розміру частинок шихти досить сильно впливає на зміну траєкторії шихти в колошниковому просторі доменної печі.

2. Встановлено кореляцію між показниками гранулометрії і координатою зсипання шихти на поверхні засипу колошника доменної печі. На підставі теоретичного аналізу встановлено, що на формування поверхні засипу шихти на колошнику доменної печі при інших рівних умовах значно впливає ступінь відкриття шиберного затвора накопичувального бункера безконусного завантажувального пристрою доменної печі. Таким чином, з'явилася можливість управління корекцією траєкторії потоків шихтових матеріалів зміною ступеня відкриття шибера при інших рівних умовах.

3. В результаті експериментальних досліджень з використанням натурного моделювання встановлено, що отримана аналітична модель витоку матеріалів з бункера завантажувального пристрою коректна і може бути застосованою для будь-яких бункерних пристроїв.

4. В ході процесу завантаження шихтових матеріалів в доменну піч відбувається неминуче подрібнення частинок матеріалу, що істотно впливає на порозність шарів шихти завантаженої в доменну піч і, як наслідок, на хід доменної плавки. У разі наявності даних про фактичну крупність компонентів шихти, персонал печі має можливість корекції для поліпшення параметрів плавки. В зв'язку з цим автором розроблена методика визначення фактичної крупності компонентів шихти, що завантажуються в доменну піч, оснащену конусними і безконусними завантажувальними пристроями.

5. Виявлено, що рух шихтових матеріалів по елементам завантажувальних пристроїв конусного і безконусного типу має вільно-дисперсний характер, тому для визначення динамічних характеристик потоку шихти можливе застосування рівняння Бернуллі для суцільних середовищ, що володіють властивістю однорідності і парціальности. Для адекватного застосування рівняння Бернуллі визначені коефіцієнти втрат механічної енергії потоку і коефіцієнт внутрішніх втрат, причому коефіцієнт визначається як для компонентів шихти окремо, так і для сумішей різного роду матеріалів.

6. У промислових умовах при зміні шихтових умов доменної плавки змінюються фізико-механічні та гранулометричні характеристики частинок шихтових матеріалів. Це, в свою чергу, впливає на траєкторії потоку шихти в колошниковому просторі. Тому для підтримки ефективності параметрів технологічного процесу необхідна оперативна корекція керуючих впливів завантажувального пристрою - кута відкриття шибера накопичувального бункера і кута нахилу обертового лотка-розподільника. Показано, що необхідну корекцію для забезпечення стабільності застосування заданої програми завантаження можливо забезпечити як спільним зміною кутів нахилу лотка і відкриття шиберного затвора бункера так і окремо.

7. Розроблено підхід для визначення фактичного рудного навантаження доменної печі, заснований на використанні даних системи моніторингу поверхні засипу доменної печі без використання інженерних методик. Це дало можливість ефективно коригувати програми завантаження даних печей, обладнаних безконусним завантажувальним пристроєм для забезпечення стабільності показників ефективності роботи доменної печі, а також зниження витрати коксу.

8. Аналітичні дослідження газодинаміки колошникової зони доменної печі дали можливість визначити газове навантаження по радіусу колошника печі. В роботі показано розподіл порозности, сегрегації, рудної складової шихтових матеріалів по колошнику. За допомогою коефіцієнта нерівномірності газорозподілу визначені ділянки радіусу колошника печі, де необхідна корекція рудного і газового навантажень, що дало можливість наблизити газорозподіл до найкращого.

9. На підставі наведених досліджень був розроблений алгоритм автоматичної корекції параметрів завантаження доменної печі, які в сукупності з АСУ ТП доменної печі утворюють комплекс для прийняття рішень технологічного персоналу. Це дозволяє при коливання шихтових умов забезпечити сталість економічних показників плавки в цілому.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз:

1. **Селегей А.Н.** Математическое описание движения шихтовых материалов по лотку бесконусного грузочного устройства. / А.Н.Селегей, В.И. Головкин А.А. Верховская. // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. Секция «Системный анализ и синтез процессов в металлургии и машиностроении» – 2015 – №2(97) – С. 57-67. Видання включено до НМБ Index Copernicus International.

2. Бубликов Ю.А. Анализ технологических особенностей и способов легирования стали азотом. / Ю.А.Бубликов, Г.А.Поляков, С.Н.Подгорный, С.Н. Селегей, **А.Н.Селегей** // «Системные технологии» (106) 2016 стр. 124-138. Видання включено до НМБ Index Copernicus International.

