

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

ТІМОШЕНКО СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.365.22

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ**

Спеціальність 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро–2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Міністерства освіти і науки України, м. Покровськ

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Губинський Михайло Володимирович,
Національна металургійна академія України, м. Дніпро,
професор кафедри промислової теплоенергетики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, лауреат Державної
премії України в галузі науки і техніки
Медовар Лев Борисович,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН
України, м. Київ, завідувач відділу фізико-
металургійних проблем електрошлакових технологій

доктор технічних наук, професор
Ганжа Антон Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
завідувач кафедри теплотехніки і енергоефективних
технологій

доктор технічних наук
П'яних Костянтин Євгенович,
Інститут газу НАН України, м. Київ,
завідувач відділу технологій альтернативних палив

Захист відбудеться 29 жовтня 2019 р. о 12³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої
ради Д 08.084.05 при Національній металургійній академії України за адресою:
просп. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49600, Україна
Тел./Факс: +38 (056) 745 41 96, e-mail: d0808405-nmetau@metal.nmetau.edu.ua

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної металургійної
академії України (пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро)

Автореферат розіслано 13 вересня 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
Д 08.084.05, к.т.н., доц.

М.С. Чемеринський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дугові сталеплавильні печі (ДСП) забезпечують близько третини обсягу світового виробництва сталі, поступаючи тільки конвертерному процесу. З урахуванням установок ківш-піч (УКП) для доведення сталі, в т.ч. в конвертерних цехах, внесок електросталеплавильного виробництва є значно більшим.

Можливість широкого вибору вихідної шихти і варіювання окислювального потенціалу в процесі плавки робить дугові печі універсальним агрегатом в «великій» і в «малій» металургії. Особливе місце займають печі постійного струму (ДСППС), технологічні переваги яких повніше реалізуються в ливарному виробництві. Важливу роль відіграє і відносна екологічна чистота дугових печей.

В ДСП актуальним є зниження енергоспоживання з огляду на високі втрати теплоти, що досягають 25–30 % від введеної енергії, а в «малій» металургії і вище. Актуальними постають також питання засвоєння введеної енергії, зниження, локалізації і утилізації втрат енергії і шихти, диверсифікації енергозабезпечення. Істотним внеском в даному напрямку є класичні дослідження Ю. Тулуєвського та І. Зінурова, Н. Pfeifer, М. Kirschen, D. Mazumdar, R. Guthrie, S. Köhle, J. Irons, M. Grant та роботи Е. Меркера, А. Белковського, V. Logar, N. Provatas, M. Pavlicevic, G. Gensini, N. Nagai, Y. Sato, X. Liu, T. Esterhof, M. Ramirez, І. Ячікова, П. Тіщенко.

В Україні, що входить до 15 світових лідерів чорної металургії, електросталеплавильне виробництво потребує маловитратної, з урахуванням економічної ситуації, модернізації, спрямованої на підвищення енергоефективності дугових печей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Матеріали дисертаційної роботи є узагальненням наукових результатів, отриманих автором при виконанні НДР у ДВНЗ ДонНТУ: д/т Н-6-15, № 0116U003646 «Підвищення енергоефективності і екологічної безпеки дугових сталеплавильних печей»; г/т 11-201 «Проведення науково-технічного супроводження робіт по оптимізації технології виплавки сталей і сплавів в ДСП-3А і по впровадженню та освоєнню нового сталеплавильного комплексу на основі печі ДСП-6» з ПАТ «Русполімет» (м. Кулебаки, РФ); проекту ЕС TEMPUS «Higher Engineering Training for Environmentally sustainable industrial development» (<http://hetes.com.ua>); контрактів ПП «Фірма «РОУД» (м. Київ) з ПАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ), ПАТ «ВМЗКО» (м. Волгоград, РФ), LLC «Rustavi Steel» (м. Руставі, Грузія) та ін., на постачання енерготехнологічного обладнання металургійним заводам України.

Мета та завдання досліджень: підвищення енергоефективності ДСП на основі розвитку теоретичних уявлень про процеси тепломасообміну, гідромеханіки і електровихрових течій (ЕВТ) в робочому просторі електросталеплавильного агрегату. Для досягнення мети поставлено такі завдання досліджень.

1. Дати аналіз сучасних концепцій підвищення енергоефективності ДСП, визначити напрямки досліджень.

2. На основі досліджень тепломасообміну обґрунтувати оптимальні, за критерієм енергоефективності, геометричні співвідношення робочого простору ДСП з урахуванням особливостей сучасних енерготехнологічних режимів (ЕТР).

3. Дослідити особливості теплообміну в водоохолоджуваних елементах (ВЕ) і розробити енергоефективні ВЕ з просторовою структурою, в яких використовуються теплоізоляційні і теплоакумуючі властивості відновлювального гарнісажу.

4. На основі досліджень гідромеханіки пилогазового середовища (ПГС) в робочому просторі ДСП розробити нові енергоефективні системи аспірації, що забезпечують локалізацію неорганізованих викидів ПГС і зниження притоку повітря.

5. Розробити наукові основи енергоефективних, екологічних напрямків утилізації ПГС для: нагріву скрапу в режимі, що виключає утворення токсичних PCDD/F; термохімічної регенерації (ТХР) природного газу; рециклінгу залізовмісного пилу та інших відходів на основі плавильно-відновного процесу (ПВП) в теплогенеруючій шлаковій ванні електричної печі з подовими електродами.

6. На основі дослідження ЕВТ в сталеплавильній ванні і теплового стану подового електроду (ПЕ) обґрунтувати оптимальні конструктивні параметри плавильного простору ДСППС за критерієм максимальної потужності ЕВТ-перемішування.

7. Удосконалити технологію виготовлення ПЕ з вузькою перехідною зоною мідь-сталь. Провести дослідження перспективного ПЕ з конвективним механізмом теплопередачі на основі рідкометалевого проміжного теплоносія.

8. Випробувати в промислових умовах і впровадити розроблені на основі досліджень технічні рішення стосовно геометрії ванни, ВЕ, системи аспірації, ПЕ.

Об'єкт дослідження: процеси тепломасообміну, гідромеханіки, і електровихрових течій, що визначають енергоефективність ДСП.

Предмет дослідження: закономірності та параметри процесів тепломасообміну, гідромеханіки і електровихрових течій в робочому просторі електросталеплавильного агрегату.

Методи дослідження. В роботі використано теоретичні та експериментальні методи дослідження. Розрахунки виконано переважно в «Mathcad», «Excel» і «Delphi». Для ряду мультифізичних завдань використано пакети прикладних програм: «ANSYS», «CosmosFloWorks», «ELCUT». Верифікацію результатів чисельного моделювання проводили шляхом порівняння з експериментом на фізичній моделі і рішення тестових завдань. Промислові дослідження здійснено на штатному обладнанні заводів.

Наукова новизна отриманих результатів.

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

2. Вперше, на основі математичного моделювання інтенсивної технології плавлення металошихти в ДСП і нагрівання рідкої сталі, встановлено, що коефіцієнт енергоефективності дуги знижується з 0,92–0,94 до 0,68–0,70 при еволюції окремих колодязів, що проплавляють електроди, до спільного колодязя, а збільшення діаметру розпаду електродів до 0,42–0,49 діаметру робочого простору сприяє зниженню питомої витрати енергії в ДСП різної місткості на 2,5–7,5 %.

3. Вперше встановлено, що в робочому просторі ДСП на трубчастій поверхні ВЕ діючі величини теплових потоків, що визначають термічні напруги й 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.

4. Вперше теоретично і експериментально отримано дані щодо теплового стану ВЕ з просторовою трубчастою структурою, що забезпечують зниження втрат теплоти випромінювання з охолоджувальною водою на 20–35 % за рахунок формування теплоакумулюючого і теплоізолюючого шару гарнісажу.

5. Вперше розроблено концепцію системи аспірації ДСП, засновану на спільному газодинамічному впливі розосередження і збільшення всмоктуючої поверхні з наближенням її до електродних зазорів. В чисельних дослідженнях показано можливість зниження неорганізованих викидів ПГС на 15–29 %, притоку повітря в піч на 20–25 %, виносу пилу з печі на 20–50 %, що підтверджено експериментально.

6. Вперше обґрунтовано використання теплоти і хімічного потенціалу відхідних газів ДСП для ТХР природного газу (ПГ) з подальшим попереднім нагрівом скрапу спалюванням синтез-газу, що в умовах «flat bath» процесу підвищує тепловий ККД печі на 5–6 %, знижує витрату ПГ на 21 % і емісію CO_2 на 9,8 %.

7. Вперше розроблено рідкофазний вуглецевотермічний ПВП в теплогенеруючій шлаковій ванні електричної печі з двома ПЕ і встановлено, що для отримання рідкого металізованого продукту в горні, відділеному від ПЕ шаром шлаку, множник, що враховує вплив конвекції у ванні, при коефіцієнті стаціонарної теплопровідності має становити не менше 2,7.

8. Вперше, на основі чисельних досліджень ЕВТ в ДСППС ливарного класу обґрунтовано застосування «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 %.

9. Вперше чисельними дослідженнями ЕВТ в анодній ямі ДСППС і теплопередачі через біметалічну перехідну зону ПЕ мідь-сталь з фазовим переходом встановлено, що рівноважна товщина твердої сталеві частини ПЕ знаходиться в критичній залежності від ширини перехідної зони, яка для сталі експлуатації ПЕ має не перевищувати 20–25 мм. Обґрунтовано концепцію ПЕ з конвективним механізмом теплопередачі за допомогою проміжного рідкометалевого теплоносія.

10. Отримали подальший розвиток дослідження теплообміну в ДСП ливарного класу в умовах неритмічної роботи. Визначено і експериментально підтверджено, що застосування ВЕ з просторовою структурою в місцях критичної стійкості футерівки не підвищує енергоспоживання ДСП при відносній площі ВЕ зводу до 15–20 % і знижує витрату вогнетривів в 1,4–2,5 рази.

11. Отримала подальший розвиток концепція утилізації теплоти відхідних газів ДСП. На основі дослідження двохстадійного процесу горіння CO в камері допалювання ДСП визначено співвідношення первинного і вторинного повітря 1 до 3,5, яке забезпечує досягнення ГДК CO шляхом організації зони сталого горіння і одержання теплоносія для нагріву скрапу з температурою до 500 °С, що виключає утворення токсичних PCDD/F.

Практична цінність отриманих результатів.

1. Розробки, здійснені на основі проведених досліджень, зокрема, по «глибокій» ванні ДСП, ВЕ з просторовою структурою, системі аспірації ДСП,

ПВП, ПЕ, захищені 10 патентами України №№ 83990, 89362, 97745, 113510, 114435, 114437, 115178, 115191, 120432, 124333.

2. Комплекс енергоефективних рішень: «глибока» ванна, ВЕ з просторовою трубчастою структурою, система розосередженої аспірації – реалізовано в новій розробці 15-т ДСП ПАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ), що забезпечує зниження енергоспоживання на 3–5 % і неорганізованих пилогазових викидів на 20–50 %.

3. ВЕ з просторовою трубчастою структурою, як загального призначення для стін і зводу, так і спеціальні рішення для захисту засобів інтенсифікації плавки і центральної частини зводу, впроваджено на заводах «великої» металургії з ДСП місткістю від 15 до 120 т: ПАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ), ПрАТ «ДЕМЗ» (м. Донецьк), ТОВ «Камасталь» (м. Пермь, РФ), ТОВ «Електросталь» (м. Курахове). Розробки характеризуються зниженими на 20–35 % втратами теплоти з водою, забезпечують економію вогнетривів, високу стійкість і ремонтпридатність.

4. ВЕ з просторовою структурою, в точу числі, комбіновані ВЕ, впроваджено на заводах «малої» металургії з ДСП ливарного класу місткістю від 3 до 25 т: ПАТ «КСЗ» (м. Кременчук), ПАТ «Сумське НВО» (м. Суми), LLC «Rustavi Steel» (м. Руставі, Грузія). Розробки сприяють підвищенню енергоефективності печі за рахунок скорочення витрати вогнетривів на 6,5–11 кг/т і електродів на 1,2–1,5 кг/т.

5. Системи розподіленої і розосередженої аспірації впроваджено на 100-т ДСП ПрАТ «ДЕМЗ» (м. Донецьк), 125-т ДСП ПАТ «ВМЗКО» (м. Волгоград, РФ), 15-т ДСП ПАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ) та LLC «Rustavi Steel» (м. Руставі, Грузія) і показали ефективну локалізацію неорганізованих викидів ПГС та зниження притоку повітря.

6. ПЕ з вузькою перехідною зоною мідь-сталь, виготовлені ПП «Фірма РОУД» двохстадійним електрошлаковим наплавленням міді на сталеву заготовку, впроваджено на ТОВ «Феррокс» (м. Запоріжжя) і забезпечують роботу 12-т ДСППС.

7. Камера первинного знепилення ДСП малої місткості експлуатується і забезпечує технологічний процес в 15-т ДСП LLC «Rustavi Steel» (м. Руставі, Грузія).

8. Розроблено загальні технічні рішення середньотемпературного попереднього нагріву скрапу при двохстадійному притоці повітря в камеру допалювання для міні-заводу з 50-т ДСП ТОВ «Електросталь» (м. Курахове), що виключають емісію РСDD/F, забезпечують економію електроенергії до 40 кВтг/т, ГДК СО в газоходах.

9. Випробування рідкофазного вуглецевотермічного ПВП в електропечі з ПЕ на 200-кг пілотній установці ПП «Фірма РОУД» і ДВНЗ «ДонНТУ» показало вихід придатного 71–94 % при витраті електроенергії 2,12–2,29 кВтг/кг продукту, що, при меншій капіталомісткості, відповідає кращим аналогам «ITmk3» і «OxyCup».

10. Основні положення дисертації стосовно розрахунку геометричних і енергетичних параметрів ДСП застосовують ПАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ) і ПП «Фірма РОУД» (м. Київ) у власних розробках промислових агрегатів.

11. Результати дисертації використано в робочих програмах дисциплін при підготовці магістрів і бакалаврів в ДВНЗ «ДонНТУ» (м. Покровськ).

Особистий вклад здобувача. Постановка завдань досліджень, обґрунтування наукових та методичних підходів до чисельних, лабораторних та дослідно-промислових експериментів, аналіз отриманих даних, формулювання положень наукової новизни та практичної цінності, висновків і технологічних рекомендацій за результатами досліджень здійснено безпосередньо автором. При підготовці

публікацій вклад автора був визначальним. У роботах, які було опубліковано у співавторстві, здобувачем виконано наступне: аналіз і узагальнення літературних даних, розробка і обґрунтування методики експериментів [1,2,43,8,47,23,28,30,31]; розробка математичної моделі і чисельне моделювання процесів тепломасообміну в робочому просторі ДСП і порожнині ПЕ з рідкометалічним теплоносієм [3,4,42,10,11,22,30]; ідея та обґрунтування концепції і чисельне моделювання систем аспірації ДСП [13,15,16,18,32,34,24], термодинамічний аналіз ТХР природного газу в ДСП [39,45]; розробка методики і аналіз експериментальних даних [6,7,9,14,33,17, 20,44,45,21,46]. Автор приймав участь у впровадженні розробок в промисловості.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені на 17 міжнародних конференціях: IV конгресі сталеплавильників (Москва, РФ 7–10.10. 1996); 9-th Metallurgical Conference «Metal-2000» (Ostrava, Czech Republic, 2000); VI конгресі сталеплавильників (Череповець, РФ 17–19.10.1996); Першій науково-практичній конференції «Реконструкція підприємств металургії» (Москва, РФ, ГК «Измайлово», 29–30.11.2005); VII науково - технічній конференції «Тепломасообмінні процеси в металургійних системах» (Маріуполь, ПДТУ, 6–8.09.2006); XIII і XV науковій конференції «Сучасні проблеми електрометалургії сталі» (Челябінськ, РФ, 2007; 2013); X конгресі сталеплавильників (Магнітогорськ, РФ, 15–17.10.2008); XXI конференції «Казантип-Еко 2013 (Щелкіне, АР Крим, Україна, 2013); науково-практичному симпозиумі «Низьковуглецеві відкриті інновації для регіонів України» (Донецьк, 2012); conference «Advances in Metallurgical Processes and Materials» AdMet 2015 (Kyiv, Ukraine, 4-5 June 2015), AdMet 2018 (Lviv, Ukraine, 10-13 June 2018); науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» ITMM 2016 (Дніпро, НМетАУ 27.03.2016), ITMM 2017 (29.03.2017), ITMM 2018 (28.03.2018), ITMM 2019 (27.03.2019); конференції «Університетська наука 2017» (Маріуполь, 18–19.05. 2017).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано в 63 друкованих роботах, в тому числі: 29 – в фахових наукових виданнях, рекомендованих МОН України, із яких 5 – в виданнях України і 3 – в виданнях іноземних держав, включених в міжнародні наукометричні бази; в 2 колективних монографіях; в 10 патентах України. Ряд робіт опубліковано в профільних виданнях і збірниках праць міжнародних наукових конференцій. Опубліковано 11 робіт без співавторів.

Структура і об'єм дисертації. Робота складається зі вступу, 8 розділів, загальних висновків, списку із 292 використаних джерел та 9 додатків. Дисертація має загальний об'єм 325 сторінок, містить 133 рисунки і 54 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Показана актуальність теми, сформульовані мета і завдання досліджень, наукова новизна і практична цінність результатів, особистий внесок автора, зв'язок роботи з науковими програмами і планами, апробація і публікація результатів.

Розділ 1. Теплотехнологічна характеристика та енергоефективність ДСП. Згідно з дослідженнями Ю. Тулуєвського, І. Зінурова, Н. Pfeifer, М. Kirschen, S. Köhle та ін., тепловий ККД дугових печей при ритмічній роботі не перевищує

70–75 %. В ДСП ливарного класу показники нижче через тривалі простої і втрати енергії на акумуляцію теплоти футерівкою.

До 90% втрат енергії в ДСП «великої» металургії відбувається з ПГС і в ВЕ. Крім енергії, з ПГС втрачається 2,5 % заліза при емісії плавильного пилю. В дисертації розглядаються шляхи мінімізації (рис.1) 68 % (25 з 37 %) загальних втрат енергії і 23 % (2,5 з 11 %) загальних втрат заліза в ДСП.

