

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національна металургійна академія України**

**ПЕТРИК ОЛЕКСІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 662.614.2:661.975:669.18

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТИ В  
СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМУ АГРЕГАТІ ШЛЯХОМ ДОПАЛЮВАННЯ  
ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ**

**05.14.06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика**  
**144 – теплоенергетика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро- 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теплоенергетики та гідроенергетики у Запорізькій державній інженерній академії Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Яковлєва Ірина Геннадіївна**  
Запорізька державна інженерна академія,  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри теплоенергетики та гідроенергетики

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Ганжа Антон Миколайович,**  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», завідувач кафедри теплотехніки  
та енергоефективних технологій.

кандидат технічних наук, доцент  
**Романько Ярослав Вікторович,**  
Національна металургійна академія України,  
доцент кафедри екології, теплотехніки та охорони праці.

Захист дисертації відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.05 при Національній металургійній академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 4.

Факс: +38 (0562) 47-44-27, e-mail: gubinmv@ukr.net

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національної металургійної академії України (м. Дніпро, просп. Гагаріна, 4).

Автореферат розіслано «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

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

Малий Є.І.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Відомо багато режимів продування й різних методів допалювання оксиду вуглецю в робочому просторі сталеплавильних агрегатів, що дозволяють використовувати додатково теплоту від спалювання оксиду вуглецю (СО) киснем ( $O_2$ ) для інтенсифікації теплових і технологічних процесів плавки сталі, поліпшення технологічних, екологічних і техніко-економічних показників виробництва. Однак ці методи продування мають істотні недоліки, що полягають у тому, що дотепер не визначені раціональні умови проведення дуттьового режиму з допалюванням СО киснем над зоною продування в сталеплавильних агрегатах з урахуванням впливу загальної кількості кисню, інтенсивності продування.

Актуальність роботи полягає в необхідності підвищення ефективності використання теплоти у двохванному сталеплавильному агрегаті шляхом допалювання оксиду вуглецю, на основі розробки енергоефективного теплового і кисневого режимів виплавки сталі, й визначається можливістю подальшого вдосконалювання процесу виплавлення сталі на основі підвищення інтенсивності продування ванни й більш ефективним використанням теплоти від допалювання СО киснем.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи відповідає Закону України №74/97-ВР від 01.07.1994 р. (Закон України «Про енергозбереження»), пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки, а саме, ст.8 «Нові технології і комплекси», а також «Концепції Державної цільової науково-технічної програми розвитку й реформування гірничо-металургійного комплексу України на період до 2020 року». Робота виконана з відповідністю до держбюджетної теми науково-технічної розробки 8-1Д/2017 «Формування теплофізичних властивостей елементів конструкції теплового захисту енергетичного обладнання шляхом створення прогнозованих пористих структур для промисловості України» (номер державної реєстрації 0117U006455 (2017 р.)), у якій дисертант був виконавцем окремих розділів.

Дослідження, результати яких наведені у роботі, проводились на основі двосторонніх договорів щодо науково-технічного співробітництва з ПАТ «Запоріжсталь»: №20/2014/1924 від 12.08.2014 «Тепловий режим роботи ДСПА-1 з мінімальним використанням природного газу», №20/2015/926 від 09.04.2015 «Виплавлення сталі в ДСПА-1 без використання природного газу на всіх періодах плавки», №20/2015/1066 від 13.05.2015 «Зниження витрати природного газу в період плавлення до  $0 \text{ м}^3/\text{год}$  при продуванні ванни киснем», №20/2017/336в від 14.11.2017 «Поступове зниження витрати кисню на факел в завалку і прогрів».

**Мета і завдання досліджень.** Підвищення ефективності використання теплоти у двохванному сталеплавильному агрегаті шляхом допалювання оксиду вуглецю, на основі розробки енергоефективного теплового і кисневого режимів виплавлення сталі, що дозволяють знизити витрати природного газу.

Для досягнення зазначеної мети автором розв'язано наступні завдання:

1. Виконати аналіз конструктивних особливостей і ефективності

використання пристроїв для продування ванни сталеплавильних агрегатів киснем і їх впливу на утворення і допалювання оксидів вуглецю в робочому просторі агрегатів і формування теплового балансу плавки стосовно до реальних виробничих умов.

