

До Спеціалізованої вченої ради
Д 08.084.03 при Національній
металургійній академії України
49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Селегея Андрія Миколайовича **«Розвиток наукових основ управління завантаженням доменної печі шихтовими матеріалами з урахуванням їх дисперсності»**, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – “Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів”

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Доменна плавка залишається найважливішою ланкою виробництва сталі як у світі так і в Україні. Основними напрямками вдосконалення теорії та технології доменної плавки є підвищення ефективності процесу, яке можливо оцінити двома основними параметрами – підвищенням продуктивності та зниженням витрати енергоносіїв. Одним з основних способів управління перебігом доменної плавки є раціоналізація режимів завантаження шихтових матеріалів з метою покращення газодинамічних процесів у стовпі шихти, які безпосередньо впливають на протікання відновлювальних процесів. Реалії української промисловості такі, що якість сировини, особливо коксу стало знижується. Тому для забезпечення продуктивності на перший план виходить підвищення ефективності режимів завантаження доменних печей, які б забезпечували найкращий перебіг відновлювальних процесів з урахуванням конкретних показників шихтових матеріалів.

В роботі розглянуті проблеми аналізу взаємного впливу параметрів завантаження шихти та перебігу процесів доменної плавки на техніко-економічні показники виробництва чавуну. Виконані дослідження дали змогу комплексно розглянути взаємозв'язок фактичного рудного навантаження, розподілення

газових потоків по радіусу колошника, продуктивності та витрати коксу. Важливим моментом роботи є теоретичне обґрунтування корегування параметрів завантаження шихти на колошник для підвищення ефективності відновлення заліза, що в свою чергу, позитивно впливає на техніко-економічні показники плавки.

Тему дисертаційної роботи Селегея А.М., яка спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми – вдосконалення технології доменної плавки і підвищення її ефективності за рахунок покращення якості розподілення шихтових матеріалів і методів управління газодинамікою плавки, слід вважати актуальною. Напрямок дисертації відповідає вимогам керівних документів МОН України про присудження вчених ступенів.

2. Наукова новизна отриманих результатів

В дисертації виконано комплекс теоретичних розробок та експериментальних досліджень, направлених на підвищення техніко-економічних характеристик доменної плавки в конкретних сировинних і технологічних умовах за рахунок покращення газодинамічних умов роботи колошникової зони доменної печі і якості розподілення шихтових матеріалів. Отримані в роботі результати є теоретичним узагальненням нових аналітичних підходів до корегування параметрів завантаження доменних печей з урахуванням гранулометричних характеристик використовуваної сировини.

На основі проведених досліджень в роботі отримані наступні **наукові результати:**

Запропоновано нове вирішення наукової проблеми, що полягає в корекції режимів завантаження і вдосконаленні технології доменної плавки за рахунок використання розробленої аналітичної моделі, де враховуються фактичні параметри гранулометрії шихти та рудне навантаження. Це дало можливість виявляти шляхи зменшення витрат коксу і збільшення продуктивності агрегату за рахунок раціональної зміни параметрів шихти й розподілу рудних навантажень по радіусу колошника доменної печі. А також наступне.

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

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

3. Практична цінність дисертаційної роботи

З використанням матеріалів дисертаційної роботи отримані наступні практичні результати.

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 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 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 "ДніпроГідроМаш", а також на Золотоніському машинобудівному заводі

ім. І.І. Лепсе, з їх допомогою проводиться проектування сучасних завантажувальних пристроїв доменних печей, які плануються до експлуатації.

4. Достовірність наукових положень і висновків дисертаційної роботи

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. Достовірність та обґрунтованість наукових положень, отриманих у дисертаційній роботі підтверджена співставленням теоретичних результатів з експериментальними даними в умовах лабораторного та промислового експерименту. Порівняння теоретичних та експериментальних даних показали високий ступінь співпадіння результатів, що дає можливість впевнено використовувати їх при корекції ходу доменної плавки.

5. Повнота викладення результатів досліджень у публікаціях.

За темою дисертації опубліковано 35 робіт, у тому числі: 1 монографія, 21 статей у спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ДАК України, 7 доповідей на наукових конференціях, отримано 4 патенти України, 3 статті увійшли до наукометричних баз Scopus і WoS. Кількість та якість публікацій, їх повнота відповідають вимогам, що висунуто до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

6. Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності

Дисертаційна робота Селегея А.М. складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота містить 363 сторінки, з них: 348 сторінок основного тексту, 101 рисуноків, 38 таблиць і додатки. Список використаних джерел складається з 190 найменувань.

У вступі відображена актуальність теми, мета дослідження, визначені задачі, об'єкт і предмет досліджень, сформульована наукова новизна отриманих результатів та їх практична цінність.

У першому розділі розглянуті особливості проблеми оперативного управління режимами завантаження сучасних доменних печей, обладнаних системами моніторингу за поверхнею засипу шихтових матеріалів. 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. 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. 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. 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.

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.