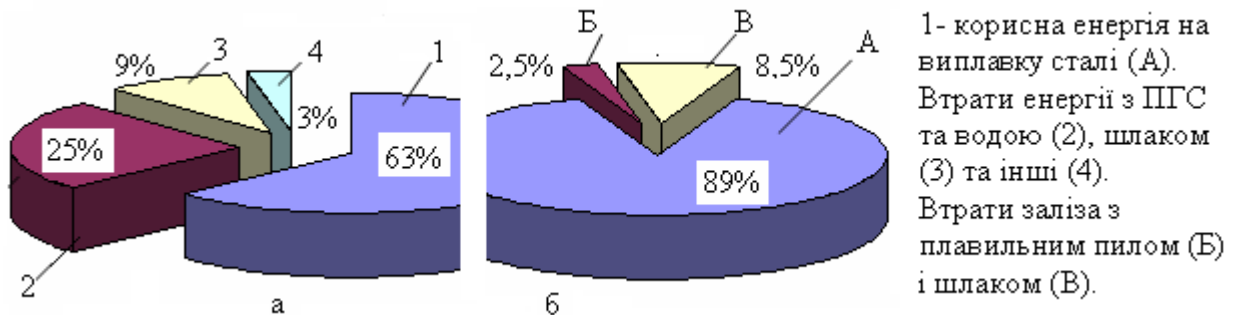


Рис. 1. Енергетичний баланс ДСП (а) і матеріальний баланс заліза (б).

Для підвищення енергоефективності ДСП застосовують чисельне моделювання процесів тепломасообміну, як в циклі плавки (V. Logar та інші; F.Opitz і P. Treffinger; Ю. Станкевич та ін.), так і в період нагріву рідкої ванни: D. Guo та G. Irons; H. Pfeifer, T. Echterhof, J-C. Gruber; O. Gonzales; E. Меркер, А. Белковський).

Значні втрати енергії в ДСП обумовлені традиційними уявленнями про доцільність неглибокої плоскої ванни на відміну від глибокої ванни в конвертері, і мінімального діаметру розпаду електродів. Питання зменшення випромінюючої поверхні ванни, впливу глибини ванни і діаметру розпаду електродів на показники тепломасообміну при плавці в ДСП відображені недостатньо.

Особливості гідромеханіки ПГС в ДСП пов'язані зі значно меншим, ніж в конвертері, співвідношенням площ поперечного перерізу аспіраційного газоходу і ванни, що, при порівнянній продуктивності, призводить до збільшення виносу заліза з плавильним пилом через високу швидкість газового потоку в системі аспірації. Відповідно, вихід придатного в конвертері і ДСП становить 89–92 і 86–90 %.

Для зниження втрат теплоти в ВЕ компанії «Siemens-VAI» (ФРН, Австрія), «Danieli» (Італія), ПП «РОУД» (Україна) використовують теплоакумуючі властивості гарнісажу. Однак, при визначенні теплового навантаження, не враховуються особливості сприйняття випромінювання трубчастою поверхнею ВЕ, конвективна та конденсаційна складові, що негативно впливає на стійкість ВЕ.

Проблеми засвоєння енергії в ДСП надвисокої потужності ($\geq 1,2$ МВА/т) актуалізують задачі зниження і утилізації втрат теплоти, диверсифікації енергозабезпечення. Компанії «Tenova» (Італія), «Siemens-VAI», «JP Steel Plantech» (Японія), «SMS Siemag» (ФРН) розвивають концепцію FAF (fuel arc furnace) з широким (до 40–50 % потрібної енергії) використанням в ДСП більш дешевих первинних джерел енергії і теплоти екзотермічних реакцій в ванні. Інноваційні «flat bath» процеси «Consteel», «EcoArc», «COSS», «Quantum» передбачають утилізацію теплоти ПГС для попереднього нагріву (ПН) скрапу. Поширення новітніх технологій стримує підвищення емісії парникових газів і токсичних PCDD/F.

В умовах дефіциту традиційної шихти і екологічного навантаження на довкілля зростає інтерес до процесів виробництва металізованої сировини (МС) з техногенних залізовмісних відходів. Висока капіталоємність МС-технологій, зокрема, «ІТmk3» (Японія, США), «ОхуСур» (ФРН) роблять актуальним для України пошук маловитратних рішень, локалізованих в межах окремого міні-заводу.

ДСППС при класичному ЕТР «малої» металургії мають переваги над ДСП, але проблеми експлуатації ПЕ знижують їх конкурентність. Малодослідженим є комплексний вплив геометрії ванни, ЕВТ і характеристик перехідної зони мідь-сталь на тепловий стан ПЕ і енергоефективність печі. Існує потреба в ПЕ з вузькою перехідною зоною і, в перспективі, з конвективним механізмом теплопередачі.

В дугових печах малої місткості ливарного класу системи аспірації і охолодження потребують компромісних рішень з урахуванням особливостей ЕТР.

Розділ 2. Структура, методологія та теплофізичні основи досліджень. У дисертації представлено 5 пакетів інноваційних розробок за критеріями наукової новизни і практичної цінності, здійснених в рамках завдань досліджень (табл. 1, рис. 2).

Таблиця 1. Структура і зміст дисертаційної роботи

Пакет інновацій (I-V)	Характеристика задач в сфері технічної теплофізики та промислової теплоенергетики (Розділ дисертації)
I. Оптимізація геометрії сталеплавильної ванни і діаметру розпаду електродів ДСП	Теплообмін випромінюванням в робочому просторі; локальні енергетичні баланси плавлення шихти; тепломасообмін в рідкій ванні і на границях фаз (3)
II. Енергозберігаючі ВЕ з просторовою структурою і ВЕ, комбіновані з футерівкою	Аналіз термічних напружень в ВЕ з урахуванням променевої, конвективної і конденсаційної складових теплового потоку на трубчасту поверхню ВЕ (4)
III. Енергоефективні системи розподіленої і розосередженої аспірації	Стаціонарна газодинаміка робочого простору ДСП; теорія витяжних газоходів рівномірного притоку (5)
IV. Енергоекологічна концепція утилізації теплоти і заліза ПГС	Термодинаміка, хімічна кінетика; задача Шумана; розтікання струму і теплогенерація в шлаку (6)
V. Підвищення енергоефективності ДСППС шляхом впливу геометрії і гідродинаміки ванни та характеристик ПЕ	Сполучена задача електровихрових течій, гідродинаміки і теплопередачі через біметалічну зону мідь-сталь ПЕ з фазовим переходом (7)

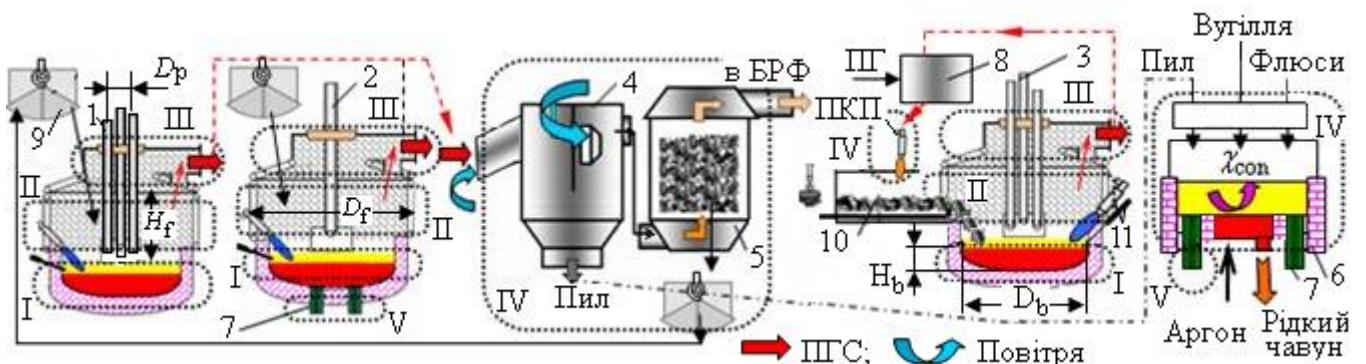


Рис. 2. Структурна схема досліджень, проведених в дисертації. 1–ДСП (базовий ЕТР), 2–ДСППС (базовий ЕТР), 3–ДСП («flat bath» процес), 4–камера допалення СО, 5–камера нагріву скрапу, 6–плавильно-відновна піч, 7–ПЕ, 8–реформер, 9–баддя, 10–конвейєр, 11–засоби інтенсифікації плавки. БРФ–блок рукавних фільтрів, ПГ–природний газ, ПКП–паливно-кисневий пальник.

Для пошуку енергоефективних співвідношень діаметру D_b та глибини H_b ванни і діаметра розпаду електродів D_p розроблені математичні моделі теплообміну випромінюванням (рис. 3), плавлення шихти (рис. 4), циркуляції рідкого металу (рис. 5).

Результуючий тепловий потік на ВЕ є функцією взаємного випромінювання ванни, електродів і ПГС в робочому просторі (рис. 3). Випромінювання дуг, екрановане шлаковою піною, враховується через температуру ванни. Поверхня електродів в моделі є циліндром діаметром D_p і висотою H_e . В ДСППС D_p дорівнює діаметру електрода d_e . Температура поверхні ванни 1873 К; температура електродів є функцією відносної висоти над ванною (z/H_e), на основі даних J-C.Gruber, T.Echterhof, H Pfeifer. Критерієм оптимізації D_b/H_b є мінімальні питомі втрати теплоти з водою.

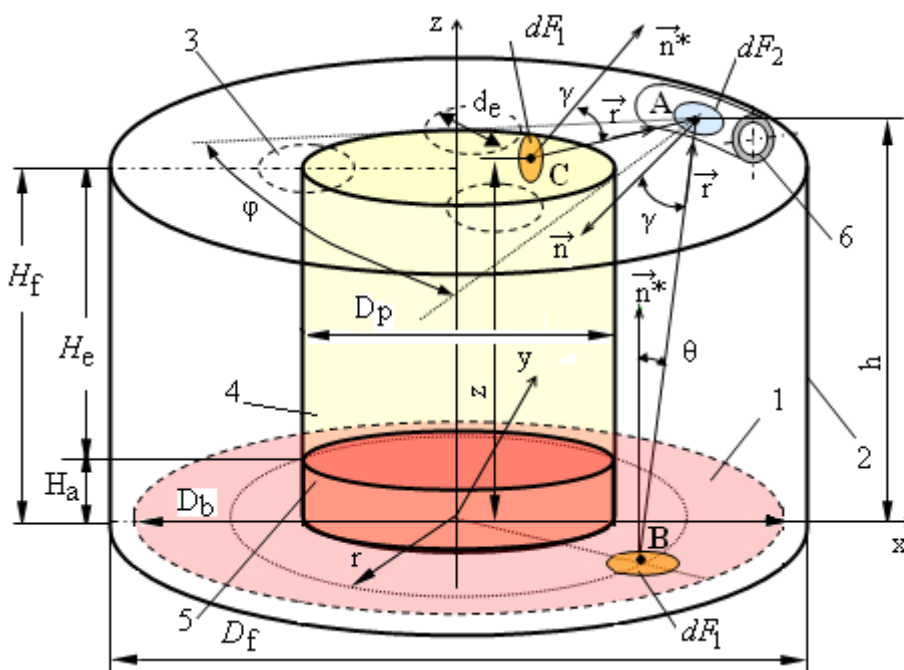


Рис. 3. Схема теплообміну випромінюванням в ДСП, адаптована до оптимізації геометрії робочого простору. 1–ванна, 2–корпус, 3–електрод, 4–умовна поверхня електродів, 5–умовна поверхня дуг, 6–ВЕ. x, y, r, h, φ –координати.

Потужність, що випромінює поверхня F_1 на елементарну площадку:

$$Q_1 = \sigma \varepsilon_r (T_1^4 - T_2^4) \iint_{F_1} \left[(\cos \theta \cdot \cos \gamma) / (\pi r^2) \right] dF_1 \quad (1),$$

де σ – стала Стефана-Больцмана; T_1, T_2 – температура поверхні, що випромінює і приймає тепловий потік, відповідно; ε_r – приведений ступінь чорноти; θ, γ – направляючі кути радіус-вектору r відносно нормалей \vec{n} до елементарних площадок.

Потужність поглинання енергії поверхнею F_2 , що охолоджується:

$$Q_{wce} = \int_{F_2} Q_1 \cdot dF_2 \quad (2)$$

Для вирішення завдань оптимізації геометрії ванни і діаметру розпаду електродів, для розрахунку втрат теплоти в ВЕ використовується (2), при дослідженнях теплового стану і термічних напружень в ВЕ застосовується (1).

Критерієм оптимізації D_p є максимальна відносна тривалість плавлення шихти в колодязях вихідним діаметром $d_{w0} = 1,35d_e$, що формуються та еволюціонують навколо електродів ДСП (рис. 4) за умов однорісності шихти.

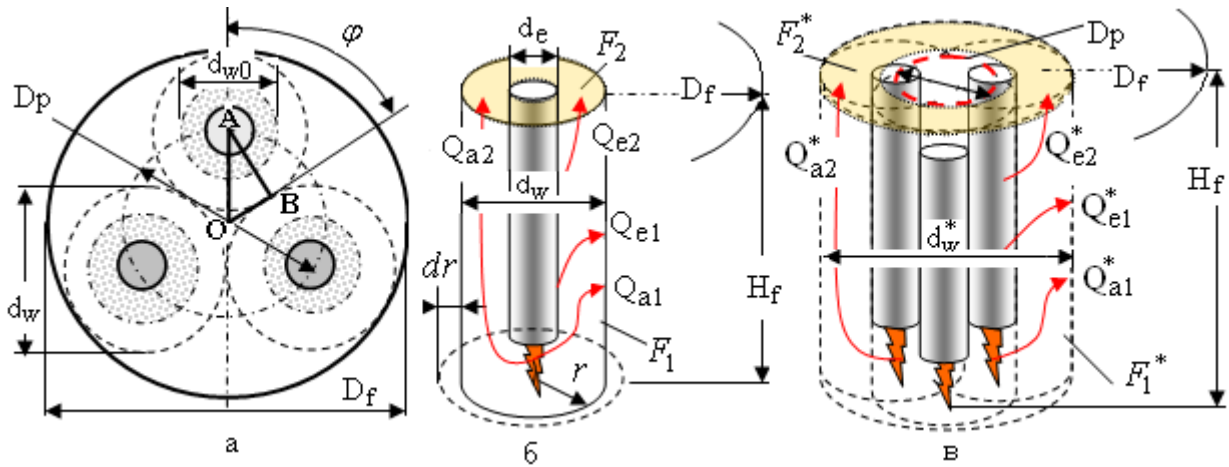


Рис.4. Схема плавлення шихти в ДСП (а) і теплообміну в окремих (б) та спільному (в) колодязях.

Геометрично оптимальний D_p із трикутника OAB з кутом $\varphi = 60^\circ$ дорівнює $0,54$ внутрішнього діаметру печі D_f і коригується з урахуванням втрат теплоти, відносного часу закритого в окремих та спільному (індекс $*$) колодязях і відкритого горіння дуг в процесі плавки. Випромінювання в колодязі сприймає поверхня стінок F_1, F_1^* (корисна теплота $Q_{a1}, Q_{e1}; Q_{a1}^*, Q_{e1}^*$) і поверхня зводу ДСП над колодязем F_2, F_2^* (втрати теплоти з водою $Q_{a2}, Q_{e2}; Q_{a2}^*, Q_{e2}^*$). Динаміка плавлення шихти дугою потужністю P_a представлена як послідовність квазістаціонарних станів кільцевих шарів шихти товщиною dr в колодязі поточного радіуса r і висотою H_f , що еволюціонує. Енергобаланс етапу τ_i періоду плавлення в межах А-В становить:

$$P_a \eta_{aw} \int_0^{\tau_i} d\tau = 2\pi H_K \rho_b k_y \left[\int_A^B \Delta t_s(r) \cdot C_s(r) \cdot r dr + q_m \int_A^B r dr \right] \cdot k_{air} \quad (3)$$

де η_{aw} – коефіцієнт енергоефективності дуги в колодязі; $C_s(r), \Delta t_s(r)$ – поточні теплоємність і перепад температур в шарі скрапу; k_y, q_m – витратний коефіцієнт і теплота плавлення скрапу; k_{air} – коефіцієнт витрати теплоти на нагрів повітря.

В процесі інжекції інертного газу через продувний вузол з витратою Q_0 , в ванні виникає двофазна газометалічна область, що є рушійною силою циркуляції (рис. 5). Параметри області: газовміст φ і кут розкриття γ визначаються емпіричними залежностями G. Krishnamurthy, S. Mehrotra, A. Ghosh від Q_0, D_b, H_b . В умовному контурі циркуляції метал рухається зі швидкістю u_m в двофазній області та u_{av} на периферії, згідно з емпіричними даними D. Mazumdar, R. Guthrie:

$$u_m = 4,5 Q_0^{0,33} H_b^{0,25} / (0,5 D_b)^{0,33} \quad (4) \quad u_{av} = 0,79 Q_0^{0,33} H_b^{0,25} / (0,5 D_b)^{0,67} \quad (5)$$

Особливості сприйняття теплоти випромінювання трубчастою поверхнею ВЕ (рис. 6), за умов: $d \ll D_p, D_b, h$, полягають в тому, що поблизу точки A_t на трубчастій поверхні завжди знайдеться елементарна площадка, до якої радіус-вектори \vec{r}_b, \vec{r}_e від випромінюючих ванни та електродів направлені по нормалі \vec{n} . Згідно з (1), це означає максимальний тепловий потік від складових q_b, q_e . Параметр β_{BE} (рис.6б) характеризує зріст теплового навантаження на точку трубчастої поверхні ВЕ в порівнянні з плоскою і складає 1,2–1,55, збільшуючись від центру до периферії робочого простору та зі зменшенням висоти h точки над ванною.

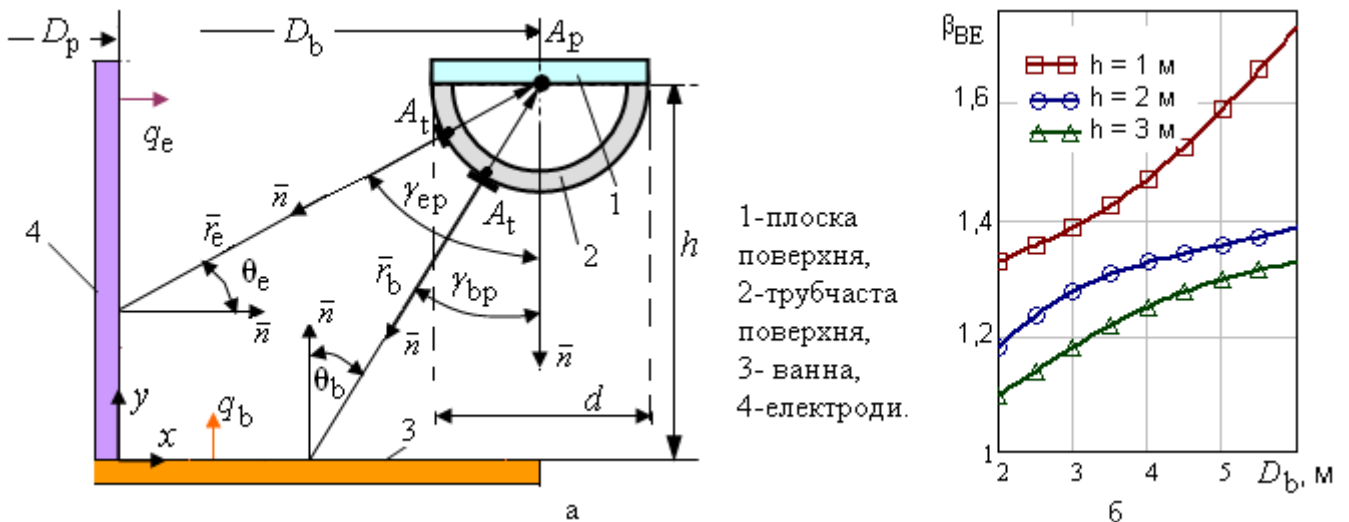


Рис. 6. Сприйняття енергії випромінювання поверхнею ВЕ (а). Ступінь зростання теплового навантаження на трубчасту поверхню відносно плоскої β_{BE} в залежності від D_b і h (б).