2. Експериментальним і теоретичним шляхом дослідити вплив параметрів продування (інтенсивність продування, концентрація вуглецю) ванни сталеплавильного агрегату киснем на процеси тепломасообміну, які протікають в реакційній зоні та розробити інноваційну конструкцію дугтьового пристрою.

3. Експериментально визначити вплив конструкції дугтьового пристрою та інтенсивності продування на процеси допалювання оксидів вуглецю над ванною у сталеплавильному агрегаті і його теплову роботу.

4. Експериментальним і теоретичним шляхом встановити залежності впливу параметрів теплового режиму і інтенсивності продування на процес пилоутворення під час продування ванни сталеплавильного агрегату киснем.

5. Розробити і впровадити в промислове виробництво новий енергозберігаючий тепловий та кисневий режим виплавлення сталі, що забезпечує підвищення ефективності використання теплоти при допалюванні оксидів вуглецю.

*Об'єкт досліджень* - процеси тепломасообміну та гідродинаміки при продуванні металу киснем і допалюванні оксиду вуглецю в робочому просторі сталеплавильного агрегату.

*Предмет досліджень* – параметри тепломасообміну та гідродинамічних процесів і режими продування металу і допалювання оксиду вуглецю в робочому просторі сталеплавильного агрегату.

**Методи досліджень.** При виконанні роботи використовувалися наступні методи експериментальних і промислових досліджень: метод активного експерименту, метод фото-кінозйомки, гравіметричний метод визначення запиленості. Метод статистичної обробки експериментальних даних з використанням спеціальних пакетів програмного забезпечення, балансовий метод аналізу теплових процесів за відповідними ДСТУ, ТУ У.

При виконанні роботи використовувалися наступні ліцензійні та сертифіковані спеціальні пакети програмного забезпечення: «Statistica» (програмний пакет для статистичного аналізу, розроблений компанією Statsoft, що реалізує функції аналізу даних, керування даних, видобутку даних, візуалізації даних із залученням статистичних методів); «Iron-Line» (програмний пакет для аналізу теплопереносу у ванні сталеплавильного агрегату, розроблений «Espace»).

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше для двохванного сталеплавильного агрегату експериментально встановлено вплив вмісту вуглецю і тривалості продування на довжину і температуру факела, що зноситься потоком газів, які відходять із зони продування. Зі зменшенням вмісту вуглецю в розплаві від 4,25 до 0,1% довжина факела зменшується від 1,4 до 0 м при зниженні температури факела від 1905-1911 °С до 1680-1700 °С.

2. Вперше експериментально встановлено вплив газодинамічних

характеристик дуттьового пристрою з почерговим розташуванням кутів нахилу і діаметрів сопел фурми на температурні характеристики ванни сталеплавильного агрегату. Визначено, що при збільшенні інтенсивності продування від 2300 до 8000 м<sup>3</sup>/год і зміні кутів нахилу сопел від 20 до 50° інтенсифікується процес утворення та допалювання СО у ванні сталеплавильного агрегату, що призводить до збільшення швидкості нагріву розплаву з 74,0 до 89,4 °С/год. При цьому, об'ємна частка СО збільшується від нуля (в струмені кисню) до 80% на виході з розплаву.

3. Вперше визначено раціональні геометричні характеристики дуттьового пристрою за критерієм К (відношення глибини лунок в розплаві до діаметру реакційної зони) і інтенсивності перемішування розплаву. Величина діаметрів сопел від 12 до 15 мм і кутів нахилу сопел від 20 до 50° при комбінованому їх розташуванні забезпечує значення критерію К рівним 1,018 і інтенсивність перемішування 8,52.

4. Вперше на основі аналізу механізмів пилоутворення для 250-т двохванного сталеплавильного агрегату під час продування металу киснем при проведенні промислових експериментів визначено раціональне значення інтенсивності продування 6450-6550 м<sup>3</sup>/год, що забезпечує зниження викидів пилу до 7,70-7,80 кг/т.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. Розроблено конструкцію дуттьового пристрою для продування ванни киснем, з використанням комбінованого розташування отворів і сопел, яка забезпечує підвищення ефективності продування ванни сталеплавильного агрегату, зниження тривалості плавки з 3,71 до 3,51 години і зниження витрат на виплавлення сталі. Дуттьовий пристрій впроваджено в сталеплавильному цеху МК ПАТ «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя).