В третьому розділі дисертації розглянуті результати теоретичного дослідження роботи елементів систем завантаження і визначення їх раціональних параметрів. Розроблено методику визначення кількості дрібної фракції в шихті, яка подається безпосередньо в піч з міжконусного простору. Розглянуто процес руху потоків шихтових матеріалів в колошниковому просторі доменної печі. Рекомендовано 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. Встановлено, що найбільший вплив на швидкість просування шихти по трактах завантажувального пристрою доменної печі дають гранулометричний склад і тип шихтових матеріалів при однакових керуючих впливах.

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. Отримана методика, що дозволяє визначати фактичні показники завантаження шихтових матеріалів на колошнику, обладнаному датчиками, здатними фіксувати параметри рельєфу засипу в реальному часі. наведені результати створення програмного забезпечення для моніторингу фактичного рудного навантаження на колошнику доменної печі. Для виконання програмної реалізації було обрано середовище C++ Builder. Проведений аналіз корегування програм завантаження доменних печей. 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 залізозмісних шихтових матеріалів на колошнику печі.

П'ятий розділ присвячений аналізу результатів дослідження впливу газодинамічних параметрів колошникової зони доменної печі та параметрів завантаження на техніко-економічні показники плавки. Проаналізовано вплив ступеня використання газу CO на витрату коксу. Встановлено, що вміст двоокису вуглецю у колошниковому газі має кореляційний зв'язок з продуктивністю доменної печі та питомою витратою коксу. За допомогою розгляду фізико-хімічних процесів, що відбуваються при відновленні заліза з оксидів шихти розроблено математичну модель, яка дозволяє проводити прогноз зміни техніко-економічних показників доменної плавки при фактичній зміні рудного навантаження на колошнику печі. Це дало змогу при корегуванні режиму завантаження доменної печі прогнозувати зміну продуктивності та питомої витрати коксу.

У шостому розділі роботи наведені наукові матеріали щодо розробки алгоритмів корекції режимів завантаження доменних печей, що обладнані системою радарного моніторингу за поверхнею засипу на колошнику. Це дозволило отримувати корегувальні значення керуючих впливів, які у наступному можуть використовуватися у разі автоматичного або напівавтоматичного ведення процесу завантаження доменної печі при зміні гранулометричних показників шихтових матеріалів.

В цілому дисертація відрізняється логічним викладенням наукових матеріалів дослідження і оформлена відповідно до існуючих норм. Автореферат дисертації та опубліковані праці повністю відображають основний зміст роботи.

7. Загальні зауваження до дисертаційної роботи:

1. Стосовно оформлення автореферату. Є відсутність розшифрування позначень в деяких виразах.

2. Переклад на англійську мову анотації. Як наслідок, некоректна назва розробленого додатку «Blast_Furnace>Loading». «Loading» означає «завантаження» у контексті переносу цифрових даних до електронного пристрою. Стосовно «завантаження» доменних печей слід використовувати термін «Charging».

3. Анотації на українській та англійській мовах у дисертаційній роботі не відповідають одна одній. Тема дисертації англійською мовою взагалі інша, яка українською звучить як «Розвиток наукових основ для автоматичного коректування рельєфу поверхні завантаження у металургійній печі». Також в анотації до дисертації некоректно перекладено ключові поняття за темою дисертації.

4. Яким чином до теми досліджень дисертаційної роботи відноситься стаття, яка приведена переліку опублікованих праць: 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.

5. Присутня невідповідність фактичної кількості сторінок тексту роботи (363 стор.), посилань (190) в дисертаційній роботі та кількості, вказаної в авторефераті (361 стор.).

6. Некоректні посилання на використані літературні джерела. Присутні посилання на джерела, що відсутні у переліку. Наприклад, у розділі 1 є посилання на 84 джерела, тоді як у переліку їх 31.

7. Рух шихтових матеріалів не можна розглядати як вільно-дисперсний на всіх ділянках завантажувального пристрою. У місцях різкої зміни швидкості і напрямку руху шихти відбуваються інші закономірності.

8. Слід віднести неконкретність деяких положень, винесених в рубрику «Наукова новизна». Пункт 4 в даному формулюванні не є новизною. Вказані прийоми управління відомі й використовуються на практиці. Про це автор сам вказує у розділі 1. У відгуку спецради необхідно відобразити відміну розробок здобувача.

9. Траєкторії руху шихти, що отримані автором у роботі (наприклад, як на рис.9 в авторефераті), не відповідають дійсності. Чому така значна різниця у траєкторіях коксу та залізovмісних? За рахунок чого? Це суперечить результатам експериментальних досліджень як закордонних авторів так і власним дослідженням ІЧМ НАН України.

10. Використані автором у розрахунках кути відкриття шиберного затвору – 15° та 60° – не є придатними для практичного використання через те, що при кутах менше $22-25^\circ$ виникають ризики «костріння» шихтового матеріалу, а при кутах більше $50-55^\circ$ – пересипання матеріалу через борт лотка загрузочного пристрою.