У чисельному дослідженні нагріву сталеплавильної ванни в пакетах прикладних програм, згідно з рекомендаціями О. Gonzales, М. Ramirez-Argaez, F. Conejo, за умов турбулентного руху в'язкої нестисливої рідини, керуючими є рівняння нерозривності, балансу імпульсу (Нав'є-Стокса), дисипації енергії у вигляді k - ϵ моделі турбулентності та теплопровідності, в яке включена теплота Джоуля. При моделюванні руху ПГС в робочому просторі печі і камери допалювання та первинного знепилення, теплообмін зі стінками, що обмежують, не враховувався, тому із керуючих рівнянь виключено рівняння теплопровідності.

Електровихрові течії в ванні ДСППС і в порожнині подового електроду з рідкометалевим проміжним теплоносієм описуються комплексом рівнянь гідромеханіки, теплопровідності і електродинаміки: Максвелла, узагальненим законом Ома для рухомого середовища і законом збереження електричного заряду.

Розділ 3. Розробка енергоефективних рішень сталеплавильної ванни та розпаду електродів ДСП на основі досліджень процесів тепломасообміну. Аналіз впливу геометрії ванни на за (2) показав, що в ДСП та ДСППС з базовим ЕТР і ДСП з «flat bath» процесом, при зміні D_b/H_b від базового рівня 5 до «глибокої» (з урахуванням обмежень в робочих областях А, Б) ванни, втрати теплоти з водою скорочуються на 8,5; 20 і 49 %, відповідно (рис. 7). Робочі області визначаються способом завантаження шихти: циклічно баддями при базовому ЕТР, або безперервно конвексом в рідку ванну при «flat bath» процесі.

Мінімум на кривих обумовлено зростанням впливу поверхні електродів в загальній потужності випромінювання при зменшенні D_b / H_b .

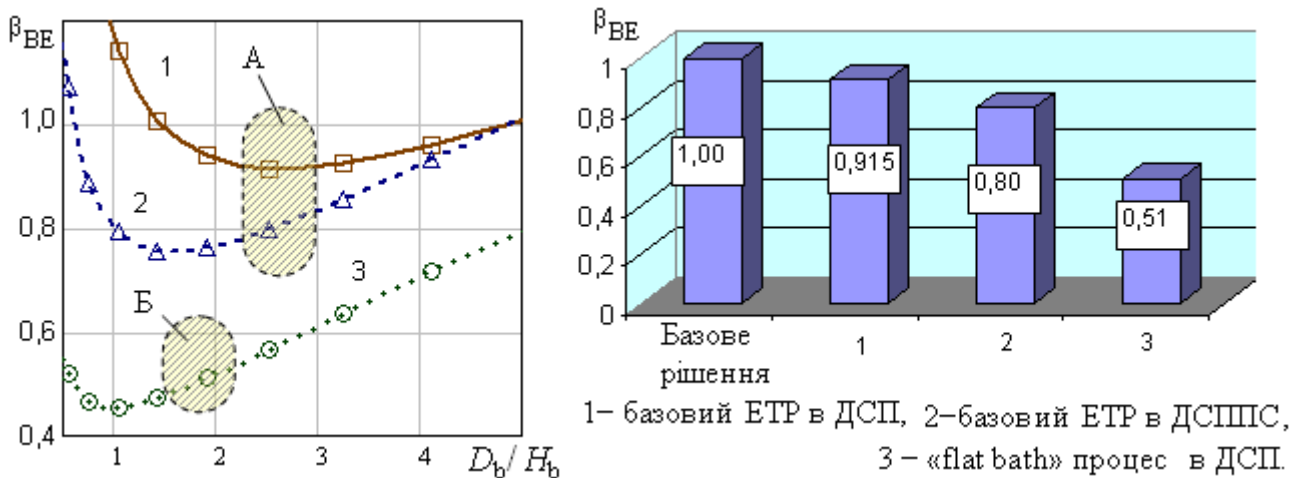


Рис. 7. Відносні втрати теплоти випромінювання β_{BE} в залежності від D_b / H_b в 120- т печі.

Інтенсивність циркуляції M_c , згідно з (6), в «глибокій» ванні в 2,2–3,5 рази вище, ніж в базовій ванні, що є наслідком збільшення відносного об'єму двофазної області (рис. 8). Ефект глибини ванни зростає з підвищенням витрати газу Q_0 .

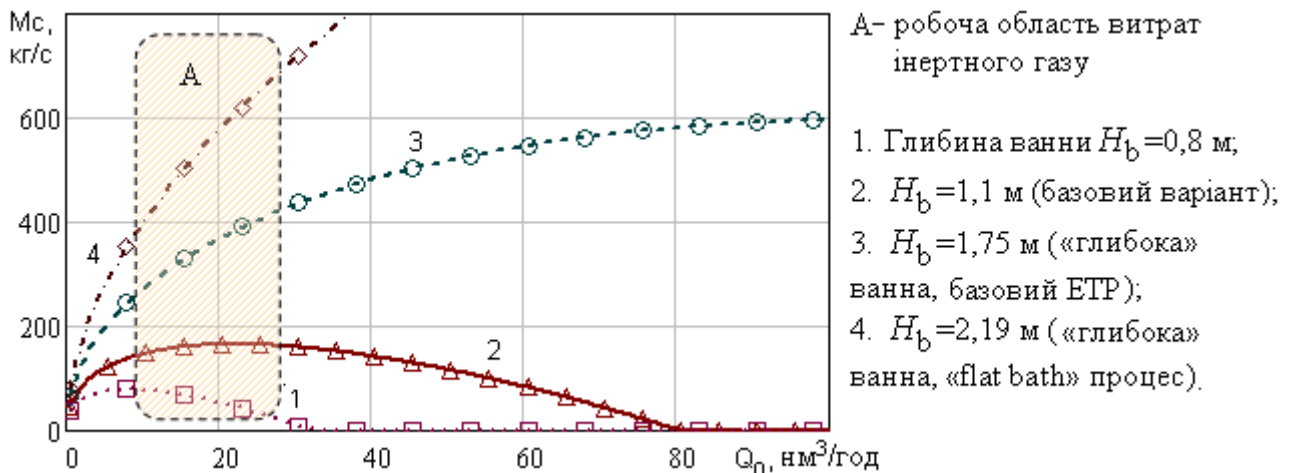


Рис. 8. Інтенсивність циркуляції металу M_c у ванні 120-т ДСП від витрати інертного газу Q_0 .

Екстремальний хід кривих обумовлено відомим з практики ефектом «пробою» ванни при критичній витраті газу, що полягає в зменшенні переносимої в двофазній області маси при збільшенні її газовмісту в закритичній області.

Чисельне моделювання динаміки нагріву сталеплавильної ванни дугами при пневматичному перемішуванні здійснено в пакеті «ANSYS CFX». Розглядали базову ($D_b / H_b = 5$) і «глибоку» ($D_b / H_b = 2,5$) ванни 120-т ДСП. Параметри і припущення: діаметр електродів 0,6 м, $D_p = 1,25$ м; шлак відсутній; три пористі пробки між електродами на окружності D_p ; глибина лунки дуги в ванні, 3І, мм (де І - струм дуги, кА). Застосовані керуючі рівняння, описані в Розділі 2. Граничні умови: вихідна температура ванни 1475 °С; температура поверхні лунки 2900 °С; на вільній поверхні – випроміню-

вання; на бічній поверхні—умови «прилипання» і конвекція в доквілля. На поверхні лунок—дотичні напруги, відповідні силі струму 60 кА, і умови «не прилипання»; на поверхні пористих пробок—загальна витрата аргону 0,4 кг/хв. В домені «ванна» задані теплофізичні характеристики сталі, як функції температури.

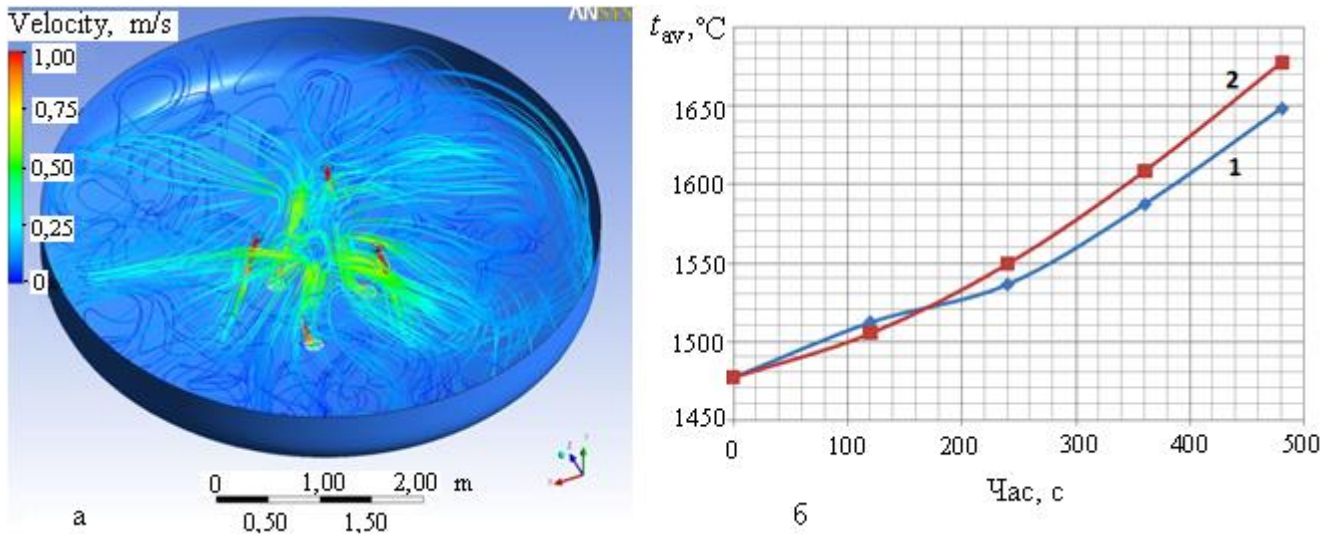


Рис. 9. Лінії струму в рідкій ванні (а). Зміна середньої температури t_{av} металу в часі (б) для базової (1) та «глибокої» (2) ванн.

Швидкість циркуляції металу в основному об'ємі ванни не перевищує 0,25 м/с, а над продувними вузлами сягає 0,5–0,75 м/с (рис. 9а), що узгоджується з іншими дослідженнями. Поведінка кривих нагрівання (рис. 9б) пояснюється впливом на ванну вільної конвекції від гарячих плям дуг і вимушеної конвекції, яка, при зростанні H_b , з плином часу стає визначальним фактором. Згідно з результатами, термін нагрівання ванни від 1500 до 1650 °С при зміні D_b / H_b від 5,0 до 2,5 скорочується на 12–16 %.

При дослідженні динаміки плавлення скрапу в ванні на основі (10), величину α_{con} , що входить в (8), визначали як середньозважену, враховуючи площу активних

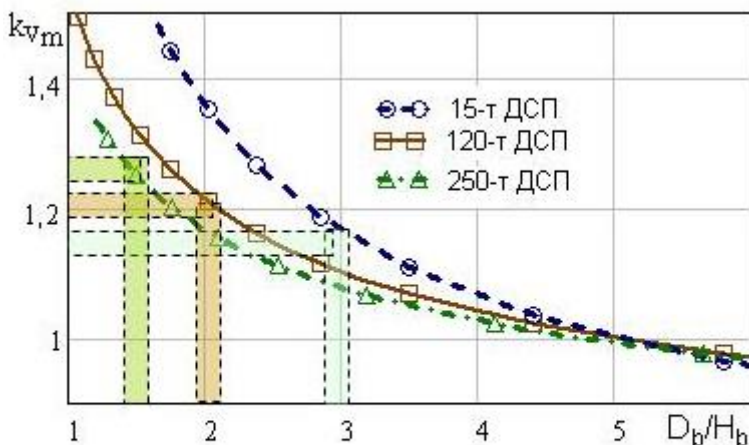


Рис. 10. Залежність відносної швидкості плавлення скрапу в ванні ДСП k_{vm} від D_b / H_b при $Q_0 = 5 \text{ нм}^3/\text{год}$.

плям радіусом r_{as} і поверхню периферії ванни (рис. 5), швидкість руху сталі, згідно з (4) і (5). Індекс динаміки плавлення скрапу k_{vm} є відношення зворотних величин τ_m при поточному та базовому D_b / H_b . Результати для середнього скрапу (рис. 10), свідчать, що продуктивність плавлення при «flat bath» процесі в «глибокій» ванні відносно базової зростає від 13 % в 15-т до 25 % в 250-т ДСП з урахуванням обмежень для D_b / H_b .

Розглянуто металургійні аспекти впливу D_b / H_b на процеси масообміну: кінетику дефосфорації та зневуглецелення, регламентовані технологією.

Внеском є урахування дефосфорації не тільки на активній та периферійній поверхнях метал-шлак, а й при русі крапель скрапу через шлак, що визначається коефіцієнтами масопереносу $\beta_{[P]1}, \beta_{[P]2}, \beta_{[P]3}$ (рис. 5). Частка крапельної дефосфорації зростає зі зменшенням D_b / H_b і досягає 6–7 % загальної. Кінетичні характеристики дефосфорації в «глибокій» ванні, незважаючи на зменшення площі поверхні шлаку, зростають на 3–25 % відносно базової ванни через більшу інтенсивність масообміну.

Кінетику зневуглецелення сталі на поверхні газових бульбашок, що впливають, досліджували на основі термодинаміки і дифузійної стехіометрії реакції $[C]+[O] = CO$ за даними Н. Schenk та ін. Показано, що в «глибокій» ванні, в порівнянні з базовою, ступінь зневуглецелення зростає на 5–18 % завдяки інтенсифікації масопереносу.

Чисельні дослідження теплообміну при плавленні шихти за (1,2) показали, що коефіцієнт енергоефективності дуги (КЕД) в окремому колодязі складає $\eta_{aw} = 0,92-0,94$, а в спільному колодязі знижується до $\eta_{aw}^* = 0,68-0,70$ з огляду на випереджальний ріст поверхні зводу при злитті колодязів F_2^* / F_2 (рис. 4б,в) і втрат теплоти з водою відносно поверхні стін колодязя F_1^* / F_1 і сприймання енергії шихтою. В режимі відкритого горіння дуг КЕД знижується до $\eta_{ao} = 0,44-0,50$.

На основі аналізу (3) з урахуванням КЕД показано, що оптимальний D_p зростає з $0,42D_f$ у 15-т до $0,49D_f$ у 250-т ДСП (рис. 11). Результатом зміни режиму плавлення при оптимізації D_p / D_f є економія електроенергії 2,5–7,5 % за плавку.

В крупних ДСП (≥ 100 т) більш енергоефективним рішенням є оптимізація D_p / D_f ; в печах малої місткості (15–20 т) має перевагу зменшення D_b / H_b .

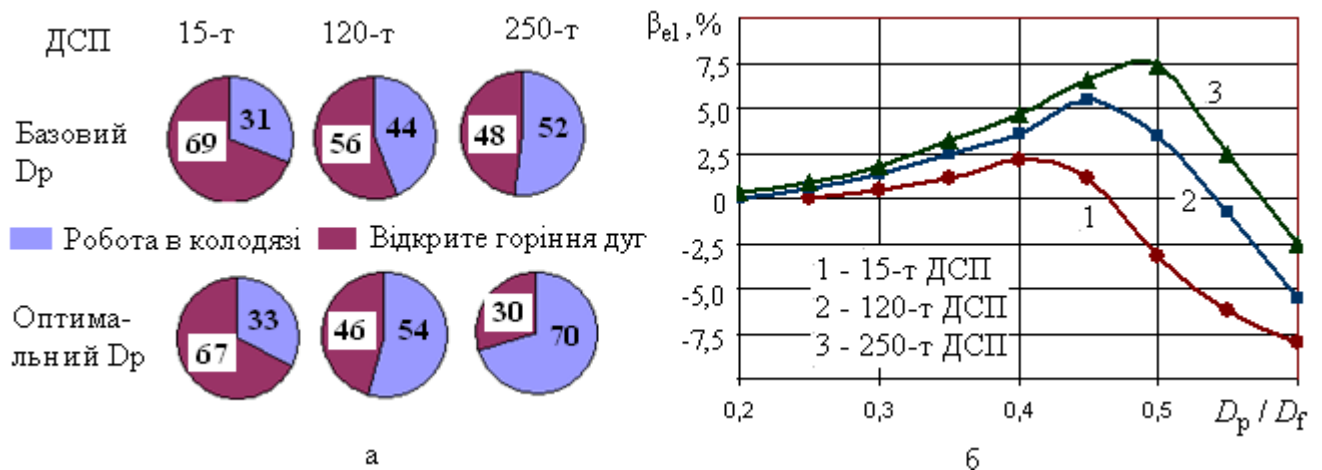


Рис. 11. Режими плавлення шихти (а) та економія електроенергії β_{el} в залежності від D_p / D_f (б)

Розділ 4. Розробка енергоефективних водоохолоджуваних елементів ДСП на основі дослідження теплового стану. На рис. 12 показано традиційні ВЕ з щільною структурою (а) та нові розробки ВЕ з просторовою структурою: зі зміщеними осями труб (б), двохрядні (в), з нещільною трубчастою структурою (г), кесонні з трубним захистом (д). Шар гарнісажу в цих ВЕ виконує важливі функції енергозбереження завдяки теплоаккумуляції і теплоізоляції.

