

Селегей А.М., Іващенко В.П., Безшкурєнко О.Г.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ І ОБЛАДНАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Selegei A.M., Ivashchenko V.P., Bezshkurenko O.H.

ANALYSIS OF MODERN THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL METHODS AND EQUIPMENT AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF LOADING OF BLAST FURNACES

Розглянуто сучасний стан аналітичного забезпечення технології доменного виробництва. Проаналізовано основні методи, розроблені провідними науково-конструкторськими організаціями з металургії, що застосовуються для ефективного управління доменною плавкою. Показано, що технологія завантаження доменної печі має вирішальне значення для ефективності отримання чавуну. Обладнання моніторингу сучасних доменних печей дозволяє отримувати широкий спектр інформації, що може бути використана для оперативного ефективного корегування ведення доменної плавки. Використання вказаної інформації надає широкі можливості для забезпечення найраціональніших техніко-економічних показників процесу виплавки чавуну. В зв'язку з цим приділено значну увагу особливостям обладнання та технології для завантаження шихтових матеріалів у піч.

Розглянуті основні експлуатаційні характеристики для обладнання доменних печей, що забезпечує завантаження шихтових матеріалів в ракурсі забезпечення раціонального окружного та радіального розподілу шихти на колошнику. Це, в свою чергу, дає змогу дотримуватися заданої програми завантаження та рудних навантажень. Наданий опис способів завантаження за допомогою безконусного завантажувального пристрою лоткового типу. Проаналізований процес руху потоку шихтових матеріалів по трактах безконусного завантажувального пристрою. Окремо розглянуті ділянки направляючих тічок, ділянка руху шихти в колошниковому просторі. Виявлені недоліки та переваги існуючих методик розрахунку динамічних параметрів шихтових матеріалів на відповідних ділянках.

Наведений опис послідовності роботи обладнання, що забезпечує завантаження шихтою доменної печі та рекомендації для підвищення ефективності алгоритмів роботи агрегатів. Окремо розглянуті методи для визначення геометричних та динамічних параметрів руху шихтових матеріалів у разі їх випуску з накопичувальних бункерів завантажувального пристрою доменної печі. Наведені аналітичні залежності для визначення витрати шихтових матеріалів з випускного отвору та швидкості витоку шихти.

Розглянутий процес формування стовпа шихти у доменній печі. Серед основних чинників, що впливають на формування необхідного рудного навантаження вдовж радіусу колошника виділено програму завантаження та гранулометричний склад шихтових матеріалів які постачаються на колошник. Також показано, що найефективнішим завантаженням доменної печі шихтовими матеріалами вважається такий спосіб, при використанні якого забезпечується оптимальне значення рудного навантаження із забезпеченням необхідної газопровисності стовпа шихтових матеріалів. Таким чином визначені основні напрямки ефективного удосконалення технології доменної плавки для забезпечення найкращих техніко-економічних показників та значним зниженням питомої витрати сировини.

The current state of analytical support of blast furnace technology is considered. The main methods developed by leading research and design organizations in metallurgy, which are used for effective management of blast furnace smelting, are analyzed. It is shown that the loading technology of the blast furnace is of crucial importance for the efficiency of iron production. Monitoring equipment for modern blast furnaces allows you to obtain a wide range of information that can be used for prompt and effective correction of blast furnace smelting. The use of the specified information provides ample opportunities to ensure the most rational technical and economic indicators of the iron smelting process. In this regard, considerable attention was paid to the features of equipment and technology for loading batch materials into the furnace.

The main operating characteristics for the equipment of blast furnaces, which ensure the loading of charge materials in the angle of ensuring the rational circumferential and radial distribution of the charge on the blast furnace, are considered. This, in turn, makes it possible to adhere to the specified loading program and ore loads. A description of how to load using a coneless tray-type loading device is provided. The process of movement of the flow of charge materials along the paths of the coneless loading device is analyzed. Sections of the guide shafts, section of the movement of the charge in the blast furnace space are considered separately. Disadvantages and advantages of the existing methods of calculating the dynamic parameters of charge materials at the relevant sites are revealed.

The description of the sequence of operation of the equipment, which ensures the charging of the blast furnace charge, and recommendations for increasing the efficiency of the algorithms of the aggregates are given. The methods for determining the geometric and dynamic parameters of the movement of charge materials in the case of their release from the storage hoppers of the loading device of the blast furnace are considered separately. Analytical dependences are given for determining the flow of charge materials from the outlet and the charge leakage rate.

The process of formation of a charge column in a blast furnace is considered. Among the main factors affecting the formation of the necessary ore load along the radius of the blast furnace, the loading program and the granulometric composition of the charge materials supplied to the blast furnace are highlighted. It is also shown that the most effective

Селегей А.М.,	
Іващенко В.П.,	
Безшкурєнко О.Г.	

loading of the blast furnace with charge materials is considered to be the following method, when used, the optimal value of the ore load is ensured while ensuring the necessary gas permeability of the column of charge materials. In this way, the main directions of effective improvement of the blast furnace smelting technology to ensure the best technical and economic indicators and a significant reduction in the specific consumption of raw materials have been determined.

Над програмами завантаження доменних печей в різний час працювало досить велика кількість наукових і проектних організацій. На території України провідними організаціями з цього напрямку є Український державний університет науки і технологій та Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова. У наукових працях Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова виконані: аналітичний огляд засобів контролю профілю поверхні засипу шихти на колошнику доменної печі, аналіз використання одержуваної з їх допомогою інформації, обґрунтована роль структури стовпа шихтових матеріалів в досягненні високої ефективності доменної плавки [1,2]; розроблені технологічні вимоги до установки стаціонарних систем вимірювання профілю поверхні засипу і представленої ними інформації [1,3,4,5]; розроблені алгоритми використання математичних моделей, що описують елементи структури стовпа шихтових матеріалів в печі і т.п.

В Українському державному університеті науки і технологій питаннями доменної плавки займалися такі видатні вчені як професори Ковшов В.М., Бочка В.В., Чистяков В.Г. Петренко В.О. [6–10]. В роботі [9] відзначається, що оптимізація розподілу шихти і газів по перетину верхньої частини шахти забезпечує не тільки зниження витрати коксу і збільшення продуктивності доменної печі, а й створює передумови для максимального використання інших заходів щодо підвищення ефективності доменної плавки. Показано, що високі техніко-економічні показники роботи доменної печі можуть бути досягнуті тільки при такому розподілі матеріалів і газів по перетину верхньої частини шахти, при якому можливості досягнення максимального для конкретних умов плавки ступеня використання газового потоку узгоджуються з умовами збереження сталості ходу печі. Також визначено, що зменшення нерівномірності в розподілі шихти і газів по радіусу колошника є одним з найважливіших шляхів підвищення ефективності роботи сучасних доменних печей.

На сьогоднішній день існують два основні класи завантажувальних пристроїв доменних печей, які експлуатуються і проектується для металургійних підприємств України [11]. Крім цього, існує ряд оригінальних конструкцій завантажувальних пристроїв, які не знайшли широкого поширення в нашій країні [12,13].

До першого класу пристроїв слід віднести пристрої конусного типу, в яких одні й ті ж елементи є і газозапірними і обмежують переміщення шихтових матеріалів [11,12].

До другого класу відносяться безконусні завантажувальні пристрої, конструктивні особливості яких дозволяють розділити функції газозапірання і відсікання потоку шихтових матеріалів [11].

До переваг конусних пристроїв (найбільшого поширення набуло двоконусне) слід віднести відносну простоту конструкції та експлуатації, невисоку вартість. Однак вони дозволяють значно менше, ніж безконусні апарати впливати на параметри потоку шихтових матеріалів. При проведенні сучасних доменних плавок з використанням різних шихтових матеріалів це набуває все більшого значення для ефективності роботи, виборі раціональних параметрів технології, а також для підвищення якості виплавленого чавуну.

Теоретичними і експериментальними дослідженнями встановлено, що для печей невеликого об'єму (до 2000 м³) цілком достатньо застосування завантажувальних пристроїв конусного типу. При експлуатації доменних печей більшого об'єму необхідне застосування безконусних завантажувальних пристроїв, причому з найкращого боку показали себе пристрої з розподільником шихти лоткового типу. Однак єдиної методики, яка б дозволяла враховувати більшість техніко-економічних показників печі, що будується або реконструюється і визначала б, який тип завантажувального пристрою буде найбільш раціональним для його подальшої успішної експлуатації, на сьогодні не існує.

Слід зазначити, що більшість доменних печей України і ближнього зарубіжжя не будуються знову, а зазнають змін в процесі реконструкції. Тому все більш актуальною стає задача вписання завантажувальних пристроїв в існуючі габарити печі. Багато металургійних підприємства йдуть шляхом заміни двоконусних завантажувальних пристроїв на БЗП лоткового типу, які в значній мірі перевершують за можливостями варіювання параметрами розподілу шихтових матеріалів по поверхні засипу шихтових матеріалів на колошнику печі.

Більшість досліджень, проведених раніше [3,9,14,15] при розгляді розподілу шихти на колошнику, поклалися на експериментальні дані, отримані в процесі задування та експлуатації доменних печей. Однак в умовах проектування і вдосконалення нових завантажувальних пристроїв та технологічних прийомів ведення плавки велике значення має теоретичний опис процесу руху потоків шихтових матеріалів по перевантажних трактах доменної печі. Більш того, сучасні засоби контролю ведення плавки [1–3, 16–21] дозволяють оперативно коригувати параметри завантаження, маючи конкретні параметри течії потоку конкретних шихтових матеріалів. Для ефективного корекції потоків шихти необхідна широка теоретична база, підтверджена експериментальними дослідженнями.