3. Головкин В.И. Применение радиолокации для определения уровня сыпучих материалов в металлургических агрегатах. / В.И. Головкин, Н.В Михайловский, **А.Н. Селегей**, И.Г. Тригуб, М.А. Рыбальченко. // Сучасні проблеми металургії. Том 19. Випуск 1 2016. С 247-254. Видання включено до НМБ Index Copernicus International.

4. **Селегей А.Н.** Истечение шихтовых материалов из конусного затвора грузочных устройств доменной печи / А.Н. Селегей, В.П. Иващенко, В.И. Головкин, Н.В. Михайловский, С.Н. Селегей, А.С. Миргородская // «Сучасні проблеми металургії», № 23 – 2020 ISSN-print, 1991-7848 83 ISSN-online 2707-9457 DOI: 10.34185/1991-7848.2020.01.08 С. 83-92. Видання включено до НМБ Index Copernicus International.

5. **Selegej A.** The parameters of burden flow from the bins of bell-less top charging system of blast furnaces. / A. Selegej, V. Ivaschenko, Chistyakov, V. Golovko // *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychogo univertytetu –2020/ №3*, – С. 41-46. (SCOPUS).

6. Рибальченко М.О. Модель управління формуванням багатокомпонентних порцій шихти на доменному конвеєрі / М.О. Рибальченко, **А.М.Селегей**, В.І. Головко, С.М. Селегей, О.С. Миргородська // *Наука та інновації – 2020, том 16(6):36-45. (Web of Science).*

7. **Selegej A.** Coefficient of local loss of mechanical energy of the flow for a mixture of charge materials. / A. Selegej, V. Ivaschenko, V. Golovko, R.Kiriya, L. Kvasova // *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychogo univertytetu – 2021/ №2*, – С. 26-31. (SCOPUS).

8. **Селегей А.М.** Методика визначення фактичного рудного навантаження доменної печі з допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. / А.М. Селегей, Т.В. Селівьорстова // *«Системні технології» №6 (131) 2020*, – С. 175-185. Видання включено до НМБ Index Copernicus International.

9. Тригуб И.Г. Компьютерная модель формообразования поверхности шихты в условиях перекося засыпи при загрузке печей шахтного типа. / И.Г.Тригуб, В.И. Головко, **А.Н. Селегей**, М.А. Рыбальченко, Г.А. Папанов. // *Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії №18 (2015)*. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. –С.75-83.

Статті у наукових фахових виданнях України:

10. Golovko V.I. Radar system for determining of the profile of the charge cover in the top of the BF // V.I. Golovko N.V. Mykhailovskyi, **A.N. Selegei**, I.G. Trygub, A.A. Verkhovskaia, M.A. Rybalchenko. / - *Computer science, information technology, automation*, – 2016, No. 2, P.P.17-20.

11. Головко В.И. Определение геометрических параметров доз шихтовых материалов с целью определения их секундных объемов. / В.И.Головко М.А. Рыбальченко, **А.Н. Селегей**. // ДВНЗ «Криворізький національний університет. Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. Випуск 100. Кривий Ріг – 2015.

12. Тригуб И.Г. Возможность применения радарного метода контроля для управления распределением шихтовых материалов в доменной печи. / И.Г.Тригуб, В.І. Головко, М.В. Михайловський, **Селегей А.М.** // *Коллективна монографія. Інтеграція економічних та технічних процесів: сучасний стан і перспективи розвитку: колективна монографія / під заг. ред. Савчук Л.М.* – Х: Вид-во «Діса плюс», –2015. – С.445-456. ISBN 978-617-7064-86-1.

13. **Селегей А.Н.** Возможность использования радиолокации в системах шихтоподачи. / А.Н. Селегей, В.И. Головко, Н.В. Михайловский, И.Г. Тригуб, М.А. Рыбальченко // *Зб. наук. праць Економічна кібернетика: Проблеми управління соціально-економічними системами.* // Дніпропетровськ «Пороги» 2016. С. 230-233.

14. Кирия Р.В. Физическая модель истечения сыпучего материала из бункера загрузочного устройства. / Р.В.Кирия, М.А.Рыбальченко, **А.Н.Селегей**,

В.И.Головко, И.Г. Тригуб. // *Економічні, управлінські, правові та інформаційно-технічні проблеми діяльності підприємств. Кол. Монографія.* – 2016, Дніпро «Герда» 2016 С. 494-501.