2. Розроблено та впроваджено рекомендації щодо оптимізації технології виплавлення сталі з допалюванням оксиду вуглецю над зоною продування в сталеплавильному цеху МК ПАТ «Запоріжсталь» (патент України на корисну модель № 108529). В результаті впровадження виключено використання природного газу, зменшена тривалість плавки. Собівартість виробництва сталі скоротилася на 43,48 грн/т, що відповідає річному економічному ефекту 46347157,79 грн на рік при обсязі виробництва сталі 1065965 т/рік.

3. Результати досліджень, отримані в дисертації, використовуються в навчальному процесі кафедри теплоенергетики і гідроенергетики Запорізької державної інженерної академії в курсі «Високотемпературні процеси і установки».

**Особистий внесок здобувача.** Експериментальні й теоретичні дослідження, що увійшли в дисертаційну роботу, виконані безпосередньо автором разом зі співробітниками Запорізької державної інженерної академії та МК ПАТ «Запоріжсталь». Результати опубліковані в співавторстві з ними. У наукових працях, виконаних разом зі співавторами, особистий внесок автора полягає в: узагальненні результатів досліджень відносно конструктивних особливостей дуттьових пристроїв для продування ванни сталеплавильних агрегатів киснем;

участі у розробці конструкції дуттьового пристрою, у встановленні закономірностей впливу розмірів бульбашок оксиду вуглецю та інтенсивності продування ванни киснем на процес пилоутворення; експериментальному дослідженні впливу концентрації вуглецю в розплаві й тривалості продування на довжину й температуру факела, що зноситься потоком газів, які відходять із зони продування; проведення експериментів по визначенню температурних полів у ванні сталеплавильного агрегату; визначенні концентрації газів у ванні сталеплавильного агрегату; визначенні впливу теплофізичних параметрів на інтенсифікацію процесів теплообміну у ванні сталеплавильного агрегату, розробці нового енергозберігаючого теплового та кисневого режиму виплавлення сталі для ДСА.

Авторові належать основні ідеї роботи, постановка завдання, обґрунтування основних допущень, теоретичні припущення, проведення експериментів, аналіз отриманих результатів і формування висновків за результатами проведених досліджень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення й результати даних досліджень доповідалися на двох всеукраїнських та 7 міжнародних конференціях, у тому числі: 42-й Міжнародній науково – технічній конференції комбінату «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя, листопад 2015 р.); 43-й Міжнародній науково – технічній конференції комбінату «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя, листопад 2016 р.); 26 міжнародній конференції "Проблеми екології й експлуатації об'єктів енергетики" (м. Одеса, вересень 2016 р.); 21 науково-технічній конференції студентів, аспірантів і викладачів ЗДІА (м. Запоріжжя, квітень 2016 г.); міжнародній науково – практичній конференції «Теорія й практика сучасної науки» (м. Дніпро, лютий 2017 р.); міжнародній науково – практичній конференції «Інноваційний розвиток науки нового тисячоріччя» (м. Ужгород, квітень 2017 р.); 27 всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Еколого-Енергетичні проблеми сучасності» (м. Одеса, квітень 2017 р.); 13 international scientific and practical conference «Prospects of world science - 2017» (Sheffield, England, July-August 2017); 44-й Міжнародній науково – технічній конференції комбінату «Запоріжсталь» ( м. Запоріжжя, листопад 2017 р.)

**Публікації.** Основні матеріали дисертації представлені у 17 друкованих працях, в тому числі 7 статей у спеціалізованих наукових журналах і виданнях, зі списку, рекомендованого ВАК (1 стаття входить до наукометричної бази Scopus), 1 патенті України та 9 матеріалах конференцій. Всі публікації містять результати безпосередньої роботи автора на окремих етапах досліджень і відображають основні положення та висновки дисертаційної роботи.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох основних розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 168 сторінок, включаючи 127 сторінок загального машинописного тексту, містить 14 таблиць, 53 рисунків, бібліографічний список з 273 джерел і 9 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та завдання, об'єкт, предмет й методи дослідження, розкрито наукову новизну й практичне значення отриманих результатів. Наведено інформацію щодо публікації результатів дисертаційних досліджень, особистий внесок здобувача у співавторстві, апробацію результатів роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи наведено аналіз конструктивних особливостей і ефективності використання пристроїв для продування ванни сталеплавильних агрегатів киснем і їх впливу на утворення і допалювання оксиду вуглецю в робочому просторі агрегатів і формування теплового балансу плавки стосовно до реальних виробничих умов.

