

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Тімошенка Сергія Миколайовича на тему:  
«Розвиток наукових основ підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей»,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю  
05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»

### Актуальність теми

Дугова сталеплавильна піч (ДСП), завдяки незалежності енергогенерації від окислювального потенціалу в робочому просторі, являє собою універсальний сталеплавильний агрегат, не критичний до виду вихідної шихти, і широко застосовується в світовій практиці, як у «великій» металургії при отриманні напівпродукту по інтенсивній технології, так і у ливарному виробництві при виплавці сталі по класичній технології. За останні 30 років у зв'язку з впровадженням інновацій, зокрема, поширеному використанню хімічної енергії (до 40% в енергобалансі), продуктивність ДСП зросла у «великій» металургії в 3-4 рази, проте енергоефективність печей суттєво не змінилася: втрати енергії складають 25-40%. При класичній технології виплавки, що застосовують в машинобудуванні, енергоефективність, в умовах тривалих простоїв печей дещо менша через втрати на акумуляцію теплоти масивною футерівкою. Для печей постійного струму (ДСППС), окрім питань засвоєння і втрат енергії, існує проблема ефективної реалізації енергії електровихрових течій (ЕВТ) в процесах тепломасообміна в ванні, а також проблема сталого теплового стану перехідної зони мідь-сталь подового електроду (ПЕ), що також впливає на енергоефективність печі.

Автор дисертації зосереджується на зменшенні основних статей втрат теплоти в дугових печах: з пилгазовим середовищем (ПГС) і охолоджуючою водою, а також, певною мірою, втрат заліза з плавильним пилом. Таким чином, рецензована робота відповідає положенням «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» і являється актуальною.

### Загальна характеристика дисертації і автореферату

Дисертація включає вступ, 8 розділів, загальні висновки і 9 додатків; при об'ємі 325 сторінок вона містить текст, 133 рисунки, 54 таблиці і список використаних джерел із 292 найменувань.

Дисертація написана державною мовою, технічно грамотно, поданий матеріал є сприятним для спеціаліста. Структура, стилістика подання матеріалу і оформлення дисертації та автореферату відповідають сучасним нормам та вимогам для наукових праць.

Матеріали дисертації опубліковано в 63 друкованих роботах, в тому числі: 29 – в фахових наукових виданнях, рекомендованих МОН України, з яких 5 – у виданнях України та 3 – у виданнях іноземних держав, включених в міжнародні наукометричні бази; в 2 колективних монографіях; в 10 патентах України; 11 робіт опубліковано без співавторів.

Основні положення дисертації пройшли апробацію на 17 міжнародних конференціях та конгресах.

Автореферат об'ємом 40 сторінок включає 28 рисунків і 3 таблиці. Він стисло, але достатньо повно відображує основні наукові положення, експериментальний матеріал і висновки дисертації.

### Критичний аналіз дисертації

**Вступ.** Показана актуальність роботи, наведені завдання досліджень та загальна характеристика дисертації, що включає наукову новизну, практичну цінність, методи досліджень. Наведені дані про публікації матеріалів дисертації і апробацію роботи.



## **Розділ 1. Теплотехнологічна характеристика та енергоефективність ДСП**

На основі літературних джерел наведено: енерготехнологічні характеристики і режими роботи ДСП; теплофізичні основи підвищення енергоефективності ДСП; структуру та основні складові втрат енергії; тенденції в сучасному електросталеплавильному виробництві до диверсифікації енергоресурсів ДСП; екологічну складову енергоефективності; особливості прояву проблеми енергоефективності в ДСППС та печах ливарного класу. Критично, з позицій завдань досліджень, розглянуто відомі математичні моделі, що описують тепловий стан ДСП.

### **Зауваження.**

1. В огляді не приділено уваги використанню систем охолодження "теплова труба", ефективних в високоінтенсивних теплогенеруючих пристроях.

2. Не розглянуто сучасний стан математичного моделювання газопилових потоків, які мають місце в ДСП і суттєво впливають на показники енергоефективності.

3. Рис. 1.5a, як результат аналізу «Association for Iron & Steel Technology» (США), приводить до висновку, що можливості ДСП по збільшенню продуктивності і енергоефективності виробництва близькі до вичерпання. Як дана робота відповідає на цей виклик?