15. Иващенко В.П. Определение параметров выгрузки шихты из бункеров бесконусного загрузочного устройства доменной печи. / В.П. Иващенко, Р.В. Кирия, **А.Н. Селегей**, В.И. Головко, М.А. Рыбальченко, Г.А. Папанов, С.Н. Селегей. // *Збірник наукових праць національного гірничого університету № 52.* С. 192-198. ISSN 2071-1859.

16. Рыбальченко М.А. Гибкая система формирования многокомпонентных порций шихты для загрузки в доменную печь / М.А. Рыбальченко, В.И. Головко, Р.В. Кирия, **А.Н. Селегей**, И.Г. Тригуб, Г.А. Папанов. // *Збірник наукових праць національного гірничого університету № 52.* С. 255-264. ISSN 2071-1859.

17. **Селегей А.Н.** К вопросу создания информационной модели загрузки шихты в доменную печь. / А.Н. Селегей, В.И. Головко, М.А. Рыбальченко, И.Г. Тригуб, И.А. Маначин. // *Збірник наукових праць національного гірничого університету № 52.* Стр. 272-278. ISSN 2071-1859.

18. **Селегей А.Н.** Создание информационной модели загрузки шихты в доменную печь. / А.Н. Селегей, В. И. Головко, М.А. Рыбальченко, И.Г. Тригуб, И.А. Маначин. // *Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості. Збірник наукових праць Національного гірничого університету №2.* Дніпро НГУ, 2017.

19. **Селегей А.М.** Дослідження руху шихтових матеріалів по лотку-розподільнику безконусного завантажувального пристрою доменної печі / А.М. Селегей, С.М.Селегей. // *Теорія і практика металургії №2, 2020р.,* Стр 44-53. DOI 10341-85/tpm.3.2019.04

Статті у закордонних виданнях:

20. **Селегей А.Н.** Математическое описание движения сыпучих материалов в условиях неустановившегося режима / А.Н.Селегей, М.А.Рыбальченко, В.И.Головко, Р.В.Кирия // CZESTOCHOWA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY FACULTY OF PRODUCTION ENGINEERING AND MATERIALS TECHNOLOGY. A collective monograph edited by Jarosław Boryca, Rafał Wyczółkowski Series: Monografie Nr 56 Częstochowa 2016 С. 462-465.

21. **Селегей А.Н.** Определение динамических параметров потока сыпучего груза по наклонным течкам круглого поперечного сечения. / А.Н.Селегей, В.П. Иващенко, В.И. Головко, С.Н. Селегей, Н.В. Михайловский, А.Г. Папанов. // *Вестник Карагандинского государственного индустриального университета № 3 (30) – 2020.* С. 10-17.

Патенти України на винахід:

22. Патент (UA) №139763; С21В 7/00; С21В 7/18; С21В 7/20. Спосіб завантаження шихтових матеріалів в доменну піч / В.П. Иващенко, В.І. Головко, С.М. **Селегей**, А.М. Селегей, М.О. Рибальченко, Ю.О. Бубликов. – Опубл. 27.01.2020, Бюл. № 2.

23. Патент (UA) №122271; C21B 7/00; C21B 7/18; C21B 7/20, F27B 1/20. Спосіб завантаження шихтових матеріалів в доменну піч / В.П. Іващенко, В.І. Головка, С.М. Селегей, А.М. Селегей, М.О. Рибальченко, В.І. Вишняков. – Опубл. 12.10.2020, Бюл. № 19.

Матеріали, які засвідчують апробацію дисертації на наукових конференціях:

24. **Селегей А.Н.** Создание информационной модели загрузки шихты в доменную печь / А.Н. Селегей, В. И. Головка, М.А. Рыбальченко, И.Г. Тригуб, И.А. Маначин. // «XII Міжнародна конференція з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості»: Зб. тез доповідей (м. Дніпро, 23-24 листопада 2016 року). – Дніпро, НГУ. – 2016.

25. **Селегей А.М.** Model of movement of granular materials by elements of tree-free loading device domain furnace. / Селегей А.М., Селегей С.М., Петренко В.О. Квасова Л.С. / Actual trends of modern scientific research. Abstracts of IV International Scientific and Practical Conference, Munich, Germany, 11 -13 October 2020.

26. **Selegej A.N.** Research of the unloading of charge materials from the cone valve of the loading devices of the blast furnace. / A.N.Selegej, V.A.Petrenko, L.S.Kvasova. // Science, engineering and technology: global trends, problems and solutions. September 25–26, 2020 Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic 2020, September 25–26, – 2020.