Аналіз науково-технічної літератури по досліджуваному завданню показує, що об'єм оксиду вуглецю, який виділяється з ванни сталеплавильного агрегату, утворюється в основному в зоні взаємодії струменів кисню з металом, а також частково в шлаку і атмосфері агрегату. Окиснення вуглецю у ванні до СО і СО<sub>2</sub> визначається взаємодією кисню дуття з розплавом, а на допалювання СО до СО<sub>2</sub> у шлаку і в кисневих струменях істотний вплив здійснюють теплотехнічні й теплофізичні параметри режиму виплавлення сталі й конструкції кисневих фурм. Використання технології виплавки сталі в сталеплавильних агрегатах з більш повним допалюванням СО у ванні є перспективним методом підвищення ефективності виробництва. Підвищення ступеня допалювання СО дозволяє не тільки одержувати значну кількість додаткової теплоти в результаті допалювання СО струменями О<sub>2</sub> над ванною, але й суттєво знизити винос пилу, що надходить з зони продування агрегату, а також інтенсифікувати теплові й технологічні процеси виплавлення сталі. Керування технологічними процесами на основі організації режиму допалювання СО у сталеплавильних агрегатах неможливо без вивчення реакційних зон і знання закономірностей взаємодії систем струменя окиснювача з потоком газів, що відходять, шлаками й металевією ванною. Тому, дослідження й розробка ефективного способу продування ванни сталеплавильного агрегату із застосуванням нових теплових режимів виплавлення сталі й раціональної інтенсивності продування при допалюванні СО у ванні агрегату в процесі виплавлення сталі є досить актуальним, представляє практичний і науковий інтерес.

Аналіз праць показав, що в умовах сучасного виробництва сталі конструкція кисневої фурми повинна забезпечувати не тільки підвищення ефективності продування, але й відповідні умови допалювання СО у робочому просторі з метою поліпшення теплового балансу агрегату. При цьому теплота, що виділяється при допалюванні СО має перевищувати енерговитрати на нагрівання розплаву і дозволити зробити плавлення сталі без додаткової витрати природного газу. Але кисневі фурми розглянутих конструкцій мають низьку стійкість та підвищений вплив на склепіння печей, що приводить до його передчасного прогару.

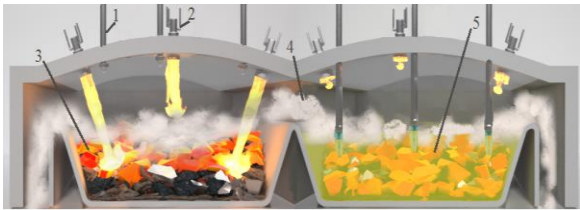
Проаналізувавши літературні джерела можна зробити висновок, що на сьогоднішній день відсутні однозначні відомості щодо раціональних витрат О<sub>2</sub> і

природного газу, немає однозначних рекомендацій щодо вибору конструкції, витрати кисню, який подається на продування й допалювання СО. При цьому тип дуттьового обладнання суттєво впливає на теплову роботу агрегату.

Аналіз матеріалів відомих досліджень підтверджує необхідність розробки нових конструкцій кисневих фурм. Узагальнення конструктивних і технологічних особливостей конструкцій дуттьових пристроїв для продування ванни киснем дозволяє сформулювати вимоги до раціональної конструкції фурми.

Виходячи з вищезазначеного сформульовані цілі та завдання досліджень, які послідовно вирішені в наступних розділах роботи.

**У другому розділі** досліджено вплив параметрів продування (інтенсивність



**Рис. 1** Класична схема опалення ДСА: 1 – киснева фурма, 2 – газовий пальник; 3 – металевий лом, 4 – потік газів, що відходять; 5 – розплав після заливання чавуну (лом + рідкий чавун)

продування, концентрація вуглецю) ванни сталеплавильного агрегату киснем на процеси, які протікають в реакційній зоні та розроблено інноваційну конструкцію дуттьового пристрою.