## **Розділ 2. Структура, методологія та теплофізичні основи досліджень**

Наведено загальну структуру дисертації і теоретичні основи досліджень. Наукову продукцію дисертації становлять 5 інноваційних розробок, що відповідають критеріям наукової новизни і практичної цінності і комплексно вирішують завдання досліджень:

I - оптимізація геометрії сталеплавильної ванни і діаметра розпаду електродів;

II- водоохолоджувані елементи з просторовою структурою;

III- система розосередженої та розподіленої аспірації;

IV- енерго-екологічна концепція утилізації пилогазового середовища;

V- комбіновані рішення плавильного простору і подового електроду ДСППС.

Дисертантом, на основі фундаментальних законів і відомих емпіричних досліджень тепломасообміну, побудовано ряд математичних моделей, адаптованих для поставлених завдань. Ці моделі було застосовано в подальших розділах роботи.

### **Зауваження.**

Доцільним було б розмістити всі розроблені автором математичні моделі в цьому розділі, чого фактично немає. Певну незручність доставляє, коли частини матеріалу, пов'язані з даною моделлю, знаходяться в різних розділах, зокрема це стосується аналізу енергоефективності дуг при плавленні скрапу в колодязях (Розділи 2,3).

## **Розділ 3. Розробка енергоефективних рішень сталеплавильної ванни та розпаду електродів ДСП на основі досліджень процесів тепломасообміну**

На основі математичних моделей теплообміну випромінюванням розроблено оптимальне співвідношення діаметру і глибини сталеплавильної ванни, а також відносного діаметру розпаду електродів для різних енерготехнологічних режимів (ЕТР) роботи ДСП. На основі циркуляційної моделі проведено аналіз впливу геометрії ванни на процеси нагріву і усереднення сталеплавильної ванни, дефосфорації і зневуглецевлення металу.

### **Наукова новизна.**

1. Теоретично обґрунтовано й експериментально підтверджено оптимальне, за критерієм енергоефективності, співвідношення діаметра і глибини ванни, що для різних ЕТР становить 2,5–1,8 і дозволяє знизити втрати теплоти випромінювання з водою на 8,5–49 %, збільшити швидкість нагріву ванни і швидкість плавлення скрапу на 12–25 %, швидкість зневуглецевлення на 5–18 % і дефосфорації на 3–25 %, втрати заліза при випаровуванні на 10–12 %.



2. На основі математичного моделювання інтенсивної технології плавлення металошихти і нагрівання рідкої сталі до температури випуску встановлено, що коефіцієнт енергоефективності дуги знижується з 0,92–0,94 до 0,68–0,70 при еволюції окремих колодязів під електродами до загального колодязя, а збільшення діаметру розпаду електродів до 0,42–0,49 діаметру робочого простору призводить до зниження питомої витрати енергії в ДСП різної місткості на 2,5–7,5 %.

#### **Зауваження.**

1. Математична модель, розроблена для пошуку оптимального відносного діаметру розпаду електродів по критерію мінімізації енерговитрат, містить наочні, але дещо спрощені уявлення про процес плавлення шихти енергією дугового розряду, зокрема, прийнято: рівномірність тепловиділення трьох фаз, рівномірність теплофізичних характеристик скрапу, стабільність стінок «колодязів» в процесі плавлення. Фактичні умови відрізняються, певною мірою, в бік невизначеності.

2. В моделі плавлення скрапу також можливо вважати не узгодженим ряд техніко-технологічних питань, зокрема, як зміняться експлуатаційні характеристики проблемної центральній частині склепіння ДСП високої потужності при збільшенні діаметра розпаду електродів.

3. При оцінках впливу співвідношення діаметру і глибини сталеплавильної ванни на швидкість її нагріву і усереднення, чисельний розрахунок (рис. 3.14) показує зростання швидкості нагріву «глибокої» ванни на 12–16% порівняно з базовою, що практично збігається з даними емпіричної моделі Nakanishi. Запропонована автором циркуляційна модель усереднення рідкої ванни для цього випадку дає зменшення тривалості циклу циркуляції в 3 рази (табл. 2.3). Як дисертант пояснює таку розбіжність даних, враховуючи, що він розглядає нагрів і усереднення як процеси, що мають спільний механізм (стор. 118)?