Завантаження сучасних доменних печей здійснює розгалужена система технологічних комплексів і обладнання, яка повинна відповідати критері-

ям продуктивності, надійності та довговічності. На існуючому етапі в Україні експлуатуються доменні печі різних об'ємів і, відповідно, з різним обладнанням, що забезпечує технологічний процес отримання чавуну. Важливою частиною системи завантаження доменної печі є система подачі шихти з рудного двору на колошник. Найбільшого поширення набули системи шихтоподачі зі скіповим та конвеєрним способом транспортування. Системи зі скіповими підйомниками отримали широке застосування на доменних печах обсягом до 2000 м³. У разі, якщо обсяг печі вище, застосовують підйомник конвеєрного типу [22].

Швидкість руху стрічки конвеєрів - 2 м/с, кут підйому похилого конвеєра 10°30', довжина 509м, обсяг вагових воронкоз агрегатів, коксу і окатишів 25 м³, максимальна маса дози добавки 3т.

Система шихтоподачі доменної печі об'ємом 5000 м³ принципово відрізняється від системи шихтоподачі доменних печей з скіповим завантаженням шихти, як послідовністю технологічних операцій, так і компонуванням діючого обладнання [23].

Відповідно до технологічної схеми роботи системи шихтоподачі, після розвантаження вагової воронки каналу включаються грохоти, які здійснюють набір чергової дози і відсів дрібних фракцій. Надалі, згідно заданої програми, порядку роботи каналів і темпу завантаження печі [24], відкривається затвор і живильниками здійснюється видача матеріалу з вагової воронки на горизонтальний конвеєр.

Найбільшого поширення в світі отримав безконусний завантажувальний пристрій з лотковим розподільником шихти, що випускається фірмою «Поль Вюрт» (Люксембург), (рис 1.1) [11].

Шихтові матеріали, що подаються стрічковим конвеєром (скіпом) за допомогою пересувної воронки 1 з поворотними заслінками направляються в один з двох паралельно розташованих шлюзових накопичувальних бункерів 3, обладнаних верхнім 2 і нижнім 5 газоушільнюючими тарілчастими клапанами з гумовим ущільненням, а також шихтовим затвором 4 секторного типу. Останній служить для захисту нижнього клапана від стирання шихтою і регулювання часу випорожнення бункера, який розрахований на прийом порції залізородного матеріалу або коксу. Для контролю за витоком матеріалу з бункерів 3 передбачено безперервне зважування їх за допомогою месдоз.

Привод приймальної воронки, газоушільнюючих клапанів і шихтових затворів - централізований гідравлічний. Поворот заслінок робочих органів, клапанів і затворів здійснюється від гідроциліндрів, що гойдаються. Лоток отримує рух від встановленого на куполі печі електромеханічного приводу. Розподіл матеріалів на колошнику з використанням БЗП проводиться обертливим розподільником шихти, за допомогою якого можна здійснювати чотири способи завантаження матеріалів в доменну піч [25]:

- кільцеве завантаження;
- багатокільцеве (спіральне) завантаження;
- секторальне завантаження;
- орієнтоване (точкове) завантаження.

У разі кільцевого завантаження кожна порція матеріалу зсипається в доменну піч по одній траєкторії, тобто, коли лоток-розподільник не змінює свого кутового положення під час обертання. При багатокільцевому (спіральному) завантаженні траєкторія руху матеріалу змінюється в міру вивантаження в піч однієї порції. Секторне завантаження забезпечує розосередження матеріалу в певному секторі колошника за рахунок переміщення лотка-розподільника в його межах. Точкове завантаження здійснюється при зупиненому лотку-розподільнику, що направляє потік матеріалу в обмежений заданий район колошника. Секторне і точкове завантаження використовуються короткочасно, тільки в разі порушення ходу печі (газового потоку), в зв'язку з цим проходить тільки в ручному режимі. Решта типів завантажень здійснюються в автоматичному режимі. В [25] відзначається, що величина окружної нерівномірності розподілу матеріалів залежить, перш за все, від швидкості обертання розподільника шихти, маси порції, часу зсипання матеріалів з проміжного бункера, а також обраного порядку вивантаження їх щодо «гаражних» положень. В основному при роботі доменної печі оцінка окружної нерівномірності проводиться по розкиду точок показань периферійних термпар, який за нормальних умов роботи доменної печі не повинен перевищувати 150°С. Основним режимом завантаження на печах з БЗП, є багатокільцевий цикл з подачею певної кількості коксу в осьову зону колошника. Тривалість вивантаження однієї порції шихтових матеріалів залежить від ємності бункерів, кута розкриття шихтового затвора який задається, гранулометричного складу компонентів шихти і повинна бути не менше для доменних печей:

- об'ємом 1719 м³ - 50сек,
- 2000 м³ - 70сек,
- 2700 м³ - 80сек,
- 3200 м³ - 90сек,
- 5000 м³ - 110сек.

Використання конвеєрної системи для подачі шихти на колошник визначається високою продуктивністю сучасних доменних печей, що також вимагає надійної роботи обладнання. У зв'язку з цим вибір структурної схеми шихтоподачі повинен ґрунтуватися на фактичних характеристиках надійності обладнання, що застосовується.

Сьогодні відома велика кількість конструкцій завантажувальних пристроїв доменних печей, окрім конусного та безконусного. Більшість з них не отримали світового поширення. Стримуючим фактором у розвитку конструкцій завантажувальних пристроїв була неможливість встановлення повної картини рельєфу засипу шихтових матеріалів на колошнику. З розвитком засобів спостереження за станом засипу шихти на колошнику роз-

ширюються можливості корекції завантаження матеріалів в піч для поліпшення техніко-економічних показників доменної плавки.

Двоконусні завантажувальні апарати відрізняються відносною простотою конструкції і експлуатації. Загальним недоліком цього класу пристроїв є вузький діапазон регулювання розподілу шихти по радіусу колошника і порушенні картини розподілу через неможливість зміни взаємного розташування в процесі відкривання великого конуса.

Нерівномірність розподілу шихтових матеріалів на колошнику призводить до нерівномірності розподілу газового потоку, і як наслідок, до збільшення питомої витрати коксу, зниження техніко-економічних показників доменної плавки.

Боротися з окружною нерівномірністю дозволяє розподільник шихти, що обертається. Більшою мірою відбувається боротьба з так званим «канальним» ходом печі. Застосування обертового розподільника шихти значно спрощує виготовлення і експлуатацію завантажувального апарату, ускладнює його обслуговування. Крім того, в цьому випадку потрібна нова методика визначення параметрів течії шихтових матеріалів з можливістю корекції по ходу роботи печі з досягненням найбільш оптимального результату.

Одним із напрямків поліпшення розподілу шихтових матеріалів у разі застосування конусних завантажувальних апаратів є використання додаткових елементів розподілу [26-32]. Причому вони можуть встановлюватися як в колошниковому, так і в міжконусному просторі. Деякі конструкції дозволяють проводити селективне завантаження. Прикладом може служити завантажувальний пристрій, запропонований в [27].

Деякі автори пішли шляхом установки розподільників шихтових матеріалів нижче великого конуса засипного апарату [28,29].

Багато досліджень присвячено поліпшенню розподілу шихтових матеріалів за допомогою розробки алгоритму спільної роботи елементів завантажувального апарату. Наприклад, спільні операції перекидання скіпа і одночасної зміни швидкості обертання розподільника [30]. Або зміна швидкості відкривання великого конуса для підзавантаження периферії колошникового простору печі [31-32].

На металургійних підприємствах основним споживачем енергоносіїв є доменна піч, тому підвищення ефективності доменної плавки має пріоритетне значення для екологічного балансу [33]. Створення умов для раціонального протікання газодинамічних процесів у доменній печі сприяє зниженню енергетичних витрат. Тому створення умов оптимального завантаження є передумовою для поліпшення екологічного стану доменного цеху та металургійного комбінату у цілому.

Питанням теоретичного визначення кінематичних і геометричних характеристик частинок шихтових матеріалів у завантажувальних пристроях доменних печей присвячено значну кількість досліджень [1,3,4,9,12,14,15,18,24].

Особлива увага завжди приділяється вивченню процесу руху шихти в колошниковому просторі. Спочатку математична модель динаміки шихти була розроблена для конусних завантажувальних пристроїв, оскільки в процесі еволюції обладнання завантаження доменних печей домінував саме цей клас пристроїв.

Головними параметрами, які потрібно визначати, є [34]:

- характеристики вектора швидкості сходу шихти з великого конуса або лотка-розподільника (модуль, напрямок);

- траєкторії польоту шихти в колошниковому просторі;

- точка зустрічі потоку шихти з поверхнею засипу на колошнику, а також характеристики вектора швидкості шихти в зазначеній точці.

Кінцевим завданням є визначення геометрії рельєфу засипу на колошнику, оскільки саме він є одним з основних критеріїв, які впливають на ведення доменної плавки [35-36].

Рельєф і рівень засипу багато в чому визначають хід доменної плавки, її енергетичний баланс, а також якість виробленого чавуну [37]. Нерівномірність роботи доменної печі тісно взаємопов'язана зі зміною стану профілю і рівня засипу, а також швидкості сходу шихтових матеріалів [38]. У статті детально розглянуті застосування радіоізотопного аналізатора профілю поверхні засипу шихти РІАП-2М, а також експериментальні дані про характеристики рельєфу шихти на колошнику при використанні типового двоконусного завантажувального пристрою. В ході роботи профілеміру досліджувалися взаємозв'язки параметрів технологічного стану доменної печі з параметрами профілю поверхні засипу шихтових матеріалів на колошнику. Наведено інформацію про швидкість сходу шихтових матеріалів, температури різних ділянок масиву шихтових матеріалів, геометричні характеристики рельєфу шихти на колошнику доменної печі. Матеріали досліджень можуть бути хорошим фундаментом для перевірки теоретичної моделі поведінки шихтових матеріалів при їх завантаженні на колошник. До недоліків слід віднести відсутність аналізу поведінки сипучого матеріалу, визначення аналітичних залежностей кінематики потоку, а також прогнозування роботи при змінах вхідних параметрів процесу.