Дослідження проводилися в промислових умовах при проведенні балансових плавок на ДСА (250-т двохванний сталеплавильний агрегат) ПАТ МК «Запоріжсталь» (рис. 1).

З метою підвищення ефективності допалювання СО розроблено раціональну конструкцію дуттьового пристрою шляхом виконання чисельно - аналітичного аналізу досліджуваного процесу з кількісною обробкою даних. У відповідності з поставленим завданням досліджено особливості теплообмінних процесів і циркуляції розплаву в зоні продування в залежності від наступних характеристик дуттьового пристрою: діаметру сопел, кутів їх нахилу, положення фурми над поверхнею розплаву.

При цьому на ступінь допалювання СО істотно впливає ступінь взаємодії кисневого струменя з розплавом і об'ємами СО, що виділяються з розплаву. Ступінь впливу струменя кисню оцінювалась на підставі величини глибини лунки, а робота реакції зневуглецювання - діаметром реакційної зони (зони взаємодії струменя кисню з розплавом) при порівнянні даних величин в однакові відрізки часу. На інтенсивність перемішування ванни сталеплавильного агрегату (ДСА) впливає ступінь взаємодії кисневого струменя і робота реакції зневуглецювання. Досліди проводили при різній висоті положення фурми над розплавом.

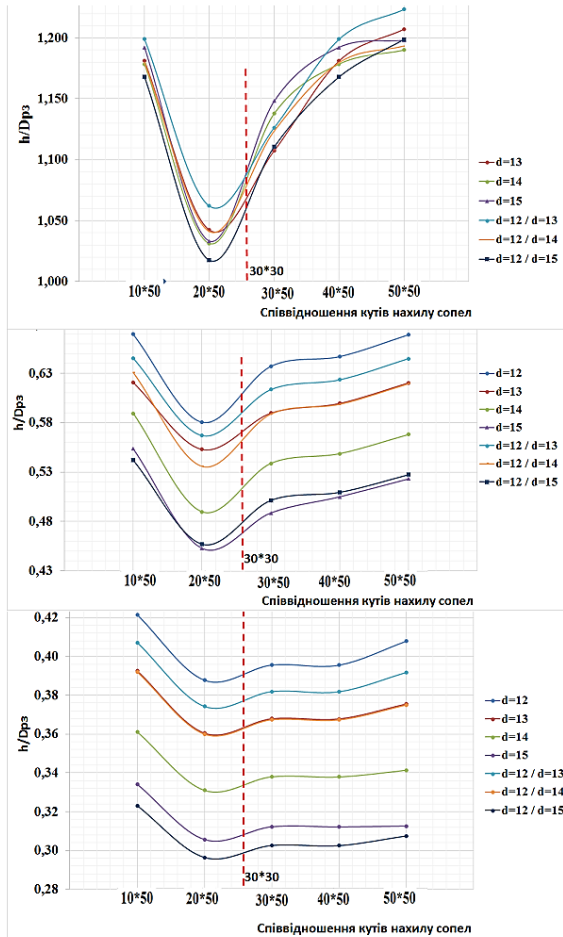
У роботі для оцінки й вибору інноваційної конструкції дуттьового пристрою використовували безрозмірний критерій К, що враховує відношення глибини лунок до діаметру реакційної зони:

$$K = \frac{h_{\text{л}}}{D_{\text{рз}}}, \quad (1)$$



де  $D_{p.з.}$  - діаметр реакційної зони продування, м;  $h_{л.}$  - глибина лунки, м.

Відповідно, для забезпечення найбільш ефективного процесу тепло- й масопереносу в досліджуваному агрегаті підбиралися такі кути нахилу й діаметри сопел, щоб забезпечити мінімальне значення критерію  $K$ . Тому що, мінімальне значення  $K$  є найбільш раціональним, при якому величини глибини лунки й діаметра реакційної зони є найбільшими.