### **Розділ 4. Розробка енергоефективних водоохолоджуваних елементів ДСП на основі дослідження теплового стану**

Проведено дослідження теплового стану водоохолоджуваного елемента (ВЕ) в робочому просторі ДСП, як в стаціонарному режимі, що, з певними припущеннями, умовам експлуатації печей «великої» металургії, так і в нестаціонарному режимі, характерному для печі ливарного цеху з тривалими простоями. Отримані дані покладено в основу розробок серії енергозберігаючих ВЕ з просторовою структурою, що при експлуатації заповнюється теплоізолюючим шаром гарнісажу. Вдосконалена методика розрахунку ВЕ з урахуванням особливості сприйняття теплоти випромінювання трубчастою поверхнею, конвекційної і конденсаційної складових теплового навантаження.

#### **Наукова новизна.**

1. Теоретично і експериментально отримані дані щодо теплового стану ВЕ з просторовою трубчастою структурою, які забезпечують зниження втрат теплоти випромінювання з охолоджувальною водою на 20–35% за рахунок формування теплоакumuлюючого і теплоізолюючого шару гарнісажу.

2. Встановлено, що в робочому просторі ДСП на трубчастій поверхні ВЕ діючі величини теплових потоків, що визначають термічні напруги і стійкість ВЕ, на 12–55 % перевищують значення, розраховані для плоскої поверхні, а частка конвективної і конденсаційної складових теплового навантаження на ВЕ становить в сумі 31–37 % теплового потоку випромінювання.

3. Чисельними дослідженнями теплообміну в ДСП ливарного класу в умовах неритмічної роботи визначено і експериментально підтверджено, що використання ВЕ з просторовою структурою в місцях критичної стійкості футерівки не підвищує енергоспоживання ДСП при відносній площі ВЕ зводу до 15–20 %, знижуючи при цьому витрату вогнетривів в 1,4–2,5 рази.



### **Зауваження.**

1. Як пояснити хід кривих на рис. 4.8а при аналізі теплового стану ДСП ливарного класу, зокрема сплеск підвищення енергоспоживання при незначних простоях в умовах наявності завантаженого скрапу, в порівнянні з ситуацією без скрапу?

2. В математичній моделі впливу відносної глибини ванни на інтенсивність випаровування сталі в області контакта з електричною дугою (п. 4.7.2) при оцінці часу контакту торцевої поверхні дуги з рухомим потоком сталі не враховувалось переміщення самої дуги, що в трьохфазних печах має місце на практиці.

## **Розділ 5. Розробка енергоефективної системи аспірації ДСП на основі досліджень гідромеханіки пилогазового середовища в робочому просторі.**

Обґрунтована нова концепція системи аспірації ДСП, заснована на спільному газодинамічному впливі розосередження і збільшення всмоктуючої поверхні з наближенням її до електродних зазорів. Проведено чисельне моделювання запропонованих систем розосередженої і розподіленої аспірації пилогазового середовища (ПГС) для типових ЕТР, реалізуємих в ДСП, включаючи печі ливарного класу, і пристрій ківш-піч.

### **Наукова новизна.**

Розроблена концепція системи аспірації ДСП, заснована на спільному газодинамічному впливі розосередження і збільшення всмоктуючої поверхні з наближенням її до електродних зазорів. В чисельних експериментах показана можливість зниження неорганізованих викидів ПГС на 15–29%, притоку повітря в піч на 20–25 %, виносу пилу з агрегату на 20–50 %, що підтверджено експериментально.

### **Зауваження.**

1. З матеріалів дисертації неясно, як вибирається ширина першого аспіраційного вікна витяжного газоходу системи розподіленої аспірації, що служить для розрахунку подальних вікон, згідно рекурентній формулі (5.6)

2. Наскільки обґрунтованим є прийняте припущення про однокомпонентність газового середовища в розрахунковій моделі, враховуючи що пиловміст відхідних газів ДСП, за посиланнями автора, сягає 60 г/м<sup>3</sup>?

3. Як в розробках вирішується проблема очистки витяжного газоходу системи розподіленої аспірації від накопичення пилу?

## **Розділ 6. Розвиток енергоекологічної концепції утилізації пилогазового середовища ДСП**

Розділ включає 4 самостійні розробки стосовно підвищення енергоефективності ДСП шляхом утилізації теплоти та пилу ПГС за умов різних варіантів ЕТР. Серед них:

- середньотемпературний попередній нагрів скрапу теплотою ПГС в діючому комплексі міні-заводу, що виключає утворення токсичних PCDD/F, забезпечує ГДК СО в газоходах і сприятливу експлуатаційну температуру газу в блоці рукавних тканинних фільтрів газоочистки;
- застосування ТХР природного газу з відхідними газами ДСП, що працює “flat-bath” процесом, для отримання альтернативного палива і генерації теплоти шляхом його спалювання при попередньому нагріванні безперервно завантажуваного в ванну скрапу;
- плавительно-відновний процес утилізації залізовмісного пилу в теплогенеруючій шлаковій ванні електропечі з двома ПЕ;
- камера первинного знепилювання відхідних газів ДСП малої місткості.