27. **Selegej A. N.** Flow dynamics of granular material / A. N. Selegej, S. N. Selegej, N. V. Mikhailovsky, L. S.Kvasova. // The 3 rd International scientific and practical conference “Science and education: problems, prospects and innovations” (December 2-4, 2020), Kyoto, Japan. – 2020. P. 107 – 113.

28. Темчур В.О. Розробка спеціалізованого програмного забезпечення для дослідження рудного навантаження доменної печі / В.О.Темчур, Т.В. Селівьорстова, **А.М. Селегей** // Восьма ювілейна міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, присвячена 20-річчю ради молодих вчених дніпропетровської області «Молодь: наука та інновації» 26-27 листопада 2020 р., Дніпро – 2020. – с. 137.

АНОТАЦІЯ

Селегей А.М. Розвиток наукових основ управління завантаженням доменної печі шихтовими матеріалами з урахуванням їх дисперсності.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів» - Національна металургійна академія України, Міністерство освіти і науки України, м. Дніпро, 2021.

У дисертаційній роботі виконано комплекс теоретичних розробок і експериментальних досліджень, присвячених динаміці руху шихти по трактах завантаження сучасних доменних печей, а також розробці теоретичних основ автоматичного коригування ведення доменної плавки на підставі даних газодинаміки колошникової зони доменної печі. Дисертація присвячена

дослідженню процесів завантаження доменних печей, а також розробці наукових основ для автоматичного ведення доменної плавки.

Вперше встановлено закономірності зміни рельєфу поверхні засипу на колошнику від гранулометричного складу потоку доменної шихти при використанні засипних апаратів конусного і безконусного типів. Раніше такі закономірності відомі не були. Це дозволяє підвищити точність прогнозування газодинамічного режиму роботи доменної печі, знизити витрату коксу і природного газу, а також збільшити міжремонтні терміни експлуатації печі на 15-20%.

Вперше встановлено закономірності комплексного впливу конструктивно-технологічних параметрів систем завантаження доменних печей на рельєф шихти на колошнику. Це дозволило здійснювати оперативну корекцію рельєфу шихти на колошнику, що призвело скорочення витрат енергоносіїв на 1,5%.

Вперше встановлені інтегральні закономірності між кінематичними параметрами потоку шихтових матеріалів за елементами систем завантаження і їх пропускною спроможністю. Раніше такі дані носили фрагментарний характер. Це дозволило підвищити ефективність управління завантаженням доменних печей і, як наслідок, підвищити показники плавки в цілому.

Вперше встановлено експериментально та теоретично обґрунтовано, що корекцію рельєфу шихтових матеріалів на колошнику можна проводити як окремо зміною кута нахилу лотка-розподільника і величиною відкриття шихтового затвора бункера БЗП, так і спільним зміною зазначених параметрів.

З огляду практичного застосування матеріалів дисертаційної роботи виконано наступне:

- розроблені наукові основи корекції програм завантаження доменних печей, що забезпечують раціональні режими плавки на конкретних використовуваних шихтових умовах;

- встановлено та експериментально підтверджено, що для ефективного управління потоками шихтових матеріалів в трактах завантаження необхідно змінювати не тільки кут нахилу лотка-розподільника безконусного завантажувального пристрою, але і кут відкриття шиберного затвора накопичувального бункера. Це дає можливість найбільш точно забезпечувати рудне навантаження по радіально-кільцевих зонах колошника доменної печі;

- запропоновано новий метод визначення раціональних параметрів шарів шихтових матеріалів в сухій зоні доменної печі, що забезпечують найкращу газодинаміку при існуючих шихтових умовах;

- запропоновано новий алгоритм роботи автоматичної системи управління завантаженням доменної печі, що дозволяє коригувати програми завантаження для конкретних умов, а також при їх активній зміні;

- підтверджена ефективність техніки моніторингу процесу динамічної зміни профілю засипу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі за допомогою радарної техніки. Розроблений пілотний алгоритм завантаження і його корекції впроваджений в систему автоматичного управління завантаженням доменної печі успішно випробуваний на моделі.

Основні положення дисертації використовуються в навчальному процесі під час виконання магістерських та бакалаврських дипломних робіт студентами Національної металургійної академії України.

Розроблені в дисертаційній роботі методики та технічні рішення щодо визначення раціональних параметрів завантаження доменних печей, технології ведення плавки і основних характеристик завантажувального пристрою дозволяють аналітично визначати параметри для коригування програм завантаження і створюють основу для повної автоматизації процесу завантаження.