**Рис. 2 Вплив співвідношення кутів нахилу фурми й діаметрів сопел на відношення діаметра реакційної зони до глибини лунки ( $h_{л.}/D_{p.з.}$ ) для ДСА**

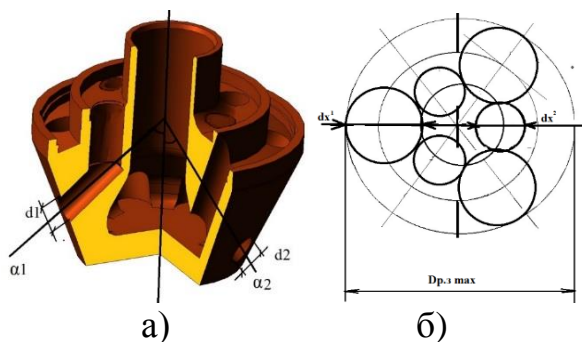
$H_f=0,2$  м,  $K=0,46$  (глибина лунки склала 0,149 м, діаметр реакційної зони 0,326 м), і при  $H_f=0,3$  м,  $K=0,346$  (глибина лунки склала 0,143 м, діаметр реакційної зони 0,485 м), що відповідає почерговому співвідношенню кутів нахилу 20/50° при почерговому розташуванні величин діаметрів сопел фурми 12мм/d=15мм.

На підставі виконаних розрахунків виготовлено дослідний зразок кисневої фурми з кутами нахилу  $\alpha = 20/50^\circ$  й діаметрами сопел фурми  $d = 12\text{мм}/d=15\text{мм}$  (рис. 3).

Розрахував значення критерію  $K$  для різних варіантів параметрів дуттьового пристрою, що розробляється й зрівнявши його зі значенням критерію при характеристиках базового дуттьового пристрою відзначено, що величина критерію  $K$  змінюється від 1,018 до 1,30 при висоті фурми над розплавом 0,1 м. При цьому найменше значення 1,018 відповідає варіанту з почерговим кутом нахилу  $\alpha = 20/50^\circ$  й почерговими діаметрами сопел фурми  $d = 12\text{ мм}/d=15\text{ мм}$ , що при заданому режимі роботи сталеплавильного агрегату нижче відповідного значення для базової конструкції фурми з  $\alpha = 30^\circ$ ,  $d = 15\text{ мм}$ :

- на 21 % ( $K=1,018$  проти  $K=1,30$ ) при висоті фурми над розплавом 0,1 м;
- на 31 % ( $K=0,46$  проти  $K=0,67$ ) при висоті фурми над розплавом 0,2 м;
- на 3,2 % ( $K=0,3$  проти  $K=0,4$ ) при висоті фурми над розплавом 0,3 м.

За результатами виконаних розрахунків графічним методом визначено раціональне значення критерію  $K$  (рис. 2) для ДСА при  $H_f=0,1$  м,  $K=1,018$  (глибина лунки склала 0,168 м, діаметр реакційної зони 0,165 м), при



**Рис. 3** Конструкція (а) та схема взаємодії кисневих струменів дуття (б) з поверхнею металу в зоні продування ванни киснем для експериментальної фурми з почерговим розташуванням сопел з різними діаметрами отворів і різними кутами нахилу струменів до поверхні металу

фурми.

Коефіцієнт допалювання визначали по наступній залежності

$$\eta_{CO} = \frac{CO_2}{CO+CO_2} \cdot 100\%. \quad (2)$$

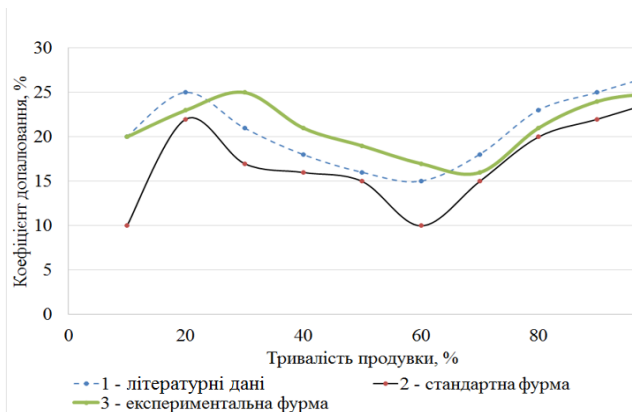
Визначення величини коефіцієнта допалювання (рис. 4) здійснювалося для режиму продування з інтенсивністю 38 м<sup>3</sup>/хв (2300 м<sup>3</sup>/год). Видно, що при використанні експериментальної фурми в порівнянні зі звичайною фурмою ефективність допалювання газів підвищується на 2-7 % залежно від тривалості продування.