Розрізняють радіальне та окружне розподілення шихти на колошнику [39]. Сукупність цих понять дає найбільш повну картину про геометрію шихтових матеріалів на колошнику. Прогнозування, моніторинг та аналіз зміни зазначених розподілів дає можливість найбільш раціональним чином забезпечувати рудне навантаження і, як наслідок, значним чином впливати на ефективність доменного процесу в кожному конкретному випадку. В роботах [39,40] проведено дослідження даних передпускових випробувань серед яких:

- траєкторії зсипання матеріалів з лоткового розподільника (за допомогою забеленого крейдою

відбійника газовідборних зондів і спеціальної дослідницької машини);

- координати точки зустрічі траєкторій з циліндричною стінкою колошника;
- вимір профілю засипу шихтових матеріалів в печі;
- відбір проб матеріалів в печі по чотирьом взаємно перпендикулярним діаметрам;
- визначення товщини шарів коксу і залізородних матеріалів;
- сегрегація матеріалів по гранулометричному складу.

Великий обсяг досліджень дає інтегральну картину про параметри роботи БЗП лоткового типу з урахуванням значної кількості факторів, що впливають на процес [41]. Важливим моментом досліджень було визначення ширини потоку матеріалів при сходженні з лотка-розподільника [42-43]. Згідно з результатами дослідження, поперечний переріз потоку коксу складає 1,4 м, залізовмісної частини шихтових матеріалів - 1,0 м. Проведені дослідження дозволили ІЧМ створити комплекс рекомендацій для інтенсифікації та забезпечення ефективності процесу завантаження для доменної печі №5 ЧерМК. На жаль, автори не зробили спроб аналітичної апроксимації залежностей, отриманих експериментальним шляхом, з метою подальшого отримання універсального методу розрахунку закономірностей поведінки шихтових матеріалів в колошниковому просторі доменної печі, обладнаної БЗП.

Перш ніж потрапити на поверхню засипу на колошнику шихта рухається з бункера БЗП через шихтовий затвор по похилих тічках в центральну приймальну трубу і далі падає на лоток-розподільник. Потім шихта сходить з лотка, вільно рухається в колошниковому просторі і потрапляє на поверхню засипу. Більшість дослідників [44-45] для прогнозування рельєфу засипу розраховують траєкторії на ділянці сходження шихти з лотка-розподільника до приземлення на поверхню засипу. В [44] відзначається, що застосування БЗП на доменних печах об'ємом 3000 м³ і вище дає можливість знижувати витрати коксу в межах 10-15 кг та тону виробленого чавуну. Розрахунок траєкто-

рій руху шихтових матеріалів надзвичайно ускладнений недостатньою визначеністю сил тертя при русі частинок шихти по трактам БЗП, коефіцієнтів відновлення швидкості при зіткненні частинок шихти з елементами завантажувального тракту. У статті наведені чисельні значення швидкостей сходу шихти з лотка БЗП. Згідно з дослідженнями авторів статті для доменної печі № 9 Арселлор-Міттал Кривий Ріг зміна кута нахилу лотка-розподільника по відношенню до осі його обертання в межах 18,5-36,5 градусів призводить до зміни швидкості сходу 6,8-6,13 м/с. Показано вплив частоти обертання лотка-розподільника на зміну швидкості сходу частинок шихти. Збільшення частоти обертання лотка-розподільника з 2 до 13 об/хв. при куті нахилу 52° до вертикалі призводить до зміни радіальної складової швидкості сходу частинок з лотка на 8-10%. Крім цього зазначено, що при розрахунку швидкості частинок слід враховувати опір потоку колошникових газів на ділянці траєкторії від кінця лотка-розподільника до поверхні засипу. На рис. 1. наведені графічні результати даного дослідження.

Робота [39] присвячена тенденціям розвитку обладнання систем завантаження доменних печей; наведені результати досліджень систем завантаження нових і реконструйованих печей великого об'єму; розглянуті основні прийоми управління радіальним і окружним розподілом шихтових матеріалів на поверхні засипу колошника. Вперше інтегровано розглянуті технологічні вимоги, що пред'являються до систем завантаження доменних печей, обладнаних БЗП. Система завантаження розбита на кілька підсистем:

- підсистема дозування і формування порцій;
- підсистема транспортування шихти;
- підсистема шлюзування і дозування шихти.

Крім усього іншого, детально розглянуті циклограми завантаження і приведена оригінальна методика розрахунку пропускної здатності всієї системи завантаження, а також відзначено, що найбільш вузьким місцем у цій системі є комплекс устаткування завантажувального пристрою доменної печі.

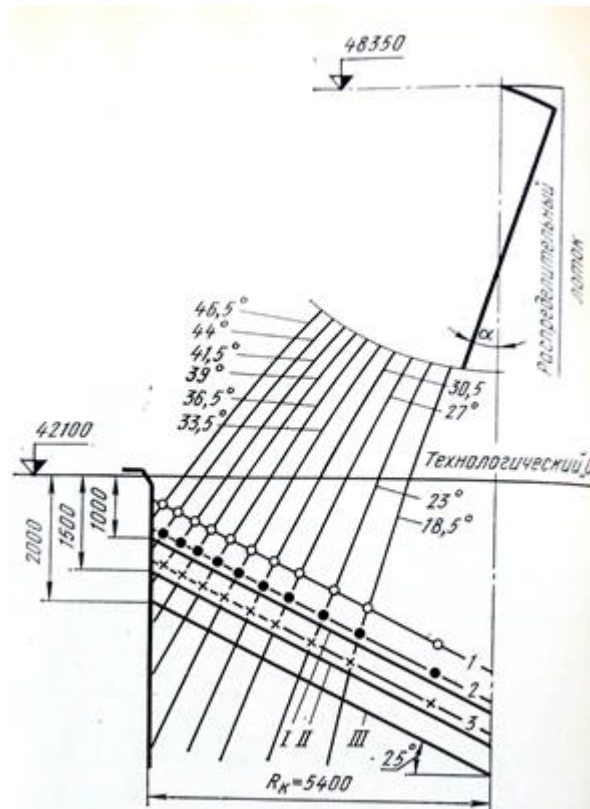


Рис. 1. Траекторії шихтових матеріалів.

Разом з тим в дослідженні розглянуто важливий спосіб управління окружним розподілом за допомогою шихтових затворів БЗП. Ефективним є регулювання відкриття шихтового затвора бункера в межах кожного обороту лотка-розподільника так, щоб у заданий сектор колошника потрапило біль-

ша або менша кількість шихтових матеріалів. Управління зміною прохідного перетину шихтового затвора дозволяє регулювати окружний розподіл як окремо для коксу і залізовмісних матеріалів, так і спільно.

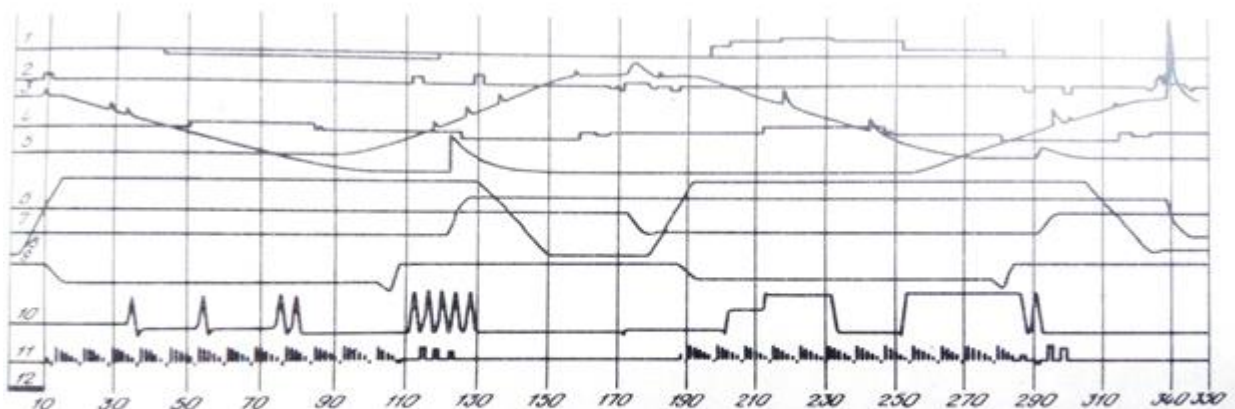


Рис. 8. Экспериментальная циклограмма работы механизмов системы загрузки ДП-6 НЛМК:

1 – выгрузка материала на конвейер; 2 – работа ГК; 3 – вес материала в Б2; 4 – сигналы контрольных точек; 5 – вес материала в Б1; 6, 7 – давление в Б1 и Б2; 8 – работа зонда; 9 – работа ШЗ; 10, 11 – изменение угла и вращения лотка;

Рис. 2. Експериментальна циклограма роботи механізмів системи завантаження доменної печі великого об'єму.