11. Проведене фізичне моделювання не є достатньо адекватним. В реальних умовах величина об'ємної витрати шихти на 3 порядки більше, тобто у 1000 разів, у порівнянні з результатами, отриманими здобувачем.

12. Автором не врахована інформація, що крім гранулометрії на процес витікання матеріалу з бункеру в значній мірі впливає вологість шихти, особливо коксу. Досить детально розглянуто вплив відкриття шиберу в бункері на

траєкторії руху шихти у робочому просторі печі. Цей вплив як за результатами представленої роботи, так і за багатьма експериментальними даними ІЧМ НАН України, є малозначним.

13. В роботі не розглянуто питання впливу регулювання кута відкриття шиберу на зміну тривалості вивантаження порцій шихти у доменну піч та, як наслідок, на розподіл шихти на колошнику і на пропускну спроможність обладнання системи завантаження печі.

14. Щодо пропозицій з коригування програми завантаження не вказано конкретної міри коригуючих заходів, а тільки вказано напрямок дій, що не дозволяє використовувати такі рекомендації у реальних промислових умовах. Крім того, перерозподіл маси агломерату призведе до відповідного перерозподілу газового навантаження, що не дозволяє взагалі стверджувати про стабілізування газорозподілу в колошниковій зоні.

15. При розрахунках товщини шару з виразу (22) автореферату прийняте некоректне припущення: час засипання порції прийнято рівним 1 хвилини, тоді як в умовах ДП №9 Криворіжсталі середня тривалість завантаження порції дорівнює 90-120 с, тобто 1,5-2 хвилини. Це істотна неточність, яка може призвести до значної похибки. Доречі, автор у розділі 1 дисертації на стор.42 вказує, що тривалість вивантаження порції на печі об'ємом 5000 м³ повинно складати не менше 110 с.

16. Некоректне ствердження про «відсутність будь-якої кореляційної (функціональної) зв'язку між змістами CO і CO₂ в колошниковому газі». До речі, до цього ствердження додаються посилання на авторське свідоцтво СРСР 1986 року і монографію ІЧМ НАН України 2011 року (автори Большаков В.І., Товаровский Й.Г., Меркулов О.Є). В цих джерелах не йдеться про кореляцію вмісту CO і CO₂ в колошниковому газі.

17. З автореферату не зрозуміло «На рис. 23 (гістограма) чітко простежується вплив способу розподілу шихтових матеріалів на вміст CO₂». На вказаній гістограмі відсутня будь-яка інформація про розподіл шихти. Через це стає нелогічним посилання на іншу ілюстрацію – рис.24 – з коментарем:

«Підтвердженням цього впливу є залежність продуктивності від комплексного параметра - η - ступеню використання CO - рис.24.» Така залежність дійсно є і вона відома, але на діаграмі показана залежність продуктивності від сумарного вмісту в колошниковому газі оксидів вуглецю, яка говорить зовсім про інше: продуктивність збільшується не через підвищення ефективності плавки і збільшення ступеня використання CO, а через зменшення вмісту азоту у наслідок збагачення дуття киснем, що й призвело до збільшення добового виробництва чавуну.

18. Стверджується, що «Встановлено кореляцію між показниками гранулометрії і координатою зсипання шихти на поверхні засипу колошника доменної печі», при цьому відсутні згадування про значний вплив гранулометрії на формування поверхні засипу шихти через зміну кутів укосу матеріалу.

19. В роботі не враховується занос матеріалу на борт робочої поверхні лотка. Не враховується конструкція футерівки лотка, яка в значній мірі впливає на силу тертя (або на втрати механічної енергії), а в подальшому на траєкторію руху і місце падіння шихти на поверхню засипу в печі.

20. Термінологія. «Газодинаміка колошникової зони» - як це розуміти? Колошникова зона має незначну висоту відносно висоти всього стовпа шихти, тому не є визначальною для параметрів газодинамічного режиму плавки. Чи мається на увазі «суха» зона стовпа шихти?

Наведені зауваження не знижують загальної оцінки дисертаційної роботи, а деякі носять дискусійний характер.

8. Висновок про відповідність дисертації вимогам “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань...”

Дисертаційна робота Селегея А.М. за рівнем теоретичних і експериментальних досліджень є завершеною працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що в сукупності дозволяють вирішити важливу проблему вдосконалення доменної плавки в цілому за рахунок підвищення ступеня використання теплової та

хімічної енергії газового потоку шляхом його раціонального розподілу по поперечному перерізу доменної печі.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – “Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів” та пп. 9, 10, 12 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння наукового звання старшого наукового співробітника”. Автор дисертаційної роботи Селегей Андрій Миколайович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – “Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів”.

Офіційний опонент:

Доктор технічних наук,

старший науковий співробітник

заступник директора з наукової роботи

Інституту чорної металургії

ім. З.І.Некрасова НАН України



О. С. Меркулов
О. С. Меркулов