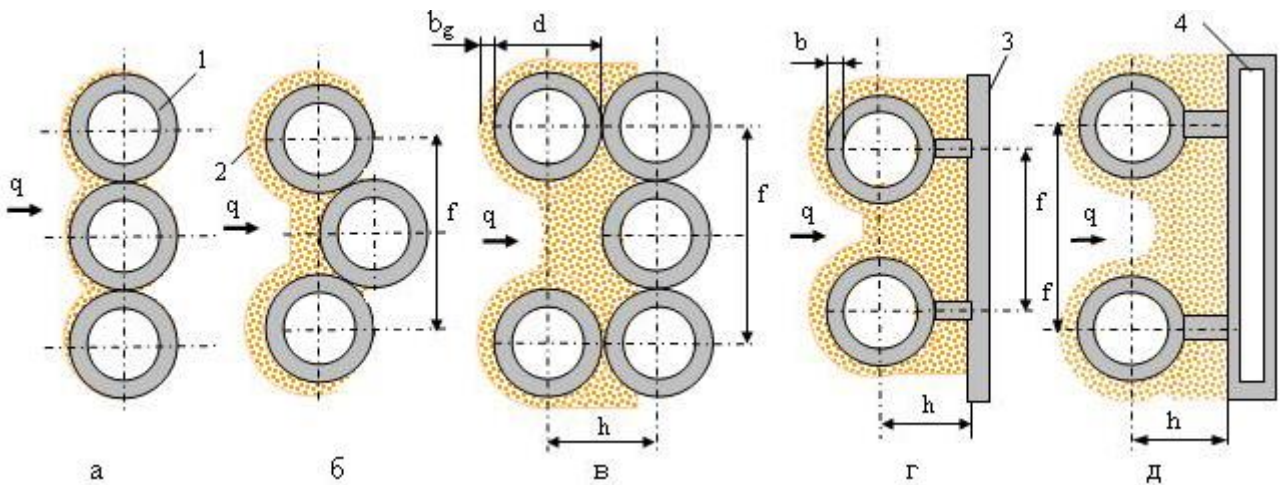


Рис. 12. Варіанти ВЕ ДСП. 1–трубчастий змійовик, 2–гарнісаж, 3–кожух печі, 4–кесон.

Стаціонарний теплообмін в системі робочий простір ДСП - трубчастий ВЕ, покритий рівноважним шаром гарнісажу, описується рівнянням:

$$q - (1 - \varepsilon_{wce}) \sigma T_1^4 - \frac{(T_1 - T_2)}{(b/\lambda + b_g/\lambda_g + 1/\alpha_w)} - \alpha_k (T_3 - T_0) = 0 \quad (11)$$

де q – тепловий потік на ВЕ; ε_{wce} – ступінь чорноти ВЕ; α_w, α_k – коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до води і в довкілля, відповідно; $b, \lambda, b_g, \lambda_g$ – товщини та теплопровідність гарнісажу і труби ВЕ, відповідно; T_1, T_2, T_3, T_0 – температура робочої поверхні ВЕ, води, зовнішньої поверхні і довкілля, відповідно.

Двовимірну задачу моделювали в пакеті ELCUT 6.2 методом кінцевих елементів. Граничними умовами і параметрами (рис. 13) в блоках Б1 (металоконструкції ВЕ), Б2 (гарнісаж) є теплопровідність; на гранях Г1 (робоча поверхня), Г2 (зовнішня поверхня), Г3 (охолоджувана поверхня) – температура, коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, ступінь чорноти. Варіювали параметр f при $d = 76, b = 10, h = 80$ мм (рис. 12).

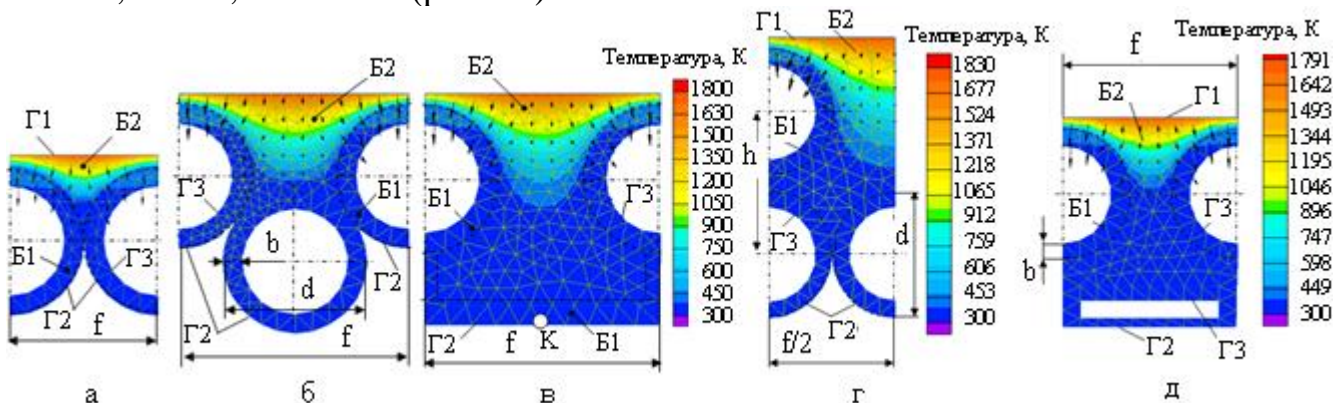


Рис. 13. Температурні поля традиційного ВЕ (а) і ВЕ з просторовою структурою (б – д). Позначення – в тексті і на рис. 12.

Температурні поля ВЕ за варіантами а-д (рис. 13) і отримані на основі досліджень інтегральних характеристик теплообміну на гранях Г3 втрати теплоти з водою свідчать, що стосовно ВЕ з просторовою структурою (б-д) ці втрати є на 20–35 % нижчі (табл. 2) в порівнянні з традиційними ВЕ (а).

Таблиця 2. Порівняльна характеристика водоохолоджуваних панелей

Параметр на 1м ² поверхні ВЕ, відносних одиниць	Значення параметру для панелей за варіантами «б-д», згідно з рис. 12, відносно традиційного варіанта «а»				
	а	б	в	г	д
Маса гарнісажу	1	1,25	2,30	2,20	2,20
Оптимальний f	$f = d$	$(1,6-1,8) d$	$(2,1-2,3) d$	$\sim 2 d$	$\sim 2 d$
Втрати теплоти	1	0,75	0,65	0,77	0,80
Маса панелі	1	1,08	1,52	0,73	1,45
Область застосування ВЕ	Всі ДСП	«велика» металургія	«велика» металургія	«мала» металургія	Спеціальні вузли ДСП

На основі уявлень про теплосприйняття трубчастою поверхнею ВЕ проведено оцінку теплового навантаження за (1) і термічних напружень в кришці 300-т УКП ПАТ «Алчевський меткомбінат» (рис. 14а). Згідно з оцінками за вдосконаленою методикою (крива I, рис. 14б), щільність теплового потоку q в розрахунковій

області на 12–55 % вище, ніж при використанні традиційної методики, що розглядає ВЕ як плоску поверхню (крива II). Невідповідність даних теплового навантаження веде до некоректної оцінки термічних напружень в ВЕ. Критерієм експлуатаційної надійності ВЕ є неперевищення еквівалентними напруженнями допустимих величин (рис. 14в). Крива I відображає залежність допустимих, криві 2,3 - еквівалентних напружень для труби із сталі 20 зі

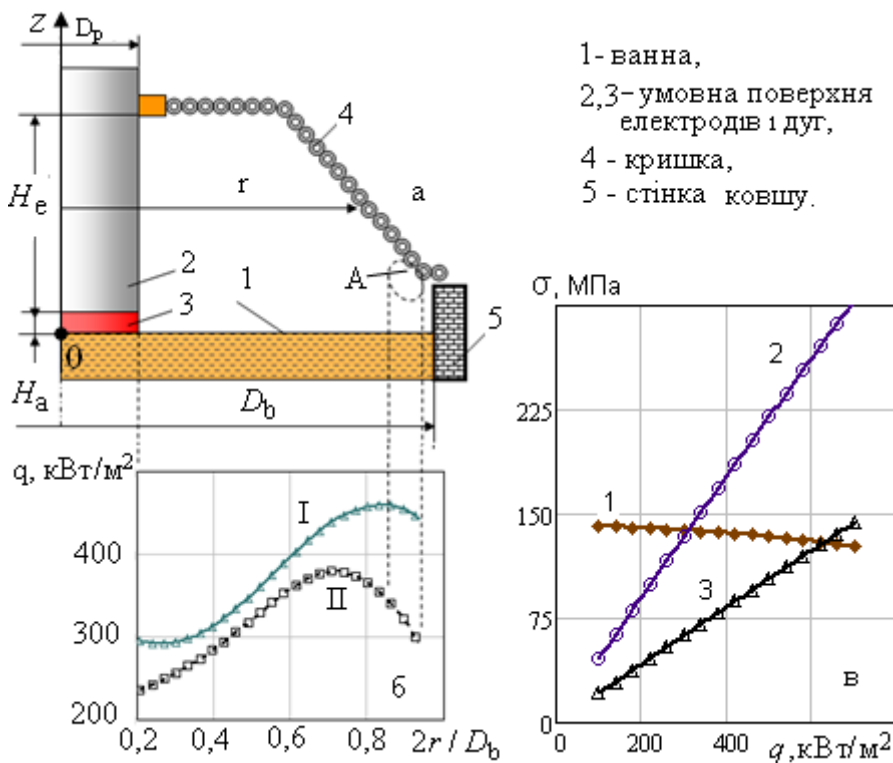


Рис. 14. Розрахункова схема (а), щільність теплового потоку q по відносному радіусу кришки УКП $2r/D_b$ (б), термічні напруження σ в ВЕ (в) в залежності від q .

стілкою товщиною $b = 12$ та $b = 6$ мм, відповідно, від теплового потоку. За

результатами розрахунків надано рекомендації щодо використання труби з меншою b в критичній по термічним напруженням зоні А. Розрахунок за традиційною методикою не виявляє позамежного теплового навантаження в критичній зоні, чим обумовлює проблеми експлуатації діючих ВЕ.

За допомогою розробленої методики показана можливість забезпечення робочих характеристик еркерної панелі ДСП при заміні, з метою здешевлення, мідної труби зі стінкою $b = 10$ мм сталевую (ст. 20К) зі стінкою $b = 6-8$ мм.

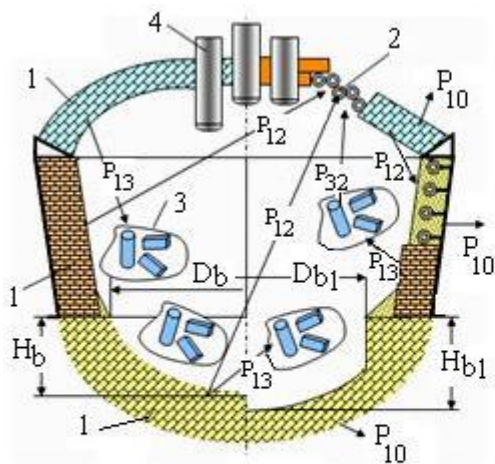
Для типової 3-т ДСП ливарного класу за допомогою математичної моделі енерговитрат досліджували енергоефективні рішення на основі комбінованих ВЕ з

урахуванням тривалості простоїв, акумуляції теплоти футерівкою, геометрії ванни, попереднього завантаження скрапу, типу і відносної площі ВЕ.

Зміна ентальпії Q огорожі робочого простору, що включає футерівку і ВЕ, під час простою печі тривалістю τ_{dt} описується наступним рівнянням (рис. 15а):

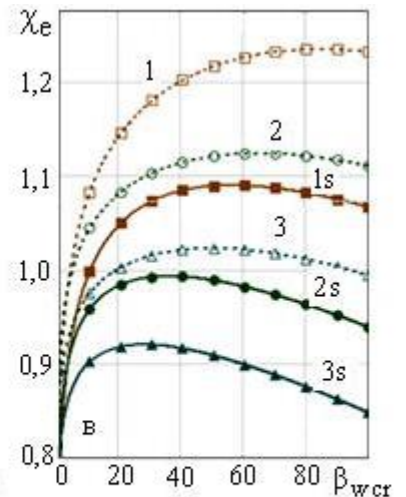
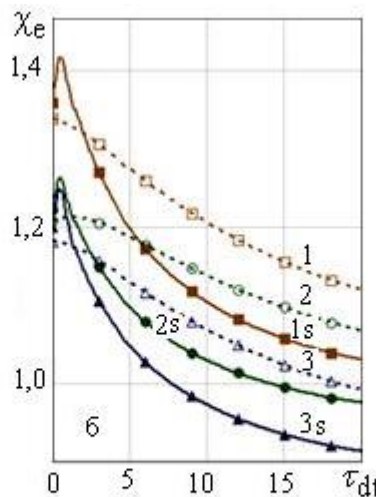
$$dQ / d\tau_{dt} = P_{10} + P_{12} + P_{13} \quad (12)$$

Потужність втрат теплоти зовнішньою поверхнею печі в довілля P_{10} включає радіаційну і конвективну складові. Часова залежність для коефіцієнту тепловіддачі отримана на основі експериментальних даних Г. Петрова стосовно зміни температури кожуху печі в часі. При оцінці потужності втрат теплоти внутрішньою поверхнею футерівки на ВЕ P_{12} і завантажений скрап P_{13} , брали до уваги тільки домінуючу радіаційну складову з урахуванням температур тіл, а також передачу скрапом, що нагрівається від футерівки, теплової потужності P_{32} на ВЕ. Це відбивається на процесі, описаному (12), через поточну температуру скрапу в процедурі розрахунку.



1-футерівка 2-ВЕ, 3-шихта,
4-електрод.

а



1-ВЕ з щільною структурою, 2- ВЕ з пористою структурою,
3-ВЕ з пористою структурою + «глибока» ванна,
Індекс 's' у кривих означає попередньо завантажений скрап.

Рис. 15. Схема теплообміну (а). Залежність енергоефективності ДСП χ_e від тривалості простоїв τ_{dt} , годин при $\beta_{wcr} = 0,16$ (б) та від β_{wcr} , % при $\tau_{dt} = 20$ годин (в).

Чисельним рішенням (12) одержані витрати енергії на акумуляцію теплоти огорожею робочого простору в залежності від τ_{dt} та відносної площі ВЕ зводу β_{wcr} при відносній площі ВЕ стін 0,4. В період роботи печі, з огляду на порівняльний характер задачі, ряд видаткових (втрати теплоти з ПГС, в довілля, в електромережі) і прибуткових (хімічна енергія) статей енергобалансу ДСП прийняті для варіантів однаковими. Енегобаланс плавки оцінювали згідно з Ю. Тулуєвським, І. Зінуровим, включаючи питому витрату енергії на нагрів, плавлення шихти, перегрів ванни, шлакоутворення і легування. Втрати теплоти з водою визначали за (2) з урахуванням геометрії ванни та каркасу і характеристик енергоефективності ВЕ (табл. 2).

Оцінки енергоефективності ДСП χ_e , як відношення питомих витрат енергії на плавку в печі з футерівкою і в печі з комбінованими ВЕ, в т.ч., з «глибокою» ванною

(рис. 15б,в) показують, що збільшення тривалості добових простоїв ≥ 20 годин робить енергоефективною часткову заміну футерівки ВЕ з просторовою структурою. Величина $\beta_{\text{вср}}$, що забезпечує рівну з футерівкою питому витрату енергії, становить 15–20 % при зменшенні споживання вогнетривів в 1,4–2,5 рази. Попереднє завантаження скрапу підвищує ефективність комбінованих ВЕ стосовно збільшення відносної площі водоохолодження та зменшення порогу тривалості простоїв до 10–15 годин, а спільно з «глибокою» ванною до 7–8 годин.

Специфіка теплового навантаження на ВЕ, переважно в області аспіраційного каналу ДСП, полягає в урахуванні конвективної і конденсаційної складових в методиці розрахунку ВЕ. Перша пов'язана з рухом ПГС, друга – з конденсацією парів заліза, що виникають в дугових плямах. Показано, що в сумі ці складові досягають в ДСП 31–37% теплового потоку випромінювання. Інтенсифікація теплообміну в «глибокій» ванні сприяє зменшенню втрат заліза при випаровуванні на 10–12%.

Розділ 5. Розробка енергоефективної системи аспірації ДСП на основі досліджень гідромеханіки пилогазового середовища в робочому просторі. З огляду на недоліки традиційної системи газовидалення (рис. 16а), запропоновано системи розосередженої (рис. 16б) і розподіленої (рис. 16в) аспірації. У них реалізовані принципи збільшення та розосередження аспіраційної поверхні і наближення її до зони електродних кільцевих зазорів. В зводі 2 в області проходу в піч електродів 3 виконана верхня камера 4 з газовідвідним патрубком 5. В системі розосередженої аспірації патрубок 5 з'єднаний каналом 6 із периферією підзводного простору. В системі розподіленої аспірації верхня камера забезпечена кільцевим витяжним газоходом 7 зі змінною по периметру площею аспіраційних щілин 8.

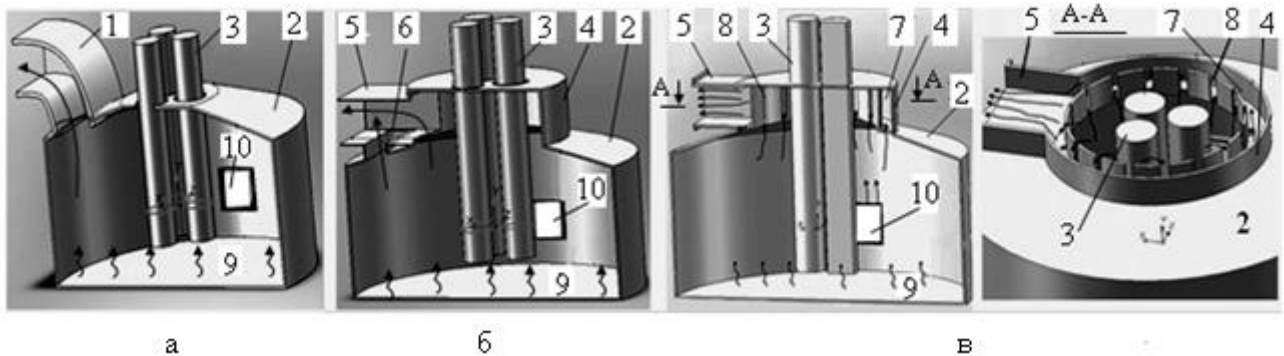


Рис. 16. Схеми традиційної системи аспірації (а) і запропонованих систем розосередженої (б) та розподіленої (в) аспірації. Позначення – в тексті.

На основі рівняння Бернуллі отримано співвідношення для розрахунку площі щілин, що лежить в основі моделі та методики розрахунку витяжного газоходу:

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i / \sqrt{1 + \frac{\mu^2 \sigma_i^2}{S^2} \left(2i + 1 + i^2 \left(\frac{\lambda S_1}{4S} + \zeta_\alpha \right) \right)} \quad (13)$$

де σ_i – площа аспіраційної щілини, S – площа поперечного перерізу газохода; S_1 – площа бокової поверхні секції газоходу між щілинами; λ – коефіцієнт опору тертя; ζ_α – коефіцієнт опору руху потоку між щілинами; μ – коефіцієнт витрати газу.