У монографії [45] відзначено, що техніко-економічна доцільність застосування БЗП визна-

чається трьома основними факторами: підвищенням довговічності обладнання та зменшенням ви-

трат на його ремонт; гнучкістю і ефективністю управління розподілом шихти, що збільшує ступінь використання відновного потенціалу газів; можливістю реалізації автоматичного контролю і управління розподілом шихти і газового потоку в печі, що забезпечує обґрунтованість і оперативність заходів по оптимізації процесу доменної плавки. До ключових факторів, що визначають пропускну здатність системи завантаження і висоту завантажувального пристрою, відносяться сумарний об'єм, кількість бункерів і їх конструктивне виконання. Сумарний обсяг двох бункерів повинен становити 2-3% від об'єму доменної печі.

Тут же запропоновано оригінальну методику розрахунку траєкторій шихтових матеріалів в колошниковому просторі печей великого об'єму. Методика включає в себе експериментальне визначення положення вершин гребеня при двох або більше кутах нахилу лотка і розрахунок за цими даними початкової швидкості сходу частинок шихти з лотка. Така методика дозволяє збільшити точність розрахунків, по ній розраховані траєкторії для печей об'ємом 3200 - 5500 м³ і перевірені при задувці.

У монографії [47] представлені результати теоретичних і прикладних досліджень, спрямованих на поглиблення знань процесу доменної плавки і вдосконалення технології; наведені результати досліджень, розрахунків застосування нового обладнання системи завантаження доменних печей; викладено досвід освоєння, випробувань і науково-технічного супроводу роботи сучасних доменних печей великого об'єму і реконструйованих печей, оснащених БЗП. Зокрема зазначено, що в найближчій перспективі буде збережено тенденцію до скорочення витрат коксу для виробництва чавуну за допомогою доменного процесу. Це пов'язано з рядом факторів, серед яких скорочення запасів коксівного вугілля, посилення екологічних вимог до металургійних підприємств, подорожчання сировини тощо. Важливим результатом аналітичних досліджень процесів завантаження доменної печі є розробка так званого критерію режиму завантаження, який включає в себе параметр положення центра ваги рудного навантаження на радіусі колошника, що визначає ступінь використання газу, співвідношення величин осьового та периферійного душників і розподіл газового потоку в залежності від опору шихтових матеріалів в кільцевих зонах з урахуванням швидкості їх сходу. Аналітичний вираз для визначення критерію виглядає наступним чином [46-47]:

$$K = \Pi \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{Q}{F} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{P}{\Delta P / \xi}, \quad (1.1)$$

де $\frac{l_1}{l_2}$ - відношення величин душників у осі та на периферії колошника;

Q, P - вихід і тиск колошникового газу;

$\frac{\Delta P}{\xi}$ - відношення перепаду тиску газу в печі до питомого опору шару рудних матеріалів і коксу;

F - площа колошника;

U - швидкість сходу матеріалів в печі.

Тобто це є співвідношення величин осьового та периферійного душників і розподіл газового потоку в залежності від опору шихтових матеріалів в кільцевих зонах з урахуванням швидкості її сходу.

За допомогою розглянутого критерію виникає можливість якісного та кількісного визначення впливу характеристик завантаження на хід всієї доменної плавки. Використання такого критерію створює теоретичні основи для розробки раціональних методик і програм завантаження доменних печей, обладнаних БЗП та іншими типами завантажувальних пристроїв.

В роботі [48] відзначається, що використання БЗП, а також сучасних систем контролю і управління, дозволяє давати кількісну оцінку характеру розподілу шихтових матеріалів на колошнику. Згадується алгоритм «Траєкторія», розроблений в ІЧМ НАН України, реалізований в складі АСУ завантаження доменних печей [49]. Поєднання аналітичного та експериментального досліджень формує новий експериментально-аналітичний підхід як більш ефективний інструмент вибору раціональних параметрів доменної плавки.

Для ефективного аналітичного дослідження руху шихти в колошниковому просторі необхідно повністю задати вектор швидкості сходу шихти з лотка. З цією метою аналізують рух шихти по лотку-розподільнику. Багато дослідників отримують кінематичні характеристики руху шихти по лотку за допомогою розв'язання задачі Коші для диференціальних рівнянь руху матеріальної точки [50-52]. У дослідженнях зроблено спробу комплексного розрахунку кінематичних параметрів руху шихтових матеріалів по лотку-розподільнику БЗП із застосуванням циліндричних координат, а також з аналітичним визначенням початкових умов руху частинки шихтових матеріалів по лотку-розподільнику БЗП. Отримано рівняння для визначення швидкості сходу частки шихти з лотка з урахуванням складного руху точки по циліндричній поверхні лотка. Диференціальне рівняння руху частинки вздовж лотка-розподільника отримано у вигляді:

$$\ddot{z} = g \cos \alpha + 2R\omega \sin \alpha \cos \theta \dot{\theta} + \omega^2 \sin \alpha (z \sin \alpha - R \cos \alpha \cos \theta) - \mu |\vec{n}| \frac{\dot{z}}{|\vec{v}|}, \quad (1.2)$$

де z - координата частинки уздовж лотка;

α - кут нахилу розподільного лотка до осі печі;

R - радіус перерізу лотка;

ω - кутова швидкість обертання розподільника;

θ - кут підйому частинки на стінку лотка;

μ - коефіцієнт тертя ковзання матеріалу шихти по поверхні лотка-розподільника;

n - нормальна реакція поверхні лотка на частку шихтових матеріалів одиничної маси;

V - швидкість руху частинки по лотку

$$\vec{V} = \sqrt{R\dot{\theta}^2 + \dot{z}^2} \quad (1.3)$$

Нормальну реакцію запропоновано визначати наступним чином:

$$|\vec{n}| = g \sin \alpha \cos \theta - 2\omega(\dot{z} \sin \alpha \sin \theta + R\dot{\theta} \cos \alpha) + R\omega^2 - \omega^2 \sin \alpha \cos \theta (z \cos \alpha + R \sin \alpha \cos \theta) + R\dot{\theta}^2 \quad (1.4)$$

Представлена методика була великим кроком вперед в разі аналітичного визначення кінематики шихтових матеріалів по ділянці від випускного отвору накопичувального бункера БЗП до поверхні засипу шихти на колошнику доменної печі. Вперше була проведена спроба комплексного аналітичного дослідження поведінки шихти в трактах БЗП. Основним недоліком методу є те, що при дослідженні математична модель ґрунтується для якоїсь середньої точки перетину (наприклад центра маси). Параметри ж потоку матеріалів визначалися на основі відступу траєкторій від основної, які збігаються при накладанні. На жаль, в цьому випадку врахувати такий важливий параметр як крупність матеріалу при аналітичному дослідженні дуже важко. Але з практики відомо, що шихта різної крупності має різні траєкторії при сході з лотка-розподільника.

В [51] рух розглядається для точки, що є центром мас поперечного перерізу потоку шихтових матеріалів на лотку. До цієї точки прикладають всі сили і визначають її кінематичні характеристики і траєкторію. Розрахункові дані узагальнюються на всі точки поперечного перерізу потоку. Таким чином, приймається, що характеристики потоку розраховані. Для врахування виду матеріалу змінюють коефіцієнт тертя матеріалу шихти об поверхню лотка-розподільника, або ж вводять узагальнене значення загального коефіцієнта опору руху шихти по лотку. Швидкість сходу частинок шихтових матеріалів з лотка розподільника пропонується визначати наступним чином:

$$V_{\Sigma} = \vec{V}_k + V_z = \vec{V}_{kx} + \vec{V}_{ky} + \vec{V}_z; \quad (1.5)$$

$$V_z = nR_{bp}; R_{bp} = L \sin \alpha - (B-h) \cos \alpha, \quad (1.6)$$

де V_{kx}, V_{ky} горизонтальна і вертикальна складова швидкості сходу частинок шихти з лотка;

V_k, V_z - тангенціальна складова сумарної швидкості сходу V_{Σ} ;

α - кут нахилу лотка до осі печі;

R_{bp} - радіус обертання точки сходу частинок;

n - частота обертання лотка;

L - довжина робочої частини лотка;

B - відстань від осі нахилу лотка до нижньої твірної його робочої поверхні;

h - відстань між центром перетину потоку і нижньої твірної поверхні лотка, що визначає розташування точки сходу частинок щодо зазначеної твірної.

У дослідженні також визначено, що при інженерних розрахунках коефіцієнт еквівалентного опору руху частинок по лотку слід приймати рівним 0,8, причому для будь-якого виду рухомого шихтового матеріалу.

Початкові умови руху по лотку також визначаються з попереднього ділянки руху шихти. Знову ж для характерних точок визначають кінематичні характеристики і узагальнюють їх на весь потік.

Коефіцієнт тертя та еквівалентного опору визначаються на основі промислових експериментів проведених в своїй більшості при передпусковому завантаженні доменних печей.

В роботі [52] наведено великий масив даних про параметри траєкторій шихти в колошниковому просторі печі, але, на жаль, не вказані аналітичні залежності, на підставі яких отримані дані.

Сучасні доменні печі обладнані засобами контролю рельєфу поверхні засипу шихти на колошнику, які дозволяють з великою точністю фіксувати зміни геометрії поверхні. В [53] завдяки оперативним даними про стан рельєфу поверхні на колошнику виникає можливість більш радикального розподілу шихтових матеріалів, а також зменшення окружної нерівномірності. Таким чином виникає необхідність провести корекцію параметрів управління завантаженням шихти. Для цього потрібна комплексна математична модель, що описує рух шихтових матеріалів від випускних отворів бункерів БЗП до поверхні засипу на колошнику.