Методики і технічні рішення, отримані в даній роботі, впроваджені на ПрАТ "ДнепроГідроМаш", а також на Золотоніському машинобудівному заводі ім. І.І. Лепсе. З їх допомогою проводиться проектування сучасних завантажувальних пристроїв доменних печей, які плануються до експлуатації на ПАТ ДМКД, ПАТ "Азовсталь", ПАТ "Запоріжсталь".

Ключові слова: доменна піч, завантажувальний пристрій, сипучий матеріал, тракти подавання шихти, агломерат, кокс, рудне навантаження, газодинаміка колошника, програма завантаження.

ABSTRACT

Selehei A. M. Development of scientific fundamentals for charging blast furnace burden with account for the particle sizes thereof.

The thesis for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.16.02 – ‘Metallurgy of Ferrous and Non-Ferrous Metals and Special Alloys’ – the National Metallurgical Academy of Ukraine, the Ministry of Education and Sciences of Ukraine, Dnipro, 2021.

The doctoral thesis is dedicated to the study of the charging blast furnace burden as well as to the development of scientific fundamentals for the automatic blast-furnace melting operation. The thesis contains theoretical insights and tests on the dynamics of the burden flow through the modern blast furnace conveyor lines, as well as the development of fundamentals of the automatic self-adjustment for blast-furnace melting operation on the basis of the data on the gasdynamics in the blast-furnace mouth.

For the first time, there has been revealed the regularities of dependence of the surface texture variability of loading in the blast-furnace mouth on the size consistence of the blast furnace burden flow when utilizing bell-type charging and bell-less charging. The regularities of this type have been unknown before which allows to improve the prediction accuracy for the gasdynamic regime of a blast furnace, to reduce coke and natural gas consumption, and to increase blast furnace life extension by 15-20%.

There also have been first defined the regularities for the complex effect of structural and operational parameters for the blast furnace charging systems on the burden surface texture in the blast-furnace mouth. This enabled the on-line correction of the burden relief in the blast-furnace mouth, leading to the energy source consumption decrease by 1.5%.

For the first time, integral regularities between the kinematic parameters of the burden flow have been determined according to the elements of charging systems and flow capacity thereof. Similar data used to be inconsistent. Thus, the research allowed to increase the blast furnace charging efficiency, consequently resulting in general blast-furnace productivity index enhancement.

Due to the experimental test results, it has been first theoretically justified that the correction of the burden relief in the blast-furnace mouth can be carried out both by means of the hopper mechanism angle change and the hopper gate opening size of the bell-less top, as well as via the change of the described parameters.

Application of the doctoral thesis results involves the following stages:

- the scientific foundations for the correction of the blast furnace charging programmes that provide rational melting conditions for the particular type of the blast furnace burden;

- it has been found out and experimentally confirmed that the efficient control of burden flows in the blast furnace conveyor lines involves both the change of the hopper mechanism angle of the bell-less top, and the opening angle of the storage hopper sliding gate. It allows the most accurate ore load distribution along the radial ring zones of the blast furnace mouth;

- there has been suggested a new technique to define rational parameters of blast furnace burden layers in the dry zone of the blast furnace, thus providing the greatest gasdynamics under the given burden conditions;

- a new operation algorithm has been suggested for the automatic operating system of the blast furnace charging that enables the charging programme correction for particular conditions, and the active change thereof;

- the efficiency of the monitoring technique for the dynamic change of the load profile of the burden in the blast-furnace mouth via the radar technology has been confirmed. Moreover, the developed pilot algorithm for the charging and its correction has been implemented in the system of automatic control of the blast furnace charging and successfully tested on a model.

The conceptual issues of the doctoral thesis are used in the academic process by the students of the National Metallurgical Academy of Ukraine when working on Master's theses and Bachelor's theses.

Suggested techniques and engineering solutions on the defining the rational parameters for blast furnace charging, melting techniques and the main properties of the charging mechanism allow to analytically determine the parameters for the charging programme correction and create a basis for the full automation of the charging processes.

The techniques and engineering solutions proposed in the doctoral thesis were implemented at PJSC "DniproHidroMash", and at Zolotonosha Machine-Building Plant named after I.I. Lipse; they are used when designing modern charging mechanisms for blast furnaces that are supposed to be utilized at PC Dnipro Metallurgical Complex, PC "Azovstal", and PC "Zaporizhstal".

Keywords: blast furnace, charging mechanism, granular material, conveyor lines, agglomerate, coke, ore load, gasdynamics of the blast furnace mouth, charging programme.