Реалізація системи аспірації спрямована на зниження швидкості та можливостей газового потоку по виносу пилу з ванни 9 і притоку повітря через робоче вікно 10.

Для перевірки адекватності моделі проведено дослідження на фізичній моделі лінійного газоходу розмірами 1 x 0,25 x 0,05 м з 4 щілинами площа яких, згідно з (13), зменшується в напрямку торця, через який з постійною витратою відкачували повітря (інший торець закрито). У щілинах швидкість повітря вимірювали термоанемометром і усереднювали. Експеримент показав відхилення відносної витрати по щілинах 15–18 %, що є прийнятним для інженерного розрахунку системи аспірації.

Чисельне моделювання систем аспірації проводили в пакеті «Cosmos FloWorks» методом кінцевих об'ємів для умов 120-т ДСП з базовим ЕТР «великої» металургії. Враховували теплову конвекцію, вводили умовну камеру над піччю, в яку надходять неорганізовані викиди через електродні зазори, подрібнювали розрахункову сітку в вузьких каналах, задавали поле сили тяжіння.

Особливості граничних умов. У період плавлення на умовній поверхні дна колодязя, що проплавляється в шихті, витрата газу 4,5 кг/с, температура 1823 К і нормальний тиск. Параметри забезпечуються 30-МВт ПКП, окисленням вуглецю і органіки шихти. У період нагріву на поверхні ванни витрата газу 2,5 кг/с, температура 1873 К і нормальний тиск. Параметри відповідають витраті кисню на фурмі 7000 м³/год. У вихідному перерізі газовідвідного патрубку та в умовній камері розрідження $\Delta p = 10\text{--}50$ Па і температура газу 1273 К. Ширина кільцевих електродних зазорів $b = 30\text{--}70$ мм відповідно практиці зносу вогнетривкої вставки.

На отримані поля швидкостей накладали потік частинок плавильного пилу (опція «particle study»), що генерується в період плавлення дном колодязя, а в період нагріву – поверхнею ванни. Емісія пилу і середній розмір частинок: 0,2 кг/с і 100 мкм в період плавлення та 0,04 кг/с і 10 мкм в період нагріву; щільність частинок 3 г/см³, згідно з даними А. Guézennec та ін. Число умовних частинок пилу прийнято 100, їх швидкість і температура «прив'язані» до параметрів потоку.

Загальна картина газодинаміки (рис. 17) свідчить про більш ефективну локалізацію неорганізованих викидів при розосередженій аспірації. Це видно за кількістю треків частинок пилу через електродні зазори в умовну камеру.

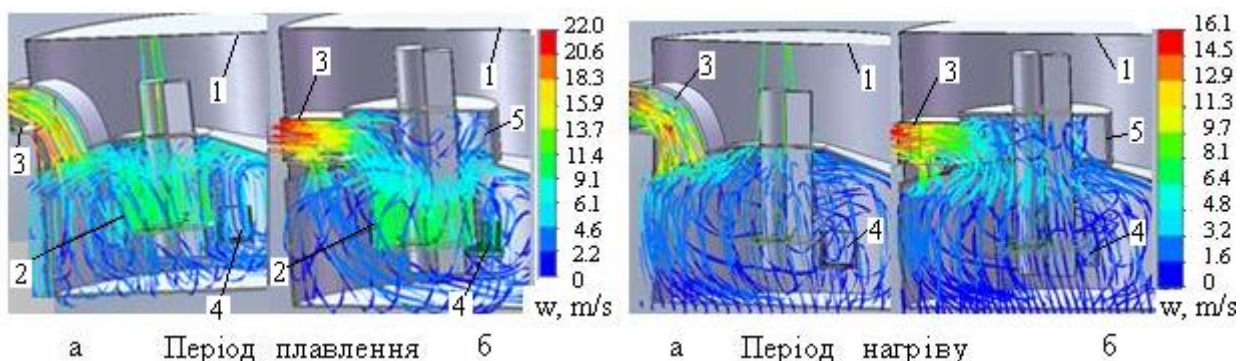


Рис. 17. Поля швидкостей ПГС (w) і треки частинок пилу при традиційній (а) і розосередженій (б) системі аспірації. $\Delta p = 20$ Па, $b = 30$ мм. 1– умовна камера, 2 – колодязь, 3– газовідвідний патрубок, 4– робоче вікно, 5 – верхня камера.

Інтегральні показники пилогазових потоків (рис. 18) свідчать, що відносні величини притоку повітря в піч, неорганізованих викидів та виносу плавильного

пилу через електродні зазори в системі розосередженої аспірації (при типових $\Delta p = 30$ Па, $b = 40$ мм) знижуються в середньому на 10, 40 і 30 % відповідно. У найбільш енергоємний період плавлення переваги системи розосередженої аспірації проявляються в більшій мірі, ніж в період нагріву та ростуть зі зменшенням Δp і b , тобто при прагненні до енергоекономних режимів печі.

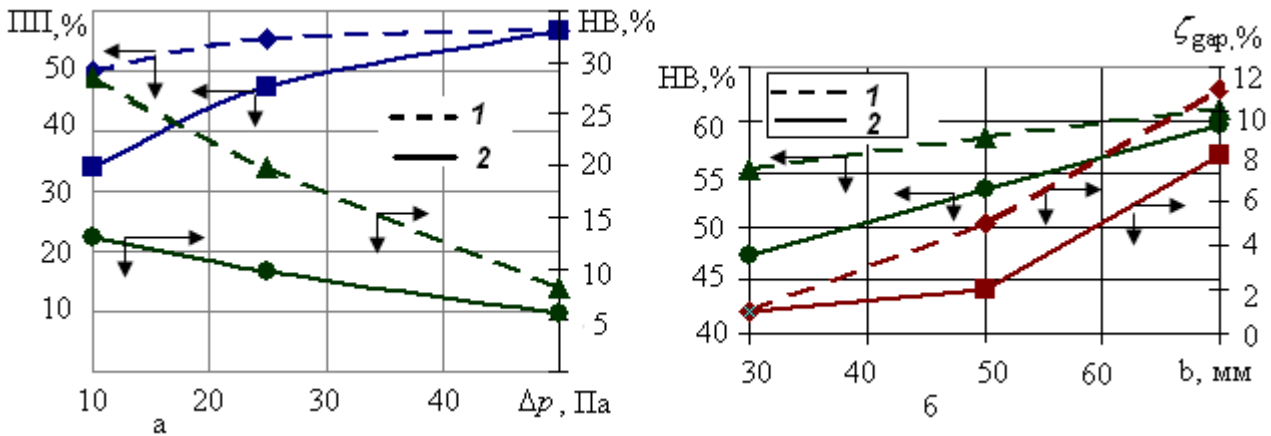
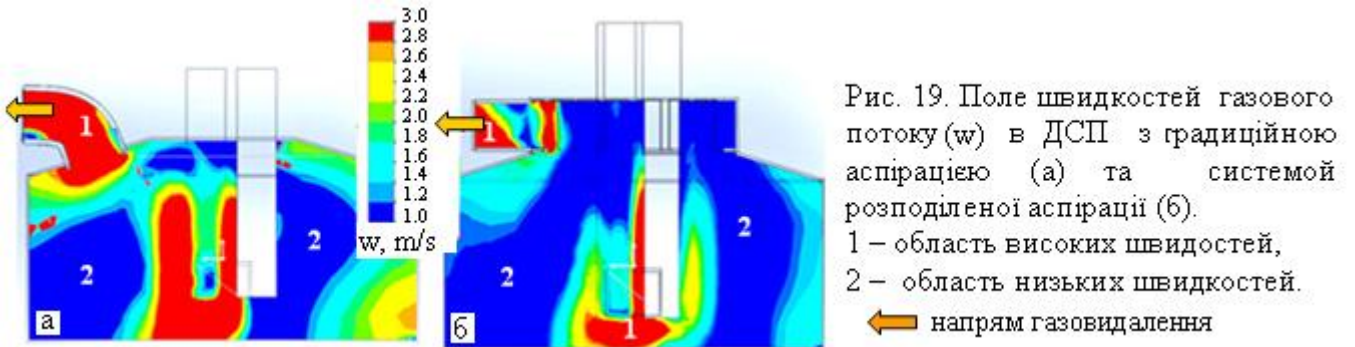


Рис. 18. Вплив розрідження в печі Δp (а) і ширини зазорів b (б) на показники традиційної (1) і розосередженої (2) аспірації: частка неорганізованих викидів НВ та притоку повітря в піч ПП від емісії через газовідвідний патрубок; частка виносу плавильного пилу в електродні зазори ζ_{gap} .

Чисельне моделювання системи розподіленої аспірації (рис. 16в) здійснено для 120-т ДСП з параметрами і граничними умовами, прийнятими раніше за винятком більшого $\Delta p = 50-75$ Па в зв'язку з підвищеним гідравлічним опором витяжного газоходу. На рис. 19 представлені поля швидкостей для традиційної системи газовидалення і системи розподіленої аспірації в переважному інтервалі швидкостей до 3 м/с. Спостерігається більш рівномірний і менш інтенсивний рух ПГС, обумовлений збільшенням аспіраційної поверхні в 1,7 рази та її розосередженням.



Система розподіленої аспірації забезпечує зниження неорганізованих викидів через електродні зазори на 19 %, припливу холодного атмосферного повітря в піч на 24 %, загального виходу ПГС з печі на 7 %, виносу плавильного пилу на 33 %.

Розосереджена аспірація ефективна при $\Delta p = 10-30$ Па, тоді як система розподіленої аспірації - при $\Delta p \geq 50$ Па і, тому, доцільна, переважно, у надпотужних ДСП, де актуальною є локалізація неорганізованих викидів.

Виконано чисельне моделювання розосередженої аспірації для електропечей ливарного класу, ДСП, що працює «flat bath» процесом з використанням потужних ПКП для попереднього нагріву скрапу (FAF), та УКП.

В печах ливарного класу показана можливість зниження неорганізованих пилогазових викидів в електродні зазори в 1,7–2 рази, притоку повітря на 15 % і виносу плавильного пилу із печі на 20 %.

В умовах «flat bath» процесу в FAF досягається зменшення неорганізованих викидів на 18 %; припливу повітря на 26 %; емісії плавильного пилу на 30 %.

В УКП рівень неорганізованих викидів знижується більш ніж в 2 рази; емісія плавильного пилу - на 33 %.

Зменшення припливу повітря в піч при використанні запропонованих систем аспірації сприяє зниженню емісії CO_2 та NO_x з ДСП в атмосферу.

Розділ 6. Розвиток енегоекотичної концепції утилізації пилогазового середовища ДСП. Для реалізації концепції розроблено наукові основи чотирьох технологічних рішень: середньотемпературний попередній нагрів (ПН) скрапу газами, що відходять із ДСП; електросталеплавильний процес з альтернативним енергозабезпеченням шляхом термохімічної регенерації (ТХР) природного газу у відхідних газах ДСП; вуглецевотермічний плавильно-відновний процес (ПВП) рециклінгу залізовмісних відходів в електропечі з подовими електродами; камера допалювання і первинного знепилення (КДПЗ) ДСП малої місткості.

Середньотемпературний ПН скрапу до $450\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 20) є перспективним напрямком енергозбереження, оскільки не пов'язаний з емісією PCDD/F, як при традиційному ПН ($700\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$), і суттєвими витратами на нейтралізацію токсинів.

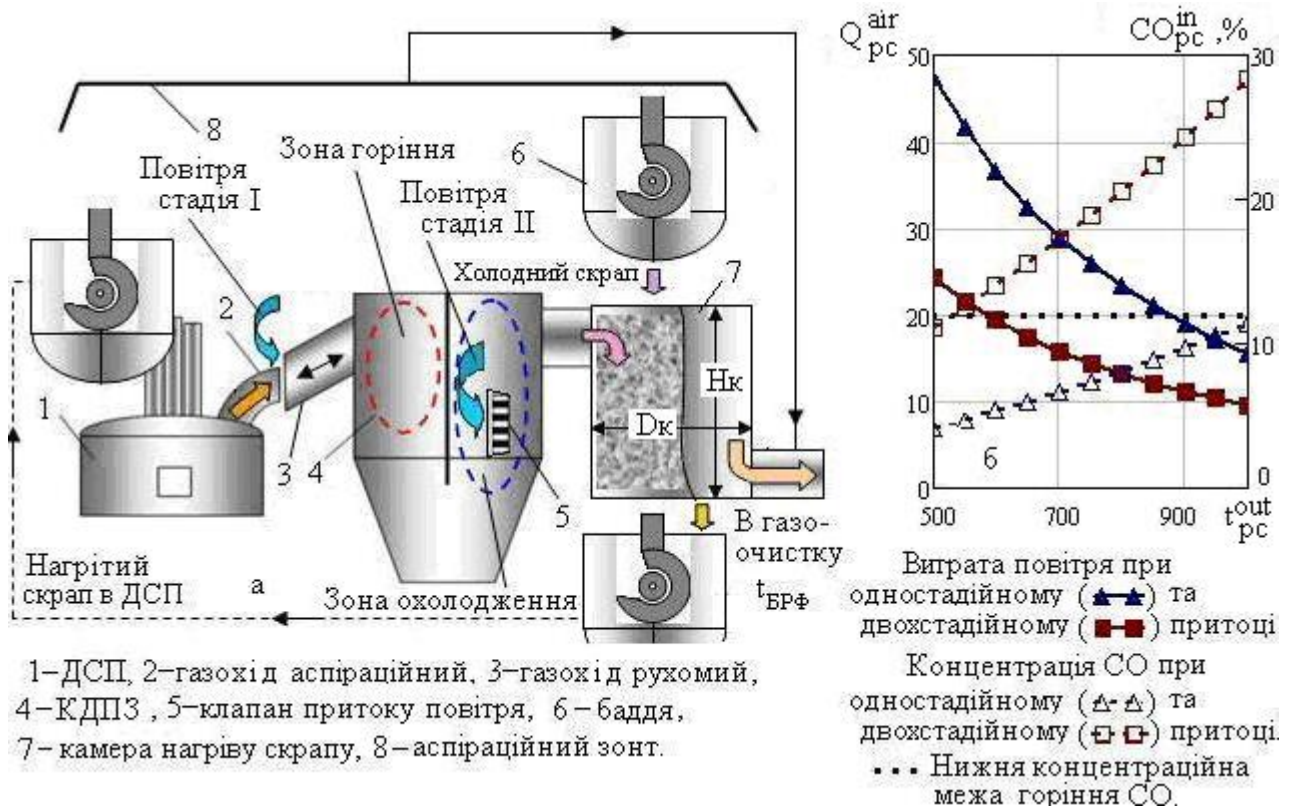


Рис. 20. Організація нагріву скрапу та допалення CO (а). Витрата повітря Q_{pc}^{air} , $\text{нм}^3/\text{с}$ і концентрація CO_{pc}^{in} перед КДПЗ, % в залежності від температури газа на виході з КДПЗ t_{pc}^{out} в умовах одно- та двохстадійного притоку повітря (б).

Режим роботи КДПЗ типової ДСП міні-заводу з одностадійним притоком повітря (рис. 20а) не дозволяє поєднати середньотемпературний ПН скрапу та ГДК CO (0,02 %) і не забезпечує умов експлуатації блоку рукавних фільтрів (БРФ) по температурі. Ситуація пояснюється рис. 20б. З урахуванням витрати, складу, температури відхідних газів ДСП і теплоти реакції допалення CO, витрата повітря Q_{PC}^{air} для отримання на виході з КДПЗ газу з температурою ≤ 500 °C на порядок перевищує стехіометричну, що знижує вміст CO в КДПЗ CO_{PC}^{in} до рівня нижче концентраційної межі горіння.

Завдання вирішуються при двостадійному притоці повітря в КДПЗ: для допалення CO в зоні стабільного стехіометричного горіння, і для нормалізації температури газу в зоні охолодження перед використанням як теплоносія для ПН скрапу. Співвідношення витрат повітря на стадіях I та II складає 1 до 3,5, що забезпечує отримання теплоносія для попереднього нагріву скрапу без утворення PCDD/F, досягнення ГДК CO і прийнятний температурний режим БРФ.

Кінетика нагріву скрапу в потоці газу, згідно (11), визначається об'ємним коефіцієнтом теплопередачі, що входить до складу критеріїв висоти шару та часу нагріву і враховує внутрішній тепловий опір шихти насипною щільністю ρ_b . За умов 50-т ДСП, емісія ПГС та двостадійний приток повітря дає витрату газу на ПН скрапу $Q_g = 86$ м³/с при температурі 500 °C. Результат показано на рис. 21 за умов геометрії камери нагріву $D_K / H_K = 1$ (рис. 20).

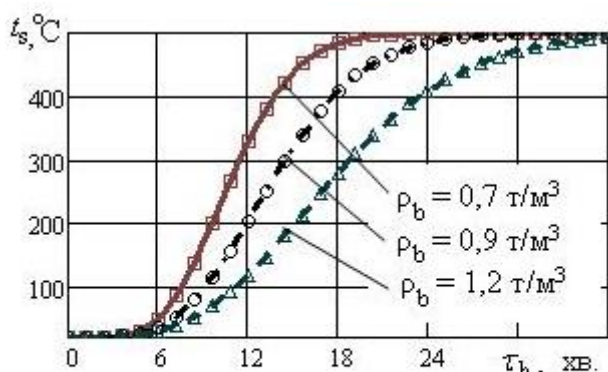


Рис. 21. Залежність середньої температури скрапу t_s від терміну нагрівання τ_h та насипної щільності скрапу ρ_b .

Згідно з розрахунками, при використанні середнього скрапу ($\rho_b = 0,9$ т/м³) в циклі плавки (45–50 хв.) існує можливість нагрівання половини вихідної шихти (з урахуванням витратного коефіцієнту) до температури 450 °C за 22–25 хв. Час нагріву скрапу узгоджується з тривалістю періоду нагріву рідкої ванни, який характеризується відносно стабільним складом і максимальною температурою ПГС. Легковаговий скрап нагрівається швидше; зменшення D_K / H_K в межах від 1,5–2,0 до 0,7 сприяє зменшенню часу нагріву.