В роботі [7] показано вплив завантаження і роботи бункерів БЗП на розподіл шихти на колошнику, а також на показники доменної плавки в цілому. В [53] немає аналітичних залежностей, які б дали можливість дослідити параметри руху шихти всередині бункера і вплив цих параметрів на рельєф шихти на колошнику.

У монографії [54] наведено комплексне аналітичне дослідження руху шихтових матеріалів по трактах БЗП. Докладно описані детерміновані математичні моделі траєкторії зсипання шихти з лотка, руху по лотку, руху по тічці і вертикальній трубі, що передують лотку. Кінематичні характеристики руху шихтових матеріалів визначалися за допомогою розв'язання задачі Коші для диференціальних рівнянь руху на відповідних ділянках. Перевагою підходу є отримання аналітичних залежностей, які на стадії проектування обладнання дають можливість в широких діапазонах досліджувати вплив різних чинників на кінематичні характеристики шихти на всіх ділянках. До недоліку методики слід віднести визначення початкової швидкості руху шихти з накопичувального бункера БЗП. Витрата Q визначена за допомогою емпіричної формули, яка враховує тільки середній діаметр частинок шихти

d і площу відкриття вантажного клапана S . Але не врахований тип матеріалу, його фізико-механічні характеристики і форма випускного отвору.

$$Q = \frac{0,738 \cdot S^{1,287}}{d^{0,075}} \quad (1.7)$$

Це негативно позначається на точності результатів, отриманих з використанням даної залежності.

У монографії [55] детально описана автоматична система моніторингу за рельєфом поверхні шихтових матеріалів за допомогою радіолокації. Наведено дані про зміну окружний і радіальної нерівномірності для доменної печі №9 Арселлор Міттал Кривий Ріг, а також дані про швидкість опускання шихти. Показано вплив параметрів завантаження на колошнику на швидкість сходу матеріалів і ефективність доменної плавки. Експериментальні дані отримані в [55] добре висвітлюють ефективність роботи обладнання шихтоподачі, проте немає залежностей, які б так чи інакше прогнозували зміну ходу печі при зміні параметрів завантаження.

В [56] описані основні технологічні неполадки, що виникають при роботі доменної печі. Більшість з них пов'язані з розподілом шихти на колошнику. Їх усунення також неможливо без корекції параметрів руху шихти на завантажувальному пристрої доменної печі.

В [57] сформульовані обмеження для тривалості вивантаження порцій з бункера бесконусного завантажувального пристрою, показана залежність окружної нерівномірності розподілу шихти на колошнику від зміни витрати шихтових матеріалів з бункера завантажувального пристрою. Наведено залежності для визначення звичайної витрати шихти з бункера.

Для залізорудної складової:

$$Q_{ж} = k_{ж} \cdot \sin \alpha \cdot S^{1,75} \cdot \frac{\sqrt{g}}{d_{ж}}, \quad (1.8)$$

для коксу

$$Q_{к} = k_{к} \cdot \sin \alpha \cdot S^{1,75} \cdot \frac{\sqrt{g}}{d_{к}}, \quad (1.9)$$

де Q - об'ємна витрата матеріалу;

k - чисельні коефіцієнти;

S - площа випускного отвору;

α - кут нахилу осі випускного отвору;

d - середні діаметри частинок матеріалу.

В аналітичних залежностях беруть участь геометричні параметри бункерів, врахований середній розмір частинок шихтових матеріалів. Результати дослідження добре корелюються з експериментальними даними. Враховано ступінь відкриття шихтового затвора. До недоліків залежностей слід віднести той факт, що фізико-механічні характеристики того чи іншого шихтового матеріалу

враховані чисельними коефіцієнтами для коксу і руди відповідно.

В [58] досліджено швидкість витікання шихтових матеріалів з бункерів БЗП:

$$V = \lambda \sqrt{2g \left(2,1R - \frac{3,4\tau}{\gamma} \right)}, \quad (1.10)$$

де V - швидкість руху матеріалу;

R - критичний радіус;

γ - об'ємна маса матеріалу;

τ - початковий опір зрушенню;

λ - коефіцієнт витоку.

У розрахунках присутні ряд коефіцієнтів, вибір і природа яких не обґрунтовані. Така методика не може бути застосована для розрахунку різних конструкцій бункерів в силу індивідуального емпіричного підбору коефіцієнтів.

В [59] Виконано узагальнення існуючої термінології і особливостей формування раціональних режимів завантаження доменної печі, обладнаної БЗП. Наведено типову програму завантаження, структурну схему елементів завантаження, якісний вплив кутів завантаження на окружну і радіальну нерівномірності. Шляхи вдосконалення завантаження доменної печі дають можливість розширити напрямки подальших розробок у цій галузі.

В [60] наведені великі експериментальні дослідження профілю засипу на колошнику і впливу різних чинників на його зміну. Проведена кількісна та якісна оцінка без теоретичних розрахунків.

В [61] розглянуто роботу приводу лотка-розподільника БЗП, отримані осцилограми, що дозволяють стежити за навантаженнями на приводі і часом зсипання шихтових матеріалів.

Робота [62] присвячена глибокому розгляду процесів формування рельєфу поверхні засипу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі з витоків і до сучасності. Наведено оригінальну методику для визначення основних показників – середнього рудного навантаження, рудних навантажень у рівновеликих кільцевих зонах, а також відносного обсягу матеріалів, розміщених в конкретній кільцевій зоні. Згідно з матеріалами дослідження середнє рудне навантаження за цикл дорівнює:

$$R_{ср} = \frac{\gamma \cdot A}{1 - A}, \quad (1.11)$$

$$\text{де } A = \sum_{i=1}^i \frac{R_i \cdot \delta_i}{\gamma + R_i},$$

γ - відношення насипних мас залізовмісних матеріалів і коксу;

R_i - рудне навантаження у конкретній кільцевій зоні;

δ_i - частка об'єму матеріалу, завантаженого за цикл в i - у кільцеву зону.

Розрахунок середнього рудного навантаження за загальноприйнятими нормами ведення доменної плавки дає можливість оцінити якість розподі-

лу шихтових матеріалів по призначених позиціях (кутах нахилу) лотка-розподільника БЗП. Практика показує, що показники розподілу вуглекислого газу і приватних рудних навантажень тісно пов'язані між собою, причому коефіцієнт кореляційного зв'язку між ними в більшості випадків становить 0,8. В [62] виявлено, що за результатами експериментальних досліджень і моделювання особливостей руху шихтових матеріалів в шихтових трактах двобункерних БЗП спостерігається неспівпадіння осей подачі потоку шихти на робочій поверхні лотка-розподільника. Встановлено, що нерівномірність зсипання шихтових матеріалів на поверхню засипу колошника корелює зі швидкістю обертання лотка, довжиною лотка, характеристиками матеріалу, рівнем засипу, кутом нахилу лотка до осі печі, а також характеристик його футерування. У матеріалах дослідження вказана важливість застосування прогресивного методу радіолокаційного вимірювання параметрів рельєфу поверхні засипу шихти на колошнику доменної печі. Наведено радіолокаційні картини розподілу шихтових матеріалів по діаметру колошника за цикл завантаження з 9 порцій на доменній печі №9 АрселлорМіттал Кривий Ріг. Відзначено, що створення нових методів, програм завантаження і розподілу шихтових матеріалів, заснованих на розрахунку показників розподілу, є важливим науково-виробничим завданням. Наведено радіолокаційні картини розподілу шихтових матеріалів по діаметру колошника за цикл завантаження з 9 порцій на доменній печі №9 АрселлорМіттал Кривий Ріг.

У статті [63] наведені систематизовані геометричні дані про поверхню засипу на колошнику доменної печі, отримані із застосуванням гамма-профілемеру. Автори звертають увагу, що згідно з проведенням експериментальним дослідженням профіль поверхні з лійкою в осевій зоні отримували тільки при задудування доменної печі; при роботі печі в нормальному режимі рельєф був близький до рівної поверхні.

В роботі [64] проведено глибокі експериментальні дослідження на моделі безконусного завантажувального пристрою, геометричні розміри агрегатів і експериментальних шихтових матеріалів вибиралися на основі теорії розмірностей для визначення розмірних комплексів. На моделі досліджена окружна нерівномірність на колошнику експериментальної установки в залежності від ряду параметрів ведення доменної плавки. В роботі показано, що відносно великий розкид експериментальних точок пов'язаний з впливом співвідношення площі вихідного отвору воронки і нижнього клапана бункера, величиною кута між напрямками потоків шихти з бункера і з воронки.

В [65] розглянуто особливості розподілу дуття в доменних печах великого об'єму і взаємозв'язок розподілу шихти і дуття. Виявлено механізм виникнення локальних зон на поверхні засипу шихти на колошнику доменної печі №9 АрселлорМіттал Кривий Ріг. Відзначається, що неосіовий рух ших-

ти в направляючій трубці, розташованій після похилих тічок бункерів БЗП, обумовлює створення окружної нерівномірності на засипу колошника. Показано, що кривою зустрічі шихти і поверхні засипу є окружність неправильної форми, причому їх центри зміщені до стінки печі в напрямку, протилежному розвантаженню бункера. Доведена необхідність створення автоматизованої підсистеми управління завантаженням на колошнику за допомогою БЗП.

В оглядовому матеріалі [66] розглянуті питання завантаження доменних печей об'ємом понад 3500 м³. Акцентовано увагу на тому факті, що найбільш перспективною системою завантаження таких печей є система з БЗП. Розглянуто аспекти подальшої модернізації автоматизованих систем управління підсистеми завантаження шихти в піч, які керують колошниковими пристроями.