### **Наукова новизна.**

1. На основі дослідження двохстадійного процесу горіння СО в камері допалювання ДСП визначено співвідношення первинного і вторинного повітря 1 до 3,5, яке забезпечує: досягнення ГДК СО шляхом організації зони сталого горіння; отримання теплоносія для попереднього нагріву



скрапу з температурою до 500 °С, що виключає утворення токсичних PCDD/F; сприятливі температурні умови експлуатації блоку рукавних тканевих фільтрів газоочистки

2. На основі термодінамічного аналізу обґрунтовано технологічну схему електросталеплавильного «flat bath» процесу з альтернативним енергозабезпеченням шляхом термохімічної регенерації (ТХР) природного газу з відхідними газами ДСП, що, при нагріванні скрапу спалюванням синтез-газу, як продукту ТХР, підвищує тепловий ККД печі на 5–6 %, знижує витрати природного газу на 21 % і емісію CO<sub>2</sub> на 9,8 %.

3. Розроблено рідкофазний вуглецевотермічний плавильно-відновний процес (ПВП) в теплогенеруючій шлаковій ванні електричної печі з двома подовими електродами (ПЕ) і встановлено, що для отримання рідкого металізованого продукту в горні, відділеному від ПЕ шаром шлаку, коефіцієнт ефективної теплопровідності у ванні має становити не менше 2,7. Випробування ПВП на 200-кг пілотній установці показало можливість досягнення виходу придатного 71–94 % при витратах електроенергії 2,12–2,29 кВтг/кг продукту, що відповідає кращим закордонним аналогам «ITmk3» (США, Японія) і «OxySur» (ФРН).

#### **Зауваження.**

1. ТХР природного газу передбачає застосування масивного реформера. В дисертації не наведено даних розрахунків, підтверджуючих можливість розміщення цього пристрою в системі газовадалення ДСП.

2. ПВП, згідно схеми (рис. 6.8), схильний до короткого замикання між двома ПЕ рідкою металевою ванною (чавун), що слід вважати аварійним режимом. Які заходи передбачені для його запобігання?

### **Розділ 7. Підвищення енергоефективності ДСППС на основі досліджень електровихрових течій в ванні і теплопередачі**

Проведені чисельні дослідження електровихрових течій в ваннах ДСППС ливарного класу, а також в потужній ДСППС «великої» металургії. Моделювання дозволило знайти оптимальні рішення геометрії ванни і розташування ПЕ з позицій забезпечення максимальної потужності електромагнітного перемішування ванни, як фактора прискорення процесів тепломасообміну при виплавці сталі. Аналіз теплового стану ПЕ в потужній ДСППС показав напрямок вдосконалення технології виготовлення ПЕ для отримання вузької перехідної зони мідь-сталь з фазовим переходом та пошуку нових технічних рішень ПЕ з конвективним механізмом теплопередачі.

#### **Наукова новизна.**

1. На основі чисельного дослідження електровихрових течій (ЕВТ) в ДСППС ливарного класу, обґрунтовано використання «глибокої» ванни, що спричинює в 1,3–8,4 рази більш потужне ЕВТ-перемішування для різних варіантів ПЕ і, за рахунок скорочення періода доведення сталі, сприяє зменшенню питомої витрати електроенергії на 3–9 %.

2. Досліджено процеси теплообміну з фазовим переходом біметалічного ПЕ в умовах ЕВТ в анодній ямі ДСППС високої потужності і показано, що рівноважна товщина твердої сталеві частини ПЕ знаходиться в критичній залежності від ширини перехідної зони мідь-сталь, яка, для сталої роботи ПЕ має не перевищувати 20–25 мм. Шляхом чисельних досліджень і експерименту на фізичній моделі, обґрунтовано концепцію перспективного ПЕ з конвективним механізмом теплопередачі за допомогою проміжного рідкометалевого теплоносія.