ТХР полягає в проведенні спільної вуглекислотної і пароводяної конверсії природного газу (ПГ), в якому ≥ 95 % CH_4 , за рахунок використання ентальпії газів, що відходять з ДСП з температурою 1200–1600 °C по реакції: $2CH_4 + CO_2 + H_2O = 3CO + 5H_2$. Спалювання синтез-газу (СГ) в ПКП протікає по реакції: $CO + H_2 + O_2 = CO_2 + H_2O$, яка постачає реагенти для ТХР. Калорійність СГ вище, ніж ПГ в 1,3 рази, що відкриває можливості економії палива. Умовою ефективності ТХР є стабільний в часі склад і температура ПГС, що реалізується при «flat bath» процесі, зокрема «Consteel». Проведено оцінки енергетичного балансу ТХР в 120-т ДСП з концепцією FAF і технологією «Consteel» продуктивністю 1,2 млн. т на рік. Необхідна

потужність ПКП 30 МВт при ККД =0,6 забезпечується витратою СГ, що містить 60–65 % азоту, 18–20 % СО, 15–17 % Н₂, в обсязі 24000 нм³/год. Виробництво СГ потребує рециклінгу частки (18–25 %) знепиленого відхідного газу ДСП. Температура ПГС з урахуванням енергії допалення СО становить 1435 °С, що забезпечує тепловий баланс реформера, включно з втратами теплоти в КДПЗ і випаровування вологи ПГС.

Оцінка збільшення теплового ККД печі при використанні ТХР дана виходячи з того, що ПКП покриває 20–25 % потрібної енергії на проведення плавки за рахунок ПН скрапу, з урахуванням теплових втрат печі, і становить 5–6 %. Економія вихідного ПГ очікується 21 %, що призводить до зниження емісії СО₂ на 9,8 %.

ПВП спрямований на утилізацію плавильного пилу ДСП і інших залізовмісних техногенних відходів. Процес рідкофазний, вуглецевотермічний. Енергія для плавлення і відновлення оксидів заліза виділяється в шлаковій ванні при проходженні електричного струму, що вводиться через два подових електроди (ПЕ). Рідкий метал (чавун) та шлак періодично випускають з горну.

Виконано чисельне моделювання теплового стану шлакової ванни шляхом вирішення сполученої задачі розтікання електричного струму і виділення теплоти Джоуля в ванні. Для оцінки конвективної складової теплопереносу застосовано ефективний коефіцієнт теплопровідності шлаку $\lambda_{\text{eff}} = \chi_{\text{con}} \lambda$ з множником χ_{con} до стаціонарної теплопровідності λ , який, згідно з С. Кутателадзе, становить:

$$\chi_{\text{con}} = 0,18(\text{Pr} \cdot \text{Gr})^{0,25} \quad (14)$$

де $\text{Pr} = \rho C \nu / \lambda$, $\text{Gr} = \beta g L^3 \Delta t / \nu^2$ – числа Прандтля і Грасгофа в рідкій ванні, L – характерний розмір, g – прискорення сили тяжіння, Δt – перепад температури в об'ємі фази; ρ, C, ν, β – щільність, теплоємність, кінематична в'язкість, коефіцієнт термічного розширення середовища рідкої ванни, відповідно.

Завдання в двовимірній постановці вирішували в пакеті ELCUT 6.2 методом кінцевих елементів. Керуючі рівняння охарактеризовані в Розділі 2. Граничними умовами і параметрами (рис. 22) в блоках Б1 (ванна металу), Б2 (ванна шлаку) Б3 (ПЕ) є ефективна теплопровідність, електропровідність, коефіцієнт термічного розширення, кінематична в'язкість; на гранях Г1 (поверхня ванни), Г2 (поверхня, що охолоджується), Г3 (зовнішня поверхня) – температура, коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, постійна Стефана-Больцмана, ступінь чорноти. Розміри розрахункової моделі: довжина і висота шлакової та металеві ванн 1 x 0,1 м і 0,4 x 0,24 м, відповідно. Поле температур, з урахуванням симетрії ванни, показано на рис. 22а,б.

Для отримання рідкого металізованого продукту в горні в умовах нагріву зверху і тепловідведення знизу встановлено необхідність реалізації конвективної теплопередачі з множником, що враховує вплив конвекції в теплогенеруючій шлаковій ванні, при коефіцієнті стаціонарної теплопровідності не менше 2,7 (рис. 22в). Режим забезпечується перемішуванням ванни.

Випробування ПВП на 200-кг пілотній установці електропечі з ПЕ показало його працездатність: вихід придатного становить 71–94 % при витраті електроенергії 2,12–2,29 кВт/кг продукту, і конкурентоспроможність з кращими закордонними аналогами «ІТmk3» (Японія, США) і «ОхуСур» (ФРН).

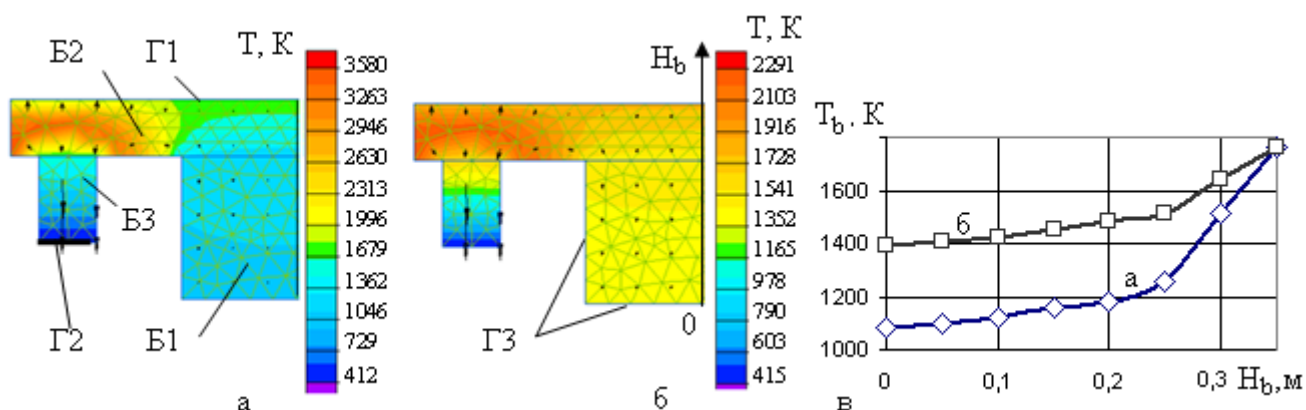


Рис. 22. Температурне поле в ванні ПВП без перемішування (а) та з перемішуванням (б).
Розподіл температури T_b по глибині ванни H_b (в) для випадків а, б.

Камера первинного знепилення призначена для ДСП малої місткості, в т.ч. з системою розосередженої аспірації. Камера забезпечує допалення СО до ГДК і осадження до 90–92 % важких частинок пилу, згідно з чисельним дослідженням руху ПГС, проведеному в пакеті «CosmosFloWorks» за методикою, описаною в Розділі 5. Пристрій знижує навантаження на блок рукавних фільтрів і є компактним, що важливо в умовах обмеженого простору сталеливарних цехів.

Розділ 7. Підвищення енергоефективності ДСПС на основі досліджень електровихрових течій в ванні і теплопередачі. Здійснено оцінку потужності перемішування при електровихрових течіях (ЕВТ) N_{evf} , що визначає інтенсивність процесів тепломасообміну в ванні глибиною H_b і, відповідно, продуктивність ДСПС. Шляхом чисельного моделювання двовимірної задачі стаціонарної електропровідності в пакеті прикладних програм ELCUT 6.2 методом кінцевих елементів досліджували розтікання струму у ванні промислової ДСПС місткістю 12 т. За щільністю струму \bar{j} , усередненою в активному об'ємі ванни V_{ab} (в його межах j зменшується не більше, ніж в $e = 2,71$ рази) з використанням положень електродинаміки, розраховували N_{evf} , як добуток об'ємної електромагнітної сили, активного об'єму і середньої швидкості ЕВТ, що, згідно з В. Боярєвичем та ін., дорівнює: $u_{evf} = \bar{j} H_b \sqrt{\mu_0 / \rho}$, віднесений до маси металу M .

$$N_{evf} = \bar{j}^3 R_{ab}^3 H_b^2 \pi \mu_0^{1,5} / (2\rho^{0,5} M) \quad (15)$$

де ρ – щільність рідкої сталі; R_{ab} – радіус активного об'єму ванни; μ_0 – магнітна стала.

Граничними умовами і параметрами (рис. 23) в блоках Б1 (верхній електрод), Б2 (дуга), Б3 (шлакова ванна), Б4 (сталева ванна), Б5 (ПЕ) є електропровідність; на гранях Г1 (катод), Г2 (анод) – різниця потенціалів ± 150 В для печі ливарного класу.

Досліджували N_{evf} в печі з базовою ($D_b = 2,3$; $H_b = 0,60$ м) і «глибокою» ванною ($D_b = 1,8$; $H_b = 1,0$ м), з ПЕ стрижневого типу діаметром $d_{beb} = 0,20$ м (варіанти: а – один ПЕ по центру ванни, б – два ПЕ з інтервалом $L = (0 - 0,75)D_b$, г – один ПЕ зі зміщенням від осі ванни $B = L/2$) і з ПЕ пластинчастого типу діаметром $d_{ber} = (0,5 - 0,75)D_b$. Поле щільності струму в базовій ванні показано на рис. 23.

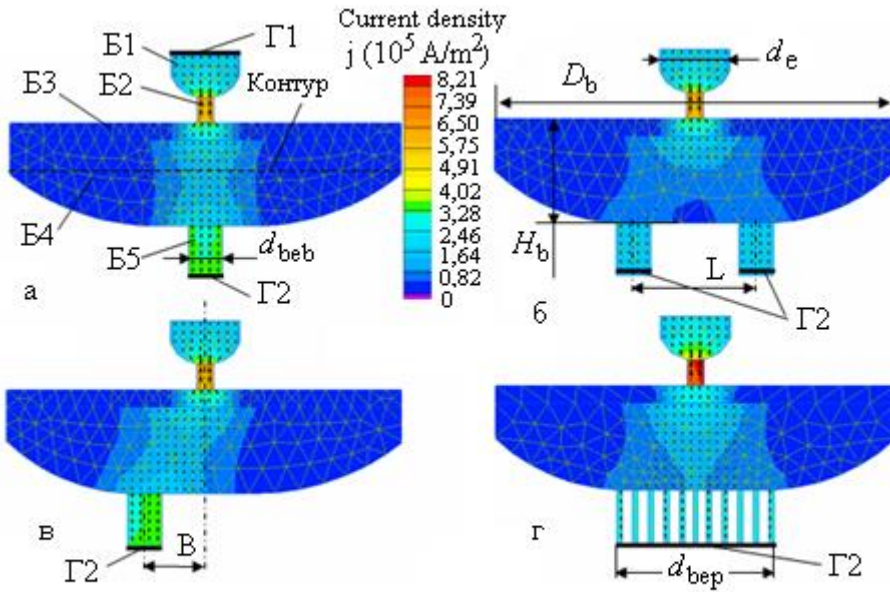


Рис. 23. Поле щільності електричного струму в ванні 12-т ДСППС. Позначення в тексті.

Оцінки N_{evf} для варіантів ПЕ а-г в «глибокій» ванні збільшуються в 1,3–8,4 рази в порівнянні з базовою ванною. Згідно з даними Розділів 2,3, це призводить до скорочення періоду доведення сталі, оскільки він лімітується процесами усереднення ванни за температурою і хімічним складом, в середньому в 1,5–1,7 рази. З огляду на частку періоду доведення

в загальній тривалості плавки 25–30 %, середнє скорочення терміну плавки складатиме 9 %, а економія електроенергії, 77 кВтг/т.

Стійкість ПЕ в ДСППС «великої» металургії при загальній потужності теплового навантаження $N_{be} = N_b + N_j$ (де N_b, N_j компоненти навантаження від ванни і теплоти Джоуля), що проходить через перетин F_{be} електроду, визначається залишковою рівноважною товщиною твердої сталеві частини b_s (рис. 24а).

$$b_s = \left[\left[(t_c - \bar{t}_w) / (N_{be} / F_{be}) \right] - (1 / \alpha_b) + (b_t / \lambda_t) + (b_c / \lambda_c) + (1 / \alpha_w) \right] \lambda_s \quad (16)$$

де $b_t, \lambda_t, b_c, \lambda_c$ – розмір та коефіцієнт теплопровідності перехідної зони і мідної частини, відповідно; λ_s – коефіцієнт теплопровідності твердої сталеві частини; α_b, α_w – коефіцієнти тепловіддачі «ванна – ПЕ» та «стінка ПЕ – вода», відповідно.

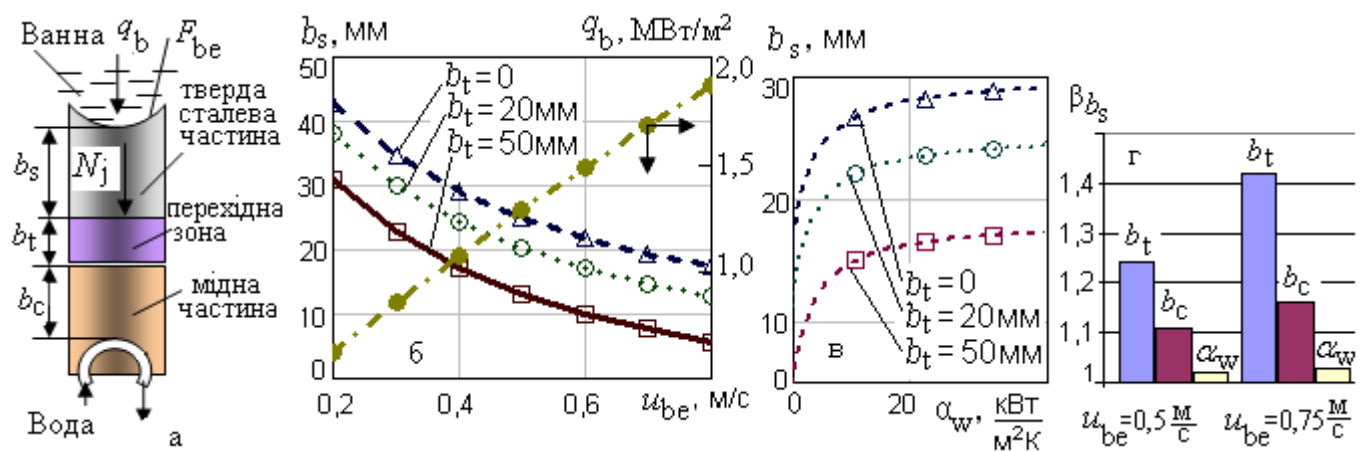


Рис. 24. Схема біметалевого ПЕ стрижневого типу (а). Залежність товщини b_s : від швидкості ЕВТ u_{be} при $b_c = 50$ мм, $\alpha_w = 30$ кВт/(м²К) (б); від α_w при $b_c = 50$ мм, $u_{be} = 0,5$ м/с і варіюванні b_t (в). Відносна (β_{b_s}) зміна b_s при зниженні b_t, b_c і α_w вдвічі (г).

Залежність щільності теплового потоку із ванни q_b від швидкості ЕВТ в зоні установки ПЕ u_{be} приведена на рис. 24б. Внесок теплового потоку Джоуля q_j в загальне теплове навантаження на ПЕ, в залежності від u_{be} , становить 12–22 %, падає з ростом u_{be} і є більш вагомим у потужних печах. В сумі q_b і q_j сягає 1–2 МВт/м².

Величина b_s падає зі збільшенням швидкості ЕВТ u_{be} , і при $u_{be} \geq 0,5$ м/с режим роботи ПЕ стає нестабільним (рис. 24б). Підвищення інтенсивності охолодження ПЕ в області, суттєвої для практики: $\alpha_w \geq 20$ кВт/(м²К), що визначаються верхньою межею експлуатаційної температури міді $t_c^* = 260$ °С, при характерній довжині мідної частини ПЕ до водяного каналу $b_c = 45$ –50 мм, практично не впливає на b_s (рис. 24в). Визначальний вплив на товщину b_s має ширина перехідної зони b_t (її тепловий опір), причому роль b_t зростає зі збільшенням інтенсивності руху металу u_{be} (рис. 24г).

Для оцінки локальної u_{be} проведено чисельне тривимірне моделювання ЕВТ, гідродинаміки і теплообміну ванни надпотужної 420-т ДСППС в пакеті «ANSYS CFX» із залученням керуючих рівнянь, описаних в Розділі 2. Процедура включала два етапи: отримання поля ЕВТ і об'ємної електромагнітної сили (модуль EMag) та моделювання гідродинамічних і теплових процесів з урахуванням ЕВТ.

В домені «ванна» задані щільність, в'язкість, тепло- і електропровідність, теплоємність сталі, як функції температури; на поверхнях 4-х ПЕ (аноде) і 2-х лунок під електродами (катоди) прикладена напруга 600 В; на поверхнях стиків мідь-сталь ПЕ задано робочу температуру 800 К; на поверхні ванни, що випромінює - температура 1825 К і ступінь чорноти 0,7.

Результати моделювання свідчать, що в ванні по осях ПЕ і в анодних ямах спостерігається максимальна локальна швидкість ЕВТ 0,75 м/с (рис. 25). Рівноважні характеристики двофазної сталеві частини ПЕ (рис. 26) підтверджують критичність умов роботи ПЕ за товщиною твердої сталеві частини b_s (рис. 24), що становить ≤ 50 мм. Одержані характеристики відповідають даним X. Liu, J. Zhou, H. Shi та ін. стосовно теплового стану ПЕ в 150-т ДСППС. Дослідження показали актуальність технології виготовлення ПЕ з вузькою перехідною зоною мідь-сталь.

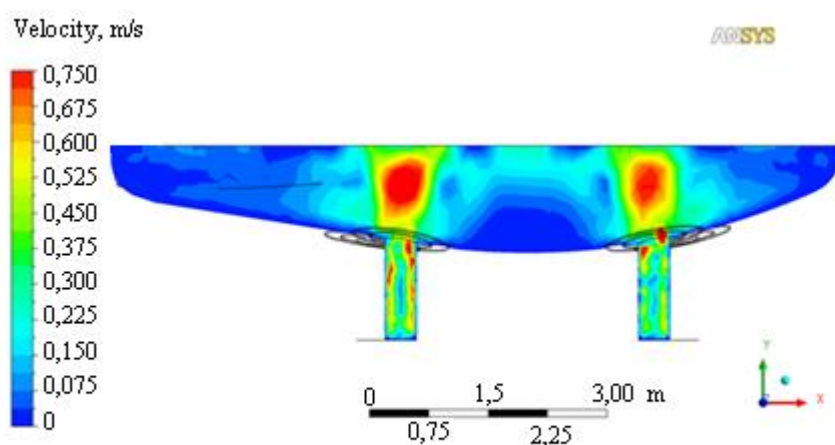


Рис. 25. Поле швидкостей в ванні печі та анодній ямі в вертикальному перерізі: робоче вікно-еркер.