З метою оцінки інтенсифікації теплообміну і інтенсивності перемішування ванні ДСА при різних значеннях інтенсивності продування і різних конструкціях фурм виконано: моделювання температурних полів у робочому просторі при продуванні ванни киснем.

На рис. 5 (а) представлена розрахункова залежність, яка отримана по моделі при порівнянні з фактичними даними (вимірами), отриманими в ході експериментальних вимірів на балансовій плавці.

На рис. 5 (б) представлена розрахункова залежність, яка отримана по моделі при порівнянні базової та дослідної фурм. Видно, що при використанні дослідних фурм нагрів металу є більш інтенсивним. Швидкість нагріву розплаву збільшується на 3,7 °С/год (з 79,5 до 83,2 °С/год). При цьому вихід кривої нагріву металу на значення 1640 °С прискорюється на 12 хв. На рисунку 5 (в) представлена розрахункова залежність при використанні дослідної конструкції фурми при зміні інтенсивності продування ванни киснем від 2300 до 8000 м<sup>3</sup>/год.

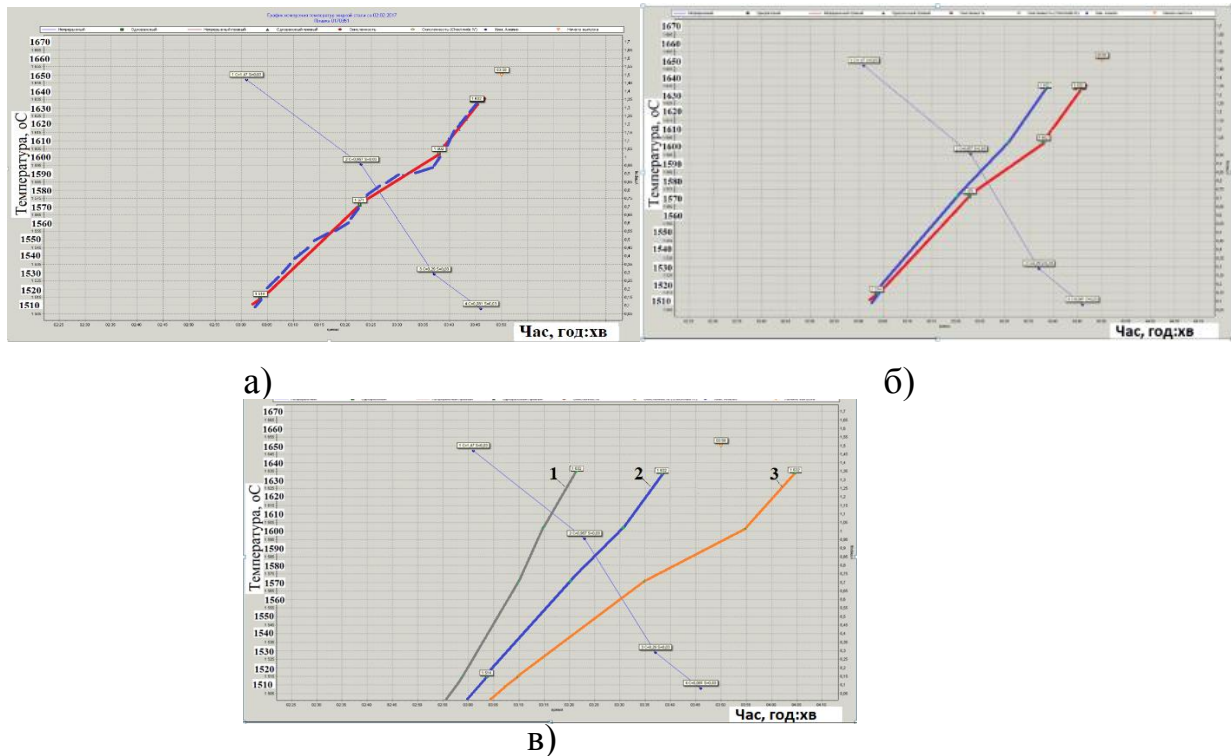
З рисунку 5 (в) видно, що при збільшенні інтенсивності продування ванни