Таким чином, на сьогоднішній день програми завантаження шихти в доменну піч базуються на методиках, заснованих на емпірико-практичних розрахунках з великою кількістю коефіцієнтів, одержуваних експериментальним шляхом. В існуючих методиках розрахунку кінематичних параметрів руху шихти по трактах завантажувальних пристроїв доменних печей не враховується весь комплекс факторів, які безпосередньо впливають на процес формування поверхні засипу на колошнику доменної печі, і як наслідок рудного навантаження. Серед вищевказаних чинників слід зазначити фракційний склад шихти, її гранулометрію, фізико-механічні характеристики. В першу чергу це коефіцієнти внутрішнього і зовнішнього тертя матеріалу при взаємодії з елементами систем завантаження доменних печей.

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

Однак завжди слід пам'ятати, що формування так званого «заданого» профілю засипу шихтових матеріалів на колошнику печі не є остаточним чинником досягнення найкращих техніко-економічних показників доменної плавки. Найважливішими є показники газодинаміки. На сучасних доменних печах є в наявності широкий спектр моніторингового обладнання, що слідує за показниками плавки. Вагомими з точки зору технології є дані розподілення шихтових матеріалів у печі та дані щодо розподілу вмісту газів по радіусу колошника. Аналізуючи товщини та характеристики шарів шихтових матеріалів, що отримуються завдяки аналізу даних радарної системи моніторингу за поверхню засипу та поєднуючи ці дані з вмістом газів стає можливим ефективно корегування керуючих впливів БЗП для досягнення максимальної продуктивності печі, мінімального розходу енергоносіїв при використанні шихтових матеріа-

лів з конкретними характеристиками, що змінюються по ходу роботи доменного цеху.

Використання даних радарних систем моніторингу колошникової зони дає змогу чітко визначати товщини шарів шихтових матеріалів та прогнозувати газодинаміку печі. Але це не обумовлює відмову від використання теоретичних методик, які описують рух шихтових матеріалів по трактах БЗП та у колошниковому просторі. Ці методики дають відповідь на питання на скільки змінювати керуючі впливи БЗП для заданої корекції параметрів шарів шихтових матеріалів для раціоналізації газодинаміки доменної печі.

В роботі [47] структура стовпа шихти також розглядається з позицій оптимального газорозподілу. При цьому підкреслюється, що проблема оптимізації параметрів газорозподілу не може бути вирішена тільки на основі аналізу явищ газомеханіки і вимагає врахування низки процесів, обумовлених розподілом шихти, станом фурменної області та інших елементів структури шарів і зон матеріалів в печі. Відзначається, що накопичення рідких продуктів плавки погіршує рівномірність розподілу по перетину печі і величину ступеня використання газу CO внаслідок скорочення розмірів просторової течії газу.

Управління рівнем розплаву рідкого чавуну впливає на газодинамічні зони доменної печі, тому ефективно видалення рідких продуктів плавки займає важливе місце серед заходів, що забезпечують чіткість і надійність роботи доменної печі [67-77].

Велика кількість досліджень присвячено аналізу руху шихтових матеріалів в системі завантаження доменних печей, обладнаних конусними завантажувальними пристроями [12,78-83].

Сучасні автоматизовані системи шихтоподачі доменних печей об'єднують такі локальні підсистеми автоматичного контролю і регулювання [84]:

- завантаження накопичувальних бункерів;
- набору і дозування компонентів шихти;
- транспортування і завантаження матеріалів в доменну піч;
- відбору і підготовки представницьких проб матеріалів і продуктів доменної плавки для аналізу;
- автоматичного визначення фізичних властивостей шихтових матеріалів в потоці (вологості і ситового складу коксу, механічної міцності і газопроникності насипних мас агломерату і коксу);
- управління шихтовкою доменної плавки.

Створення загальної системи автоматизованого управління шихтоподаванням, що включає представлені локальні підсистеми, має ґрунтуватися на теоретичному дослідженні закономірностей руху шихтових матеріалів по трактах всього комплексу машин і механізмів, що забезпечують ефективно завантаження доменних печей з широким діапазоном зміни факторів, що впливають на процес. Така система повинна забезпечувати прогнозування поведінки потоків шихти і, як наслідок,

формування стовпа шихтових матеріалів в печі, а також хід доменної плавки. Пов'язування роботи обладнання підсистем вимагає однозначного теоретичного опису зміни фізико-механічних, геометричних, кінематичних і динамічних властивостей матеріалу при переході з однієї підсистеми в іншу. Важливим фактором є отримання моделей поведінки матеріалу, розроблених на основі одних і тих же фізико-механічних підходів, узагальнень і обмежень. Кінцевим результатом загальної системи автоматизованого управління всього комплексу обладнання систем завантаження доменних печей повинно стати визначення необхідних регулюючих впливів всього ланцюжка регуляторів комплексу системи подавання шихти для забезпечення бажаних результатів плавки.

Складність інтегрованої автоматизованої системи шихтоподачі полягає в ряді чинників:

- велика кількість впливають параметрів;
- неоднозначний вплив ряду факторів на технологічний процес;
- необхідність визначення ряду параметрів шихтових матеріалів в динаміці.

Крім того, система повинна забезпечувати безперебійне визначення робочих значень параметрів в умовах відсутності кількох значень вхідних параметрів (поломка реєструючих приладів, датчиків і т.п.). Це можливо лише в разі адекватного внесення «штучних» значень, впливаючих на процес факторів, яке не призведе до різкої зміни параметрів управління системою шихтоподачі і, як наслідок, порушення опускання стовпа шихти і всього процесу доменної плавки.

Розробка ефективної автоматизованої системи управління подавання шихти можлива тільки для конкретної доменної печі зі своїм індивідуальним обладнанням і технологічними параметрами, але підходи до вирішення завдань з теоретичного визначення регулюючих впливів повинні бути уніфіковані.

Таким чином, технологічний процес виробництва чавуну із застосуванням доменного процесу визначальним чином залежить від ефективності роботи систем завантаження шихтових матеріалів в піч. Літературний пошук показав, що на сьогодні немає комплексного опису роботи всіх систем шихтоподачі, який би підходив для будь-якого обладнання і враховував би всі основні фактори, що впливають на рух потоку шихти для якого справедливі закони механіки суцільного середовища. У зв'язку з цим, комплексний опис взаємозв'язків і закономірностей між параметрами потоку шихти і характеристиками систем шихтоподачі з урахуванням впливу на технологічний процес доменної плавки є актуальним.

Для отримання нового комплексного опису процесів, що відбуваються в системах завантаження сучасних доменних печей необхідно вирішити такі завдання:

- виявити закономірності зміни параметрів руху шихтових матеріалів в підсистемах завантаження

на колошник доменної печі які б ґрунтувалися на одному теоретичному підході, який би враховував увесь комплекс факторів, що впливають на процес;

- визначити кінематичні і геометричні характеристики потоку шихтових матеріалів по елементам завантажувальних пристроїв з урахуванням гранулометричного складу;

- в разі використання БЗП створити комплексний опис закономірностей витоку матеріалів з шихтових бункерів, який би враховував зміну гранулометричного складу матеріалів та геометричні особливості конструкції;

- створити єдину комплексну методику, засновану на теоретичних дослідженнях, яка б описувала послідовний рух шихтових матеріалів по елементах систем шихтоподачі доменних печей з низу до верху і його вплив на ведення доменної плавки.

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 точно їх корекцію, є важливим науковим завданням.

З огляду на вищевикладений матеріал основними завданнями, які повинні бути ефективно вирішені для найефективнішого ведення доменної плавки, є:

- дослідження закономірностей і характеру течії потоку шихтових матеріалів з бункерів БЗП з урахуванням гранулометрії та геометричних особливостей накопичувальних бункерів;

- встановлення зв'язку між гранулометриєю, фізико-механічними характеристиками шихтового матеріалу, як насипного вантажу і кінематичними параметрами його руху по трактах завантажувальних пристроїв доменних печей;

- дослідження взаємозв'язку параметрів витоку шихтових матеріалів з конусного затвора завантажувального пристрою доменної печі з гранулометричними і якісними характеристиками шихти;

- вивчення процесів взаємодії потоку шихтових матеріалів з перевантажувальними трактами завантажувальних пристроїв для встановлення початкових кінематичних даних, що визначають тра-

єкторію потоку у колошниковому просторі доменної печі;

- визначення впливу комплексу керуючих факторів завантажувального пристрою на формування рельєфу поверхні засипу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі;

- розробка методів оперативної корекції завантаження шихтових матеріалів в доменну піч для досягнення її найкращого ходу при будь-яких змінах опускання стовпа шихти в печі та гранулометричних характеристик шихти;

- визначення раціональних кутів відкриття шихтових затворів бункерів БЗП, кутів положення лотка-розподільника для досягнення необхідних геометричних характеристик поверхні засипу на колошнику доменної печі і, як наслідок, найкращої газодинаміки.

- забезпечення раціонального розподілення рудного навантаження вздовж радіуса колошника і загального рудного завантаження.

ВИСНОВКИ

1. Виявлено, 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.

2. Аналіз літературних джерел показав, що немає єдиного математичного апарату, який би дозволив описувати кінематику потоку шихти по всіх трактах завантаження печі з можливістю широкої автоматизації процесу в цілому.

3. Дослідження сучасних методик і програм завантаження доменних печей дозволило визначити, що вони не можуть оперативно проводити корекцію керуючих параметрів при швидкій зміні умов завантаження

4. Визначено основні недоліки систем завантаження доменних печей як з конусними так і безконусними завантажувальними пристроями, сформульовані подальші напрямки раціоналізації керуючих параметрів.