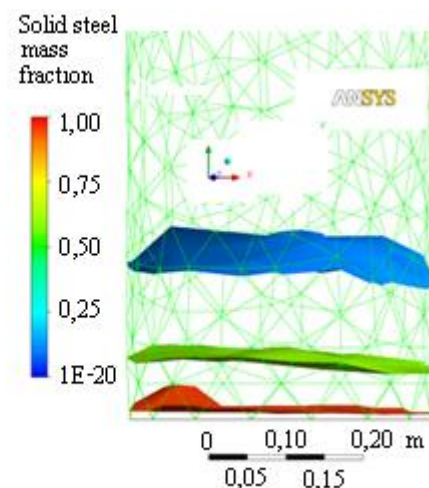


Рис. 26. Ізоповерхні масової долі твердої сталі в анодній ямі.

Перспективним рішенням для ПЕ стрижневого типу представляється використання в якості проміжного теплоносія (ПТ) рідкого алюмінію в сталевій порожнині електроду (рис. 27а). Перенесення теплоти в ПЕ визначається циркуляцією ПТ 1 в сталевій порожнині 2 завдяки ефекту Нортрупа, що забезпечується змінним по довжині центрального стрижня 3 поперечним перерізом (параметри a, b). Тепловідведення здійснюється водою, що циркулює в змійовику 4.

Оцінка швидкості циркуляції ПТ і принципової можливості реалізації конвективного перенесення теплоти проведена чисельно в пакеті «ANSYS CFX». Методика і рівняння для сполученої задачі електродинаміки, теплопередачі і гідродинаміки відповідають раніше розглянутій проблемі ЕВТ в ДСППС високої потужності. В домені «ПТ» задані щільність, в'язкість, тепло- і електропровідність, теплоємність алюмінію, як функції температури. На стінках $b1, b2$ (рис. 27б) прикладена напруга ± 30 В і задані температури 1900 і 800 К, відповідно.

Результати моделювання у вигляді поля температур з поверхнями фазового переходу сталі 5 і ПТ 6 (рис. 27б, в) і поля швидкостей в рідкометалевому ПТ показують можливість збільшення теплопровідності ПТ на конвективний множник $\chi_{\text{con}} = 9,95$ згідно з (14). В даних умовах, згідно з (16), при $u_{\text{be}} = 0,5-0,75$ м/с, рівноважна b_s зростає на 26–35 % в порівнянні з традиційним ПЕ, що сприяє підвищенню експлуатаційної надійності ПЕ та енергоефективності ДСППС.

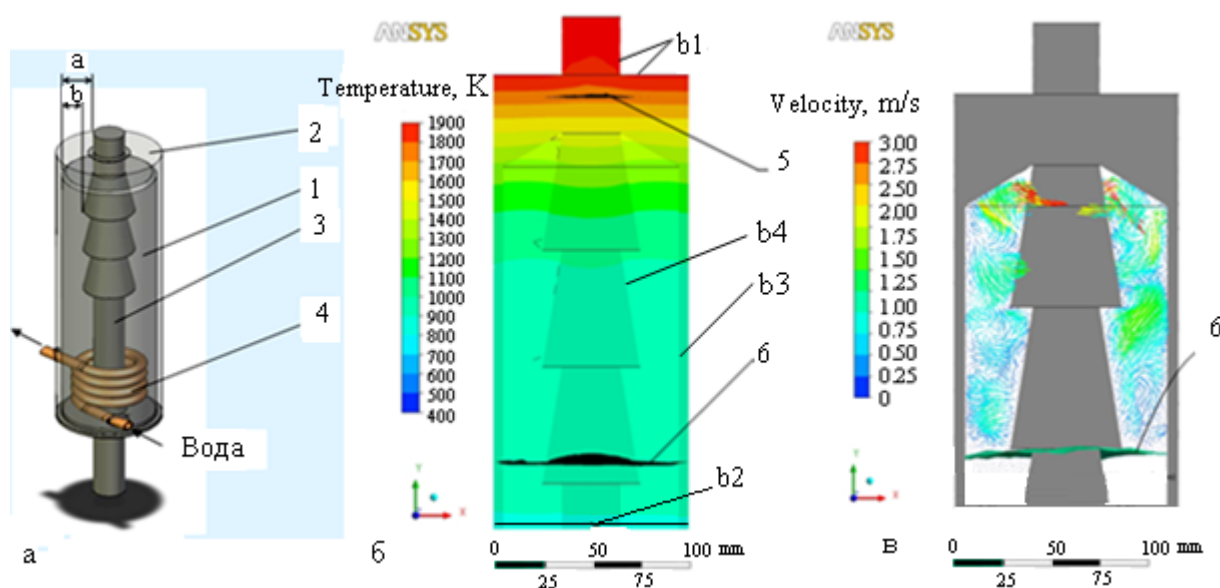


Рис. 27. Схема ПЕ з рідкометалевим теплоносієм (а), поле температур (б) і поле швидкостей (в).

Розділ 8. Застосування розробок в промисловості. У новій 15-т ДСП ПАТ «НКМЗ» застосовані: «глибока» ванна, ВЕ з просторовою трубчастою структурою і система розосередженої аспірації. Результатом є зниження енергоспоживання не менше ніж на 3–5 % і неорганізованих викидів пилогазового середовища на 20–50 % в порівнянні з аналогами, що робить даний проект конкурентоспроможним.

Зразки технічних рішень за розробками дисертації показані на рис. 28. Техніко-економічна ефективність інновацій відображена в табл. 3. Енергоефективні ВЕ: двохрядні (а), зі зміщеними осями труб, з нещільною структурою (б) і кесонно-

трубчасті (в); центральна водоохолоджувана частина зводу (в); системи аспірації (г); несучі пенелі засобів інтенсифікації плавки, комбіновані ВЕ (д); камера первинного знепилення ДСП малої місткості; подовий електрод ДСППС (е) застосовують на 7 заводах «великої» і «малої» металургії в дугових печах місткістю від 3 до 120 т.



Рис. 28. Технічні рішення по розробкам дисертації. Позначення – в тексті.

Таблиця 3. Техніко-економічні характеристики розробок

Розробка	Параметр	Термін окупності	Складові економічного ефекту	Область застосування. Рівень готовності
Енергосберігаючі ВЕ з просторовою структурою		4–7 місяців	Зниження втрат теплоти з водою на 3–18 кВтг/т	«Велика» металургія. Впроваджено
Системи розподіленої та розосередженої аспірації, камера знепилення		8–12 місяців	Зниження неорганізованих викидів ПГС на 20–50 % і притоку повітря на 20–25%	«Велика» металургія і ливарне виробництво. Впроваджено
Комбіновані з футерівкою ВЕ з просторовою структурою		5–7 місяців	Зниження витрати вогнетривів в 1,4–2,5 рази, електродів на 1,0–1,5 кг/т	ДСП ливарного класу. Впроваджено
Подовий електрод з вузькою перехідною зоною			Збезпечення технологічного процесу	ДСППС ливарного класу. Впроваджено
Енергоефективна «глибока» ванна ДСП		9–11 місяців	Зниження енерговитрат на 30 кВтг/т	«Велика» металургія. Технічна пропозиція
Попередній середньотемпературний нагрів скрапу		14–18 місяців	Економія електроенергії на 27– 40 кВтг/т	«Велика» металургія. Технічна пропозиція
Комплекс: ВЕ, «глибока» ванна, попередній нагрів скрапу, система аспірації		13–18 місяців	Економія електроенергії 46 –60 кВтг/т, вогнетривів 8–11 кг/т, електродів 1,0–1,5 кг/т	ДСП ливарного класу. Технічна пропозиція

Промислові дослідження втрат теплоти з водою у дворядних стінових панелях 50-т ДСП ПАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ) та однорядних традиційних панелях 50-т

ДСП ООО «Електросталь» (м. Курахове) підтвердило розрахункові дані про енергоефективність ВЕ з просторовою структурою.

Промислові дослідження аспірації 100-т ДСП ЗАТ ММЗ «ISTIL (Україна)» (м. Донецьк) показали зниження запиленості відхідних газів не менш, ніж на 40–50 % при застосуванні системи розподіленої аспірації в порівнянні з традиційною.

Вдосконалено технологію виготовлення ПЕ для ДСППС методом двохстадійного електрошлакового наплавлення міді на сталеву заготовку. Ширина перехідної зони до 20–25 мм досягається обмеженням температури сталеві заготовки 1150 °С та шлаковим режимом: флюс на базі тетраборату натрію при наплавленні проміжного шару з високою адгезією міді до сталі; флюс на базі гексафтороалюмінату натрію при наплавленні основного шару.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз впливу геометричних співвідношень робочого простору ДСП і конвертера на втрати теплоти з ПГС та водою і на вихід придатного виявив напрямки підвищення енергоефективності ДСП шляхом збільшення глибини ванни та всмоктуючої поверхні аспіраційного газоходу.

2. Теоретично обґрунтовано й експериментально підтверджено оптимальне, за критерієм енергоефективності, співвідношення діаметра і глибини ванни, що для різних енерготехнологічних режимів (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 %.

3. На основі математичного моделювання інтенсивної технології плавлення металошихти і нагріву 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 у спільний колодязь, 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 %.

4. Встановлено, що в робочому просторі ДСП на трубчастій поверхні ВЕ діючі теплові потоки, що визначають термічні напруги і стійкість ВЕ, на 12–55 % перевищують значення щодо плоскої поверхні, а частка конвективної і конденсаційної складових теплового навантаження на ВЕ становить в сумі 31–37 % теплового потоку випромінювання. З урахуванням положень вдосконалено методик розрахунку ВЕ.

5. Теоретично і експериментально одержані дані щодо теплової роботи ВЕ з просторовою трубчастою структурою, що забезпечують зниження втрат теплоти випромінювання з охолоджувальною водою на 20–35 % за рахунок формування теплоакumuлюючого шару гарнісажу. Розроблено 4 види енергоефективних ВЕ.

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

7. Розроблено концепцію системи аспірації ДСП, засновану на спільному газодинамічному впливі розосередження і збільшення всмоктуючої поверхні з

наближенням її до електродних зазорів. Чисельними дослідженнями показано можливість зниження неорганізованих викидів на 15–29 %, притоку повітря на 20–25 %, виносу пилу з агрегату на 20–50 %, що підтверджено експериментально.

8. 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 і одержання теплоносія для попереднього нагріву скрапу з температурою до 500 °С, що виключає утворення токсичних PCDD/F.

9. На основі термодинамічного 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 ТХР, підвищує тепловий ККД печі на 5–6 %, знижує витрати природного газу на 21 % і емісію CO₂ на 9,8 %.

10. Розроблено рідкофазний вуглецевотермічний ПВП в теплогенеруючій шлакової ванні електричної печі з двома ПЕ і встановлено, що для отримання рідкого металізованого продукту в горні, відділеному від ПЕ шаром шлаку, множник, що враховує вплив конвекції у ванні, при коефіцієнті стаціонарної теплопровідності має становити не менше 2,7. Випробування ПВП на 200-кг пілотній установці показало вихід придатного 71–94 % при витраті електроенергії 2,12–2,29 кВт/кг продукту, що відповідає кращим аналогам «ІТmk3» і «ОхуСур».

11. На основі чисельних досліджень обґрунтовано застосування «глибокої» ванни в ДСППС ливарного класу, що для різних варіантів ПЕ спричинює в 1,3–8,4 рази більш потужне ЕВТ-перемішування і, завдяки скороченню періоду доведення сталі, сприяє зниженню питомої витрати електроенергії на 3–9 %. Досліджено процеси теплообміну з фазовим переходом біметалічного ПЕ в умовах ЕВТ в анодній ямі ДСППС високої потужності. Встановлено, 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. Обґрунтовано концепцію і проведені попередні дослідження ПЕ з конвективним механізмом теплопередачі.

12. Ряд розробок доведено до промислового впровадження. В 15-т ДСП ПАТ «НКМЗ» застосовані «глибока» ванна, ВЕ з просторовою структурою і система розосередженої аспірації. Результатом є зниження енергоспоживання на 3–5 % і неорганізованих викидів ПГС на 20–50 %. Енергоефективні ВЕ з просторовою структурою, система аспірації, центральна водоохолоджувана частина зводу, комбіновані ВЕ, камера первинного знепилення ДСП малої місткості, ПЕ з вузькою перехідною зоною мідь-сталь впроваджено на 7 заводах «великої» і «малої» металургії в дугових печах місткістю від 3 до 120 т. Високі техніко-економічні показники забезпечують термін окупності інвестицій, як правило, до 1 року.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Монографії

1. Коновалов, Ю.В., Троянский, А.А., Тимошенко, С.Н. (2011). *Металлургия: учебное пособие для бакалавров вузов в трех книгах. Книга 1. Производство чугуна, железа, стали и ферросплавов*. Донецк: ДонНТУ. 430 с. Глава 4, 173-233.

2. Семко, А.Н., Тимошенко, Н.С., Тимошенко, С.Н. (2015). *Повышение эффективности аспирации пылегазовых выбросов дуговых сталеплавильных печей*. Донецк: ДонНУ. 124 с.

Статті у фахових виданнях

3. Сапиро, В.С., **Тимошенко, С.Н.**, Чернышев, А.Б. (1981). Об уровне и характере облученности футеровки высокоомной 100-т дуговой сталеплавильной печи. *Известия ВУЗов. «Черная металлургия»*, 3, 63-66.
4. Тищенко, П.И., **Тимошенко, С.Н.**, Зуйкова, З.Г. (2000). Математическая модель расчета водоохлаждаемых элементов дуговых печей на основе минимизации потерь энергии. *Наукові праці ДонДТУ. Серія «Металургія»*. Донецьк: ДонДТУ, 18, 31-36.
5. Троянский, А.А., Тищенко, П.И., **Тимошенко, С.Н.** и др. (2002). Разработка основ непрерывного плавления-восстановительного процесса в дуговой печи. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія»*. Донецьк: ДонНТУ, 76-81.
6. Тищенко, П.И., **Тимошенко, С.Н.**, Николайчик, В.А. (2003). Внедрение водоохлаждаемых элементов корпуса, свода и системы газотосоа на ДСП-50 ОАО «Ижорские заводы». *Электрометаллургия*, 1, 20-21.
7. Тищенко, П.И., **Тимошенко, С.Н.**, Дунь, Н.Б. (2006). Повышение эффективности первичного газоудаления при модернизации дуговых сталепла-вильных печей. *Черная металлургия*. Москва: ОАО «Черметинформация», 2, 64-66.
8. Нехамин, С.М., Крутянский, М.М., Стомахин, А.Я., **Тимошенко, С.Н.**, Черняк, А.И. (2007). Пути улучшения показателей выплавки стали в малотоннажных дуговых печах. *Электрометаллургия*, 7, 2-7.
9. Тищенко, П.И., **Тимошенко, С.Н.**, Дунь, Н.Б. и др. (2009). Опыт применения двухрядных стеновых водоохлаждаемых панелей в ДСП высокой мощности. *Черная металлургия*. Москва: ОАО «Черметинформация», 11, 56-58.
10. **Тимошенко, С.Н.**, Тищенко, П.И. (2009). Проблемы эксплуатации водоохлаждаемых элементов дуговых сталеплавильных печей высокой мощности. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія»*. Донецьк: ДонНТУ, 58-65.
11. Тищенко, П.И., **Тимошенко, С.Н.**, Пасечник, С.Ю. и др. (2010). Подовый электрод с жидкометаллическим теплоносителем для дуговой печи постоянного тока *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія»*. Донецьк: ДонНТУ, 164-170.
12. **Timoshenko, S.N.** (2012). Improving of bath geometry – the way to increase of the EAF thermal efficiency. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія»*. Донецьк: ДонНТУ, 36-43.
13. Timoshenko, N.S., Semko, A.N., **Timoshenko, S.N.** (2012). Simulation of EAF off-gas removal system in order to increase its thermal efficiency. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія»*. Донецьк: ДонНТУ, 43-53.
14. **Тимошенко, С.Н.**, Тищенко, П.И., Онищенко, С.П. и др. (2013). Повышение энергоэффективности дуговой сталеплавильной печи с двухрядными стеновыми панелями. *Металлургические процессы и оборудование*. Донецьк: ДонНТУ, 2, 10-15.
15. **Тимошенко, С.Н.**, Тищенко, П.И., Тимошенко, Н.С., Семко, А.Н. (2013). Моделирование системы аспирации электродуговой печи с целью повышения энергоэффективности и экологической безопасности. *Экология и промышленность*. Харьков: «УкрНТИЦ «Энергосталь», 2, 66-69.
16. Тимошенко, Н.С., Семко, А.Н., **Тимошенко, С.Н.** (2013). Моделирование энергоэффективных решений системы газоудаления дуговой сталеплавильной печи. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія»*. Донецьк: ДонНТУ, 84-95.
17. **Тимошенко, С.Н.**, Тищенко, П.И., Колесников, М.В., Зуйкова, З.Г. (2015). Инженерная методика расчета водоохлаждаемых панелей электросталеплавильных агрегатов. *Наукові праці НМетАУ. Серія «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»*. Дніпропетровськ: Нова Ідеологія, 125-134.
18. **Тимошенко, С.Н.**, Колесников, М.В., Тимошенко, Н.С. (2015). Повышение эффективности газоудаления установки ковш-печь. *Металл и литье Украины*, 12, 23-26.
19. Губинский, М.В., **Тимошенко, С.М.**, Шрайбер, О.А., Антонец, І.В. (2017). Підвищення енергоефективності електросталеплавильних процесів шляхом конверсії природного газу з відпрацьованими газами дугової печі. *Проблеми загальної енергетики. Науковий збірник*, т. 48, 1, 60-66.
20. **Тимошенко, С.Н.**, Губинский, М.В. (2016). Повышение энергоэффективности электросталеплавильного процесса с непрерывным плавлением шихты в жидкой ванне. *Наукові праці НМетАУ. Серія «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»*. Дніпро: Нова Ідеологія, 174-183.
21. **Тимошенко, С.Н.**, Филиппи, А.А., Онищенко, С.П., Тищенко, П.И. (2017). Энергоэффективные решения при модернизации дуговых печей постоянного тока литейного класса. *Металл и литье Украины*, 8-10, 48-55.
22. **Тимошенко, С.Н.**, Дорошенко, А.В., Дядьков, Б.П., Тищенко, П.И., Онищенко С.П. (2018). Энергоэффективные решения при модернизации малотоннажных дуговых сталеплавильных печей литейного класса. *Металл и литье Украины*, 3-4, 34-40.
23. **Тимошенко, С.Н.**, Стовпченко, А.П., Костецкий, Ю.В., Губинский, М.В. (2019). Пути повышения энергоэффективности дуговых сталеплавильных печей. *Современная электрометаллургия*, 1, 46–56.

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз

24. Timoshenko, N., Semko, A., **Timoshenko S.** (2014). Modelling of electric arc furnace off-gas removal system. *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 41, 4, 257-261.