#### **Зауваження.**

1. В ПЕ з рідкометалевим теплоносієм, в якості якого застосовано алюміній, очевидно, існує проблема усадки при кристалізації теплоносія в сталевій порожнині ПЕ, що призведе до утворення низькотеплопровідного газового зазору на шляху теплопередачі від ванни до охолоджуючого середовища.



## **Розділ 8. Застосування розробок в промисловості**

Представлені зразки технічних рішень, створених на основі досліджень автора дисертації; дані промислових досліджень і ступінь готовності окремих розробок. В наведеній загальній таблиці показано 20 впроваджень розробок, зокрема «глибокої» ванни, ВЕ з просторовою структурою, системи розосередженої аспірації, ПЕ в вузькою перехідною зоною мідь-сталь.

7 актів впровадження на заводах свідчать про реальний інтерес промисловості до розробок автора, зокрема відомих в Україні ПАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ), ПАТ «Кременчуцький сталеливарний завод» (м. Кременчук), ПАТ «Сумське НПО» (м. Суми) та ін.

Високі техніко-економічні показники розробок забезпечують термін окупності інвестицій, як правило, до 1 року.

### **Зауваження до роботи в цілому.**

1. В тексті дисертації та автореферату використовується велика кількість скорочень та позначень при цьому відсутній перелік умовних позначень, символів, одиниць, термінів, що ускладнює сприйняття роботи.

### **Оцінка обґрунтованості наукових положень і висновків дисертації**

Основні наукові положення дисертації базуються на фундаментальних законах і загальноприйнятих емпіричних залежностях, які автор застосував і адаптував, згідно з завданням досліджень, до процесів тепломасообміну, гідромеханіки і електровихрових течій, що протікають в робочому просторі ДСП.

В дисертації застосовані теоретичні та експериментальні методи дослідження. Реалізація їх здійснена в середовищах «Mathcad», «Excel» і «Delphi». Складні сполучені мультифізичні завдання вирішувались на базі пакетів прикладних програм: ANSYS, CosmosFloWorks, ELCUT. Результати чисельного моделювання порівнювались з експериментом на фізичній моделі, або перевірялись шляхом рішення тестових завдань. Промислові дослідження проводились на штатному обладнанні заводів.

Широке впровадження розробок в промисловості свідчить про достовірність базових наукових положень і висновків дисертації, що легли в основу розрахункових інженерних методик.

### **Значення дисертації для науки і практики.**

Наукові положення охарактеризовані в критичному аналізі розділів дисертації. Найбільш вагомими вважаю пункти наукової новизни стосовно оптимізації геометрії сталеплавильної ванни, водоохолоджуваних елементів з просторовою структурою і умов їх застосування в ДСП ливарого класу, системи розосередженої аспірації, диверсифікації енергозабезпечення ДСП шляхом ТХР природного газу, комплексного вдосконалення робочого простору і подового електроду ДСППС.

Практичне значення дисертації є переважним. Воно полягає у впровадженні розробок на 20 промислових підприємствах, патентуванні технічних рішень по розробкам (10 патентів України), створенні конкурентноспроможних зразків техніки (діюча нова універсальна 15-т ДСП ПАО «НКМЗ»).

### **Загальний висновок опонента**

Дисертаційна робота Тімошенка С.М. є завершеною науково-дослідною роботою, яка відповідає поставленим завданням, вирішує актуальну науково-технічну проблему підвищення енергоефективності ДСП, представляє інтерес для металургії і машинобудування.



Положення наукової новизни і практичної цінності, сформульовані в дисертаційній роботі, представляються достовірними та достатньо обґрунтованими.

Публікації і апробації за кількістю і якістю в повній мірі відображають сутність дисертації і відповідають вимогам МОН України щодо докторської дисертації.

Стиль написання роботи відповідає сучасним вимогам для наукових праць.

Зміст автореферату стисло і адекватно відображає основні положення дисертації.

Наведені зауваження не мають принципового характеру та не знижують загальної позитивної оцінки дисертації.

Дисертаційна робота «Розвиток наукових основ підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей» за напрямом досліджень і змістом відповідає спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, а також вимогам пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24. 07. 2013 р. щодо докторських дисертацій та нормативним документам МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор Тімошенко Сергій Миколайович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 –Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Завідуючий відділу процесів горіння  
Інституту газу НАН України, д.т.н.

К.Є. П'яних

«Підпис К.Є.П'яних підтверджую»,  
вчений секретар Інституту газу НАН України,  
к.т.н.



Б.К.Ільєнко

10 жовтня 2019 р.