5. Глибокий аналіз використовуваних на сьогоднішній день методик і програм завантаження доменних печей показав, що не знайдено аналітичну кореляцію між кінемастикою потоку шихтових матеріалів з їх гранулометричним складом. Практичні дані про роботу доменних печей свідчать про наявність такої кореляції.

6. 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

Перелік використаних літературних джерел.

1. Сторожик Д.А. Определение пропускной способности конусного затвора с учетом переходных процессов. / Д.А. Сторожик, В.Д. Сергиенко, Н.Г. Селегей // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1982. – №2. С. 142-144.
2. Щиренко Н.С. Механическое оборудование доменных цехов / Н.С. Щиренко – М.: Металлургиздат., 1962. – 524 с.
3. Ганин Д.Р. Анализ способов оценки эквивалентного диаметра гранул окомкованой агломерационной шихты в условиях ОАО «Уральская сталь». / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов / Теория и технология металлургического производства. – 2015 – №1. С. 5-11.
4. Реконструкция и освоение систем загрузки доменных печей / [Большаков В. И., Иванча Н. Г., Муравьева И. Г., Шулико С. Т., Шутылев Ф. М.] – Бюл. НТЭИ Черная металлургия. Аглодомное приложение, 2005. – 56 с.
5. Выдувка доменной печи объемом 5000 м3 на капитальный ремонт 1-го разряда / [Можаренко Н. М., Шулико С. Т., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С. Орел Г. И., Листопадов В. С., Дмитренко К. А.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2004. – Вып. 8. – С. 130–138.
6. Деклараційний пат. Україна, 43970 А С21В7/24, G01R27/04. Спосіб визначення параметрів засипки шихти в доменній печі / Кукушкін О. М., Головкин В. І., Михайловський М. В., Ізюмський М. М., Муравйова І. Г., Тригуб І. Г. – заяв. 01.08.2000; опубл. 15.01.2002, Бюл. №1.
7. Чистяков В.Г. Исследование формирования поверхности засыпи на колошнике современными загрузочными устройствами с целью интенсификации доменной плавки: диссертация на соискание ученой канд. техн. наук: 05.16.02 / Владимир Григорьевич Чистяков. – Днепропетровск. – 1981. – 156 с.
8. Иванча Н.Г. Исследование выгрузки порций шихты из бункеров загрузочных устройств доменных печей / Н.Г. Иванча, В.И.Вишняков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии – 2011 С. 70-79.
9. Ковшов В.И., Петренко В.А., Набока В.И., Ткач А.А., Заблочный П.А. теория загрузки и газогидродинамики доменной печи Под ред. проф. Ковшова В.И. и Петренко В.А. – Днепропетровск: ТОВ «ЛизуновПресс», 2015. – 175с.
10. A blast furnace model to optimize the burden distribution / [G. Danloy, J. Mignon, R. Munnix, G. Dauwels, L. Bonte] – Ironmaking conference proceedings, 2001. – P. 37–48.
11. Mauricio Roche, Mikko Helle and Henrik Saxén. Principal Component Analysis of Blast Furnace Drainage Patterns. Processes, DOI:10.3390/pr7080519
12. Ashish Agrawal, Swapnil C. Kor, Utpal Nandy, Abhik R. Choudhary, Vineet R. Tripathi (2016). Real-time blast furnace hearth liquid level monitoring system. Ironmak. Steelmak., DOI 10.1080/03019233.2015.1127451.
13. Hiroshi Mio, Yoichi Narita, Kaoru Nakano, Seiji Nomura (2019). Validation of the Burden Distribution of the 1/3-Scale of a Blast Furnace Simulated by the Discrete Element Method. Processes, 8(1), 6, DOI: 10.3390/pr8010006
14. Yong Feng, Ziran Yuan (2020). Discrete element method modeling of granular flow characteristics ?ansi-tion in mixed flow. Comp. Part. Mech., DOI 10.1007/s40571-019-00309-1.
15. Yoichi Narita, Hiroshi Mio, Takashi Orimoto, Seiji Nomura (2017). DEM Analysis of Particle Trajectory in Circumferential Direction at Bell-less Top. ISIJ International, Vol. 57, DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-560
16. Henna Tangri, Yu Guo, Jennifer S. Curtis (2019). Hopper discharge of elongated particles of varying aspect ratio: Experiments and DEM simulations. Chemical Engineering Science: X, Volume 4, 100040, DOI 10.1016/j.cesx.2019.100040.
17. YangXu, JianXu, Chengfeng Sun, KaihuiMa, Cheng Shan, Liangying Wen, Shengfu Zhang, Chenguang, Bai (2018). Quantitative comparison of binary particle mass and size segregation between serial and parallel type hoppers of blast furnace bell-less top charging system. Powder Technology, Volume 328, DOI 10.1016/j.powtec.2018.01.020
18. Nicolin Govendera, Daniel N. Wilke, Chuan-Yu Wu, Ugur Tuzun, Hermann Kureck (2019). A numerical investigation into the effect of angular particle shape on blast furnace burden topography and percolation using a GPU solved discrete element model. Chemical Engineering Science Volume 204, DOI 10.1016/j.ces.2019.03.077.
19. Jiangfeng Wan, Fugang Wang, Guanghui Yang, Sheng Zhang, Mengke Wang, Ping Lin, Lei Yang (2018). The influence of orifice shape on the flow rate: A DEM and experimental research in 3D hopper granular flows. Powder Technology, Volume 335, DOI 10.1016/j.powtec.2018.03.041.
20. Qi Luo, Qijun Zheng and Aibing Yu (2017). From Micro to Macro: A Comparative Study of DEM and FEM in Modeling Hopper Flow. Springer Proceedings in Physics, vol. 188, DOI 10.1007/978-981-10-1926-5_102.

21. Алабужев П.М. Теория подобия и размерностей. Моделирование. / П.М. Алабужев, В.Б. Геронимус Л.М., Минкевич, Б.А. Шеховцов. М.: Высшая школа 1968, 206с.
22. Веников А.А. Теория подобия и моделирования. / А.А. Веников, Г.В. Веников М.: Высшая школа, 1984, – 439с.
23. Петренко В.А. Исследование хода восстановительных процессов в доменной печи. / В.А. Петренко, В.Н. Ковшов, В.И. Верещак, В.П. Иващенко. Монография. Днепропетровск: Институт технологии 2000, 112с.
24. 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. Головкин, М.А. Рыбальченко, Г.А. Папанов, С.Н. Селегей // Сборник научных трудов горного университета. Днепр: 2017. Вып. 52 – С. 192-198. Библиогр.: 5 назв.
25. Кирия Р. В. Описание процесса истечения сыпучего груза из бункера с помощью структурно-механических моделей / Р.В. Кирия // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2009. – Випуск 3(62). – С. 3–19.
26. В.И. Головкин, М.А. Рыбальченко, А.Н. Селегей. Определение геометрических параметров доз шихтовых материалов с целью определения их секундных объемов. ДВНЗ «Криворізький національний університет Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. Випуск 100. Кривий Ріг 2015.
27. 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 // Naukovi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu –2020/ №3, – С. 41-46.
28. В.Л. Покрышкин, В.И. Большаков, И.Т. Хомич, В.П. Грищенко, А.Ю. Зарембо Особенности распределения материалов в доменной печи объемом 5000м³ бесконусным загрузочным устройством / Сталь №11, 1982г. С.13-16
29. Большаков В.И. Научные основы совершенствования оборудования систем загрузки доменных печей / В.И. Большаков // Черная металлургия. Наука, технология, производство. Под ред. проф. И.Г. Узлова Тематический сборник науч. тр. М.: «Металлургия», 1989 С. 63-71.
30. Ковшов В.Н. Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи. / В.Н. Ковшов, В.А. Петренко. Монография. Днепропетровск: Институт технологии 1996, 125с.
31. Оптимизация состава и режима загрузки шихтовых материалов с целью повышения эффективности доменной плавки / [Большаков В. И., Гладков Н. А., Шутылев Ф. М., Тогобицкая Д. Н.] – Сталь, 2001.– №4. – С.6–10.
32. Современные методы сбережения энергии в доменном производстве [Ковшов В. Н., Бочка В. В., Сулименко Е. И., Петренко В. А.] / Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2008. – №16. – С. 177–186.
33. Некоторые особенности работы доменной печи при повышении интенсивности плавки / [Бочка В. В., Иващенко В. П., Ковшов В. Н., Сулименко Е. И., Куприков Р. А.] – Новини науки Придніпров'я, збірка наукових доповідей до науково-практичної конференції, присвяченої 100-річчю Г. А. Воловика, 2010. – С. 50–53
34. Ковшов В.Н. Численный анализ процессов доменной плавки / В.Н. Ковшов, В.П. Иващенко, В.А. Петренко – Днепропетровск, 2014. – 131с.
35. Формирование рациональной структуры столба шихтовых материалов в доменной печи / [Никитин Л. Д., Долинский В. А., Бугаев С. Ф. и др.] – Металлург, 2004. – №2. – С. 26–28.
36. Большаков В. И. Перспективы управления ходом доменной печи с использованием результатов измерения профиля засыпи / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева. – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2004. – №4. – С. 81–84.
37. Плискановский С.Т. Оборудование и эксплуатация доменных печей / С.Т. Плискановский, В.В. Полтавец. – Днепропетровск: Пороги, – 2004. – 495 с.
38. С.А. Бадин, М.Т. Бузверя, Г.Ю. Воронин, С.Т. Шулико. Поверхность засыпи шихты и ее связь с параметрами доменной плавки. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии Сб. научных трудов Киев, Наукова думка 1995. С. 77-85
39. Большаков В.И. Теория и практика загрузки печей М. Металлургия, 1990. 256с.
40. Большаков В. И. Оценка формирования слоев шихты на колошнике доменной печи с помощью радиолокационного профилемера / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шулико С. Т.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2006. – №3. – С. 5–10.
41. Большаков В.И., Лебедь В.В. Исследование взаимосвязи распределения температуры и химического состава газового потока по радиусу доменной печи // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск, ИЧМ НАН Украины. – 2006. – №13.– С. 27-35.
42. Большаков В.И. Совершенствование способов загрузки доменных печей в СССР и за рубежом: Обзор. Информ (Черная металлургия, сер. Производство чугуна) / В.И. Большаков, В.Л. Покрышкин, Ф.М. Шутылев. // Ин-т Черметинформация – 1983 – Вып. 2 32с.