25. **Timoshenko, S.N.** (2016). Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace. *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. Дніпро: НМетАУ ІВК Системні технології, 3, 33-39.
26. **Timoshenko, S.N.** (2017). Analysis of energy efficient solutions of a small capacity electric arc furnace and their synthesis in a new generation 15-ton unit. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. Дніпро: НМетАУ-ІВК Системні технології, 20, 78-87.
27. **Тимошенко, С.Н.** (2017). Моделирование геометрии сталеплавильной ванны и подового электрода дуговой печи постоянного тока с целью повышения ее энерго-эффективности. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Математичне моделювання в техніці і технологіях. Харків: НТУ «ХП», 30, 116–124.
28. **Timoshenko, S.N., Stovpchenko, A.P., Kostetski, Yu.N., Gubinski, M.V.** (2018). Energy efficient solutions for EAF steelmaking. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 88, 1, 18–24.
29. **Timoshenko, S.N.** (2018). Energy efficient solutions for small capacity electric arc furnaces of a foundry class. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. Дніпро: НМетАУ-ІВК Системні технології, 21, 73-80.
30. **Timoshenko, S., Gybinskyi, M., Yaroshenko, Yu., Vvedenska, T.** (2018). Increasing Energy Efficiency of Electric Arc Foundry Furnaces. *VII All- Russian Conf. "Heat Engineering and Computer Science in Education, Science and Production" TIM'2018*. KnE Engineering, 35–49. DOI 10.18502/keg.v3i5.2653.
31. **Тимошенко, С.Н., Губинский, М.В.** (2019). Энергоэффективные решения диаметра распада электродов дуговой сталеплавильной печи. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. Дніпро: НМетАУ-ІВК Системні технології, 22, 104-113.

Патенти

32. **Патент (UA)** на винахід №83990 F27D17/00, C22B9/21. Спосіб видалення пилогазової фази із плавильного агрегату і пристрій для його здійснення. Грушко, І.А., Тищенко, П.І., **Тимошенко, С.М.**, та ін. Опубл. 10.09.2008, бюл. №17.
33. **Патент (UA)** на винахід №97745 C22B4/00. Спосіб виплавки металів та агрегат для виплавки металів. Тищенко, П.І., Павличевич, М., Тищенко, А.П., **Тимошенко, С.М.** та ін. Опубл. 12.03.2012, бюл. №5.
34. **Патент (UA)** на корисну модель №89362 F27D 17/00. Система аспірації пилогазових викидів електродугової печі. **Тимошенко, С.М.**, Тищенко, П.І., Тимошенко, Н.С., Семко, А.Н.. Опубл. 25.04.2014, бюл. №8.
35. **Патент (UA)** на корисну модель № 113510 F27D 17/00. Система аспірації пилогазових викидів дугової печі. **Тимошенко, С.М.** Опубл. 25.01.2017, бюл. №2.
36. **Патент (UA)** на корисну модель №114435 F27B 3/10, H05B 7/00. Подовий електрод дугової сталеплавильної печі постійного струму. **Тимошенко, С.М.** Опубл. 10.03. 2017, бюл. №5.
37. **Патент (UA)** на корисну модель №114437 F27B 3/06. Дугова сталеплавильна піч. **Тимошенко, С.М.** Опубл. 10.03. 2017, бюл. №5.
38. **Патент (UA)** на корисну модель №115178 F27B 3/24. Несуча панель засобів інтенсифікації плавки дугової сталеплавильної печі. **Тимошенко, С.М.** Опубл. 10.04.2017, бюл. №7.
39. **Патент (UA)** на корисну модель №115191 F27B 3/24. Водоохолоджувана панель дугової сталеплавильної печі. **Тимошенко, С.М.** Опубл.10.04.2017, бюл. №7.
40. **Патент (UA)** на корисну модель №120432 F27D 13/00 Спосіб попереднього нагрівання скрапу в електродуговій й печі з безперервним завантаженням шихти в рідку ванну. **Тимошенко, С.М.**, Губинський, М.В., Шрайбер, О.А. Опубл. 25.10. 2017, бюл. №20.
41. **Патент (UA)** на корисну модель №124333 F27B 3/00, F27B3/10. Дугова сталеплавильна піч постійного струму. **Тимошенко, С.М.** Опубл. 10.04. 2018, бюл. №7.

Матеріали міжнародних наукових конференцій та інші друківані праці

42. Sapiro V.S., **Timoshenko, S.N.**, Chernishev, A.B. (1981). Level and character of exposure of lining of high-power 100-t arc steelmaking furnace. *Steel in USSR*, vol. 11, 3, 149-150.
43. Тимошенко, Н.С., Семко, А.Н., **Тимошенко, С.Н.** (2012). Снижение выбросов углекислого газа из дуговой сталеплавильной печи на основе совершенствования системы газоудаления. Сборник научных трудов Международного научно-практического симпозиума «Низко-углеродные открытые инновации для регионов Украины». LCOI-Reviews. Донецк: Юго-Восток, т. 2, 79-83.
44. Tischenko, P., **Timoshenko, S.**, Tischenko, A. (2000). A new generation of the EAF panels with renewable slag: lowering of heat loss, combining of duties for energy saving. *Proceedings of «Metal-2000» International Conf. Ostrava, Czech Republic*. Available at: <http://konference.tanger.cz/data/metal2000/sbornik/papers/102.pdf> (assessed 12.09.16).
45. Павличевич, М., Тищенко, П.И., **Тимошенко, С.Н.**, Торшин, А.М. (1997). Разработка и моделирование конструкционных решений водоохлаждаемых элементов высокоомощных ДСП. *Труды 4-го Конгресса сталеплавильщиков*. Москва, 182-183.
46. Тищенко, П.И., **Тимошенко, С.Н.**, Шевченко, В.П., Зуйкова, З.Г. (1999). Математическое моделирование тепловой работы устройства выпуска стали с медным охлаждаемым шиберным затвором. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія»*. Донецьк: ДонНТУ, 53-57.

47. Тищенко, П.И., Тимошенко, С.Н., Канфер, В.Д. (2000). Использование решетчатых водоохлаждаемых элементов свода дуговой печи для нагрева и восстановления исходных материалов отходящими газами. *Труды 6-го конгресса сталеплавыльщиков, г. Череповец 17-19 октября 2000г.*, 288-291.
48. Tishchenko, P.I., Timoshenko, S.N., Kanfer, V.D. (2000). Utilization of electric arc furnace off-gases energy on basis of improvement in roof cooling system. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost'*, 5, 92-94.
49. Тищенко, П.И., Тимошенко, С.Н., Тищенко, А.П. (2002). Путь к решению проблем экологии сталеплавильного агрегата- использование системы распределенного газоотсоса. *Пути решения экологических проблем горно-металлургической отрасли стран СНГ. Материалы научно-практической конференции.* Мариуполь: Стратегия, 334-339.
50. Тищенко, П.И., Тимошенко, С.Н., Дунь, Н.Б. (2006). Повышение эффективности газоудаления из дуговых сталеплавильных печей. *Материалы VII международной научно - технической конференции «Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах».* Мариуполь: ПГТУ, 334-339.
51. Тищенко, П.И., Тимошенко, С.Н., Дунь, Н.Б., Гасенко, А.А. (2007). Особенности теплообмена в водоохлаждаемых газоходах дуговых сталеплавильных печей высокой мощности. *Материалы 13-й Междунар. конф. «Современные проблемы электрометаллургии».* Челябинск: ЮУрГУ, ч. 2, 163-167.
52. Тищенко, П.И., Тимошенко, С.Н., Дунь, Н.Б., Палиенко, Г.В., Дорошенко, А.В. (2007). Комбинированный свод дуговых сталеплавильных печей литейного цеха. *Материалы 13-й Междунар. конф. «Современные проблемы электрометаллургии».* Челябинск: ЮУрГУ, ч. 2, 161-163.
53. Тищенко, П.И., Нихамин, С.М., Тимошенко, С.Н., Дунь, Н.Б. (2007). Водоохлаждаемый свод и стеновые панели дуговых сталеплавильных печей малой металлургии. Современные проблемы электрометаллургии стали. *Материалы 13-й Междунар. конф. «Современные проблемы электрометаллургии».* Челябинск: ЮУрГУ, ч. 2, 159-161.
54. Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., Онищенко С.П. (2012). *Подовые электроды ДСППТ. Обзор основных технических решений.* Available at: <http://uas.su/articles/steelmaking/2012/00001.php> (assessed 27.11.2016).
55. Тимошенко, Н.С., Семко, А.Н., Тимошенко, С.Н. (2012). Снижение выбросов углекислого газа из дуговой сталеплавильной печи на основе совершенствования системы газоудаления. Сб. научн. Тр. Междунар. симпозиума «Низкоуглеродные открытые инновации для регионов Украины». LCOI-Reviews. Донецк: Юго-Восток, т. 2, 79-83.
56. Тищенко, П.И., Тищенко, А.П., Тимошенко, С.Н., Фридман, М.А. (2012). Подовый электрод дуговой печи постоянного тока. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 7, 282-284.
57. Тимошенко, С.Н., Тищенко, П.И., Тимошенко, Н.С., Спирин, В.А. (2013). Повышение энергоэффективности электросталеплавильного процесса с непрерывной загрузкой шихты в жидкую ванну *Материалы 15-й Междунар. конф. «Современные проблемы электрометаллургии».* Челябинск: ЮУрГУ, ч. 1, 145-149.
58. Тимошенко, С.Н. (2017). Интенсификация процессов массообмена в дуговой сталеплавильной печи с глубокой ванной. *Междунар. научно-техн. конф. «Университетская наука 2017»*, тезисы докладов. Мариуполь: ПГТУ, том 1, 147-148.
59. Шумаков, В.Ф., Малахов, А.И., Буряк, А.В., Голик, В.В., Анацкий, М.П., Тимошенко, С.Н., Тищенко, П.И. (2017). Дуговая печь малой вместимости для литейных цехов и региональных микро-заводов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 3, 107-112.
60. Тимошенко, С.Н., Малич, В.Г., Великий, А.В. (2017). Исследование эксплуатационных характеристик эркерной панели дуговой сталеплавильной печи. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 4, 79-84.
61. Дорошенко, А.В., Дядьков, Б.П., Тимошенко, С.Н., Тищенко, П.И. (2017). Комбинированный водоохлаждаемый свод дуговых электропечей малой вместимости. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 5, 91-95.
62. Shatokha, V., Timoshenko, S., Semenko, S. (2017). Trends and factors of sustainable development. Iron and Steelmaking. In the book: *Environmentally sustainable industrial development.* Dnipro: Driant, 56-78.
63. Тимошенко, С.Н., Ярошенко, Ю.Г., Губинский, М.В. (2018). Энергоэффективные направления модернизации электродуговых печей литейного класса. *VII Всеросс. конф. «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2018).* Уральский федеральный университет, Екатеринбург. Available at: <http://hdl.handle.net/10995/61575>, ISBN 978-5-9908685-4-1.

АНОТАЦІЯ

Тимошенко С.М. Розвиток наукових основ підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Покровськ, 2019.

Дисертація присвячена підвищенню енергоефективності дугових сталеплавильних печей (ДСП) на основі розвитку теоретичних уявлень щодо процесів теплообміну, гідромеханіки і електровихрових течій в робочому просторі ДСП.

Теоретично обґрунтовано й експериментально підтверджено оптимальне, за критерієм енергоефективності, співвідношення діаметра і глибини ванни 2,5–1,8 для різних енерготехнологічних режимів, що дозволяє знизити втрати теплоти з водою на 8,5–49 % і збільшити швидкість нагріву ванни та плавлення скрапу на 12–25 %.

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

Встановлено, що в робочому просторі ДСП на трубчастій поверхні водоохолоджуваних елементів (ВЕ) діючі величини теплових потоків, що визначають термічні напруги й 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.

Розроблено ВЕ з просторовою трубчастою структурою, які, згідно з теоретичними та експериментальними дослідженнями теплового стану, забезпечують зниження втрат теплоти випромінювання з охолоджувальною водою на 20–35 % за рахунок формування теплоакумуючого і теплоізолюючого шару гарнісажу.

Чисельними дослідженнями теплообміну в ДСП ливарного класу в умовах неритмічної роботи визначено і експериментально підтверджено, що застосування 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.

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

Отримали розвиток уявлення щодо утилізації теплоти відхідних газів ДСП. 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 і одержання теплоносія для нагріву скрапу з температурою до 500°C, що виключає утворення токсичних PCDD/F.

На основі термодинамічного аналізу обґрунтовано використання теплоти і хімічного потенціалу відхідних газів ДСП, для термохімічної регенерації природного газу з подальшим нагріванням скрапу спалюванням синтез-газу, що підвищує тепловий ККД печі, працюючої «flat bath» процесом на 5–6 %, знижує витрату природного газу на 21 % і емісію CO₂ на 9,8 %.

Розроблено рідкофазний вуглецевотермічний ПВП в теплогенеруючій шлакової ванні електричної печі з двома ПЕ і встановлено, що для отримання рідкого металізованого продукту в горні, відділеному від ПЕ шаром шлаку, множник, що враховує вплив конвекції у ванні, при коефіцієнті стаціонарної теплопровідності має становити не менше 2,7.

На основі чисельного дослідження електровихрових течій (ЕВТ) в ДСППС ливарного класу, обґрунтовано застосування «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 %. Досліджено процеси теплообміну з фазовим переходом біметалічного ПЕ в умовах ЕВТ в анодній ямі ДСППС високої потужності. Встановлено, що рівноважна товщина твердої сталеві частини ПЕ знаходиться в критичній залежності від ширини перехідної зони мідь-сталь, яка для сталої експлуатації ПЕ має не перевищувати 20–25 мм. Обґрунтовано концепцію ПЕ з конвективним механізмом теплопередачі.

Розробки впроваджені на 7 заводах, у ДСП місткістю від 3 до 120 т. Техніко-економічні показники забезпечують термін окупності розробок, як правило, до 1 року.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, енергоефективність, чисельне моделювання, тепломасообмін, глибока ванна, водоохолоджувані елементи, аспірація, попередній нагрів скрапу, емісія CO, CO₂, PCDD/F, термохімічна регенерація природного газу, плавильно-відновний процес, електровихрові течії, подовий електрод.

ABSTRACT

Timoshenko S.M. Development of scientific basis for improving energy efficiency of electric arc steelmaking furnaces. - Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.14.06 - Technical Thermal Physics and Industrial Heat and Power Engineering. Donetsk National Technical University, Pokrovsk, 2019.

The thesis is devoted to increase of energy efficiency of electric arc steelmaking furnaces (EAF) based on development of theoretical ideas about processes of heat transfer, hydromechanics and electrovortex flows in the EAF working space.

Theoretically substantiated and experimentally confirmed the optimal, by criterion of energy efficiency, ratio of diameter and depth of the bath, equal to 2.5-1.8 for various EAF energy-technological modes, which reduces the heat loss with cooling water by 8.5-49 %, increase the bath heating and scrap melting rate by 12-25 %.

Based on mathematical modeling of scrap melting and liquid bath heating processes, it was found that arc energy efficiency decreases from 0.92-0.94 to 0.68-0.70 as the individual wells evolve to a common one. The maximum relative reduction of specific electric power consumption of 2.5-7.5 % in EAF of various capacities is achieved with the electrodes pitch diameter 0.42-0.49 of the working space internal diameter.

It has been established that in the EAF working space a tubular surface of the water-cooled elements (WCE) perceives the effective values of heat flux, determining the thermal stress and stability of WCE, 12-55 % higher than the the heat flux, evaluated for a flat surface, and the part of convective and condensation components of the thermal load on the WCE add up to 31-37 % of the irradiation heat flux.

The WCE with a spatial tubular structure have been elaborated, for which theoretical and experimental data on the thermal state were obtained, confirming the reduction of irradiation heat loss with cooling water by 20-35 % due to the created conditions for the formation of a heat-accumulating and heat-insulating layer of the crust.

By numerical studies of heat exchange in the foundry class EAF, for the conditions of non-rhythmic operation, it has been determined and experimentally confirmed, that the use of WCE with a spatial structure in the places of critical durability of the lining, does not increase the energy consumption, comparing to the traditional fully refractory shell, with a relative area of WCE in the roof not higher than 15-20 %, while reducing refractories consumption by 1.4-2.5 times.

The concept of the EAF aspiration system has been developed based on the joint gas-dynamic effect of dispersal and increasing the suction surface with approaching it to the electrode gaps. The possibility of reducing fugitive emissions by 15-29 %, air inflow by 20-25 %, dust removal from the EAF by 20-50 % was experimentally shown.

The energy-ecological concept of the EAF exhaust gases heat utilization is developed. Based on the study of two-stage CO burning process in the EAF afterburning chamber, the ratio of primary and secondary air 1 to 3.5 is determined, which ensures achievement of the MPC of CO due to organization of a steady burning zone and obtaining a heat carrier for scrap preheating with the temperature up to 500 °C, making impossible the formation of toxic PCDD/F.

Based on thermodynamic analysis, it is grounded that utilization of the heat and chemical potential of the EAF exhaust gases for thermochemical regeneration of natural gas, followed by preheating of the scrap due to burning of synthesis gas, increases the thermal efficiency of the «flat bath» EAF process by 5-6 %, reduces the consumption of natural gas by 21 % and CO₂ emission by 9.8 %.

For elaborated liquid-phase carbon-thermal smelting-reduction process in a heat-generating slag bath of an electric furnace with two bottom electrodes (BE), it was found that to obtain a liquid metallized product in the hearth separated from the BE by a slag layer, the factor taking into account the effect of convection in the bath at a coefficient of stationary thermal conductivity should be at least 2.7.

Based on numerical study of electrovortex flows (EVF) in the DC EAF of a foundry class, the use of a "deep" bath has been substantiated, which allows to increase the EVF-mixing capacity for various BE types by 1,3-8,4 times, and, by intensification of steel refining process, promotes to reduce the specific EAF energy consumption by 3-9 %. The processes of heat exchange with the phase transition of bimetallic BE in the conditions of EVF in the anode well of high power DC EAF are investigated and it is shown that the equilibrium thickness of BE solid steel part is in critical dependence on the width of the transition copper-steel zone, which, for stable BE operation, should not exceed 20-25 mm. The concept of BE with a convective mechanism of heat transfer is substantiated.

The developments have been brought to industrial implementation at 7 plants equipped by the EAF with a capacity from 3 to 120 tons. High technical and economic indicators of elaborations ensure a payback period of investments, as a rule, up to 1 year.

Key words: electric arc furnace, energy efficiency, numerical modeling, heat-mass transfer, deep bath, water-cooled elements, aspiration of dust-gas environment, preheating of scrap, emission of CO, CO₂, PCDD/F, thermochemical regeneration of natural gas, melting-reduction process, electrovortex flows, bottom electrode.