43. Большаков В.И. Оптимизация программ загрузки доменной печи лотковым распределителем / В.И. Большаков, В.Л. Покрышкин, Ф.М. Шутылев. // Сталь – 1985 – С.56-59.
44. Бюллетень Научно-технологической информации Черная металлургия 1985 вып. 20(1000) В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо. Траектории движения шихты в колошниковом пространстве современной доменной печи.
45. Большаков В. И. Теория и практика загрузки доменных печей / Большаков В. И. – М.: Металлургия, 1990. – 256 с.
46. Доменное производство «Криворожстали». Монография под ред. члена-корреспондента НАН Украины В.И. Большакова, Днепропетровск 2004 376с.
47. В.И. Большаков. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки
48. Критерий режима загрузки доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев, С.Т. Шулико // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – №6. – С. 5-8.
49. Аналитическое исследование процессов доменной плавки. И.Г. Товаровский, В.И. Большаков, А.Е. Меркулов, Днепропетровск ЧМП «Экономика», 2011, 206с.
50. Результаты внедрения алгоритма «Траектория» в составе АСУ загрузки доменной печи / В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, Н.А. Гришкова // Автоматизация технологических процессов и управления производством в черной металлургии. МЧМ СССР. М. Металлургия, 1987. –С.30-33.
51. В.И. Большаков, И.Е. Варивода, Н.А. Рослик Ф.М. Шутылев. Влияние движения шихты по траектам загрузочного устройства на окружное распределение в доменной печи. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научных трудов Киев. «Наукова думка» 1995. С. 57 - 68.
52. В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, А.С. Сало. Методика расчета параметров схода шихты с распределительного лотка. Сборник научных трудов Вопросы производства чугуна в доменных печах МЧМ СССР (ИЧМ) М. Металлургия, 1984г.
53. Семенов Ю.С., Шумельчих Є.І., Горупаха В.В. Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах. -Дніпро : Домінанта Прінт, 2018.- 260с.
54. Радиолокационный контроль металлургических процессов. Головки В.И., Кукушкин О.Н., Михайловский Н.В., Потапов А.В., Смоктий В.В., Хасянов А.Ф. Днепропетровск: Журфонд, 2010-428с.
55. Ковшов В.И., Петренко В.А., Набока В.И., Ткач А.А., Заблоцкий П.А. теория загрузки и газогидродинамики доменной печи Под ред. проф. Ковшова В.И. и Петренко В.А. – Днепропетровск: ТОВ «ЛизуновПресс», 2015. – 175с.,
56. Верховська А.О. Підвищення ефективності роботи доменної печі: монографія. Запорізька державна інженерна академія. Запоріжжя: ЗДІА, 2012-98с.
57. Плискановский С.Т., Полтавец В.В. неполадки в работе доменных печей. Предупреждение и устранение. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 301с.
58. Исследование выгрузки порции шихты из бункеров загрузочных устройств доменных печей) Н.Г. Иванча, В.И. Вишняков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. Трудов – Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины, 2011. – вып.23 – с.70-79 – Библиограф. 5 назв.
59. В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, Особенности исчисления шихтовых материалов из бункера бесконусного загрузочного устройства / Металлургия и коксохимия . – Вып.88 – Киев: Техника – 1985 С.31-34
60. В.И. Большаков, В.В. Лебедь, А.А. Жеребицкий Особенности управления загрузкой шихты на современных доменных печах / Фундаментальные и прикладные СБ. Науч. Трудов ИЧМ «ФППЧМ». – Вып. 25. – 2012. – С.13-24
61. В.Л. Покрышкин, В.И. Большаков, И.Т. Хомич, В.П. Грищенко, А.Ю. Зарембо Особенности распределения материалов в доменной печи объемом 5000м³с бесконусным загрузочным устройством / Сталь №11, 1982г. С.13-16
62. В.И. Большаков, Ф.М. Шутылев, Рациональный режим работы вращающегося распределителя шихты бесконусного загрузочного устройства. / Сталь №3,1988г. С.17-20
63. Большаков В. И. Управление загрузкой и распределением шихты на колошнике и эффективность доменной плавки / Большаков В. И. – Познание процессов доменной плавки: Коллективный труд под редакцией Большакова В. И., Товаровского И. Г. – Днепропетровск: “Пороги”. 2006. – С. 87–109.
64. Исследование формирования профиля поверхности засыпи и структуры столба шихты в доменной печи / [Смоляк В. А., Щербцкий Б. В., Евсеева Н. Т., Василенко В. И.] – Сталь, 1974. – №2. – С. 100–103.

65. Ковшов В. Н. Исследование окружного распределения шихты бесконусным засыпным устройством с вращающимся лотком / Ковшов В. Н., Чистяков В. Г., Зозуля Г. С. – Металлургия и коксохимия. – К.: Техника, 1979. – № 62. – С. 34–37.
66. Большаков В. И. Взаимосвязь распределения шихты и дутья в доменной печи объемом 5000 м³ / Большаков В. И., Шулико С. Т., Листопадов В. С. – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003. – №6. – С. 3–8.
67. Распределение шихты и газового потока в доменной печи большого объема / [Большаков В. И., Варивода И. Е., Шулико С. Т., Шутылев Ф. М., Васинев Г. К. – Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства. Материалы первой Международной науч. - техн. конференции – Череповец: ЧГУ, 1998. – С. 15–18
68. Алымов Г.И. Эксплуатационные характеристики и надежность машин, обслуживающих чугунные летки доменных печей / Г.И. Алымов, В.Т. Пиляев, А.Н. Селегей, С.Г. Сподин. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – №4. – С.9-13.
69. Селегей А.Н. К расчету охлаждения буровой штанги машины для вскрытия летки доменной печи / А.Н. Селегей, Б.Б. Потапов, Ю.А. Мушенков // Новости науки Приднепровья. – 2005. – №6. – С.51-53.
70. Грачев К.Г. Об устойчивости штанги бурового инструмента машин для вскрытия чугунных леток доменных печей / К.Г. Грачев, В.И. Пурис, А.Н. Селегей // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. ,] – №1 – С.19-23.
71. Селегей А.Н. Экспериментальное определение осевой нагрузки буровой штанги машины для вскрытия чугунных леток доменных печей / А.Н. Селегей, Ю.А. Мушенков, Н.П. Стадничук // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2006. – №2(4) – С.108-111.
72. Селегей А.Н. Определение крутящего момента на буровой штанге машины для вскрытия чугунной летки доменной печи при ударно-вращательном способе бурения / А.Н. Селегей, Ю.А. Мушенков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007 – №2 – С.22-25.
73. Селегей А.Н. Определение вращающего момента, прилагаемого к буровому инструменту машины вскрытия чугунной летки доменной печи / А.Н. Селегей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №3/1(27) – С.38-40.
74. Селегей А.Н. Экспериментальное определение нагрузок при вскрытии чугунной летки / А.Н. Селегей, Ю.А. Мушенков // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2007. – №3 – С.108-110.
75. Селегей А.Н. О динамическом нагружении трансмиссии механизма бурения машин для вскрытия чугунных леток доменных печей / А.Н. Селегей, Ю.А. Мушенков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – №3 – С. 141-142.
76. Селегей А.Н. Определение рациональных геометрических параметров бурового инструмента машины для вскрытия чугунных леток доменных печей / Селегей А.Н., Мушенков Ю.А. // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2009. – №6 – С.89-91.
77. Алымов Г.И. Современные тенденции в проектировании технологического оборудования для доменного производства / Г.И. Алымов, В.И. Кузнецов, А.Н. Селегей, Д.В. Полишкевич // Доменное производство XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков, М.: 12-16 апреля 2010. С. 235-237.
78. Обоснование рациональных энергосиловых параметров машин для вскрытия чугунной летки доменной печи Металлургическая и горнорудная промышленность – 2012. – №6 – С.64-66.
79. Грузинов В. К. Управление газовым потоком в доменной печи программной загрузкой / Грузинов В. К. – ГНТИ ЧЦМ, Свердловск, 1960. –214с.
80. Ковшов В. Н. Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи / В. Н. Ковшов, В. А. Петренко – Институт технологии. Днепропетровск, 1996. – 124 с.
81. Ковшов В. И. Моделирование доменного процесса / Ковшов В. И., Петренко В. А., Верещак В. И. – Институт технологии. Днепропетровск, 1997. – 109 с.
82. В.А. Петренко Интенсификация процессов газодинамики и массообмена в доменной плавке Дн-ск, Институт технологий, 2000, монография 272 с. ISBN 966-7386-12-0.
83. Головкин В. И. Научное обоснование и применение микроволновой техники для информационного обеспечения АСУ ТП в металлургии. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Днепропетровск, НГУ, 2005. –473 с.
84. Доменный процесс по экспериментальным данным / Труды Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина, 1949, – №2 – 346 с. 18.