**Рис.4** Порівняння результатів вимірювання складу димових газів з літературними даними при продуванні ванни ДСА

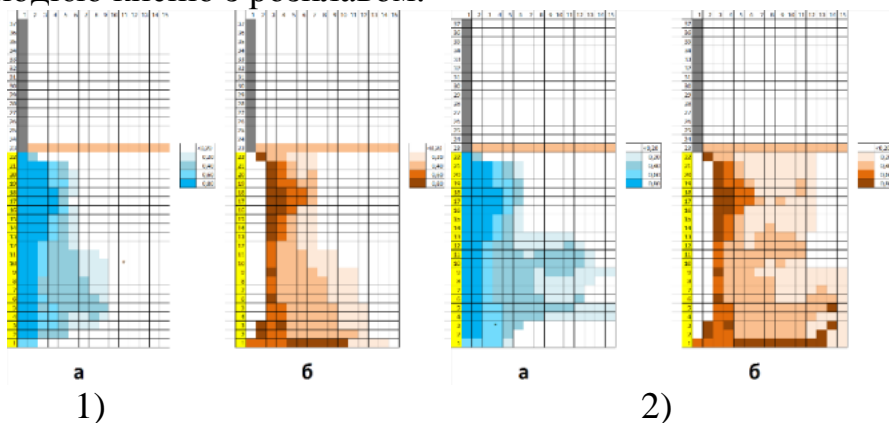
Процес допалювання газів в агрегаті досліджували при різному конструктивному оформленні кисневої

киснем від 2300 до 8000 м<sup>3</sup>/год нагрів металу є більш інтенсивним: швидкість нагріву розплаву збільшується на 15,4 °С/год (з 74 до 89,4 °С/год). При цьому тривалість плавки зменшується на 0,7 год (з 4,08 год до 3,38 год).



**Рис. 5** Динаміка нагріву металу у ванні сталеплавильного агрегата (ДСА): а) — розрахунки; - - - експеримент; б) — базовая фурма; — дослідна фурма; в) при різній інтенсивності продування: 1 – 8000 м<sup>3</sup>/год; 2-6500 м<sup>3</sup>/год; 3 -2300 м<sup>3</sup>/год

Також, визначена об'ємна концентрація газів (O<sub>2</sub>, CO) у робочому просторі ДСА для базового рис.б.1 (а, б, в) та дослідного рис.б.2 (а, б, в) варіантів конструкції фурм. При цьому при продуванні ванни через експериментальну фурму у порівнянні з фурмами базової конструкції видно, що об'ємна концентрація монооксида вуглецю збільшується на 8-12 %, що пов'язано з більш повною взаємодією кисню з розплавом.



**Рис. 6.** Об'ємна концентрація газів у робочому просторі ДСА для базового (1) і дослідного (2) варіантів конструкції фурми: а - O<sub>2</sub>, б - CO

Таким чином, теоретично досліджено, розроблено і експериментально випробувано інноваційну конструкцію дуттьового пристрою.

У **третьому розділі** з метою дослідження теплообміну у ванні сталеплавильного агрегату виконано вивчення температурних полів реакційних зон при продуванні. Агресивне окисне середовище практично виключає можливості прямого точного аналізу температури реакційної зони термопарами.

Проведено 55 балансових плавок при продуванні ванни сталеплавильного агрегату ДСА ПАТ МК «Запоріжсталь», у ході яких отримані відомості про характер макрофізичних процесів, що протікають у реакційній зоні. Експерименти проводилися при використанні дослідних фурм ( $d_c = 12/15$  мм,  $\alpha_c = 20/50^\circ$ ) з витратою кисню від  $1800$  м<sup>3</sup>/год. Зйомка теплограм проводилася тепловизором NEC H2640 (NEC Avio infrared Technologies Co. Ltd., Японія) і інфрачервоним пірометром Raynger (Raytek, США) з додатковими блоками. При фіксації фотозйомкою видно, що факел зноситься вправо від фурми (за рухом газів, що відходять). На підставі фотофіксації й вимірів температур видимої частини факела, що зносився протягом усієї плавки побудована залежність зміни довжини й температури факела, при різній концентрації вуглецю в розплаві (рис. 7), які при зменшенні концентрації вуглецю [C] з 4,0 % до 0,1 % монотонно знижуються залежно від зниження концентрації вуглецю в розплаві, а при концентрації [C] = 0,1 % і нижче факел відсутній.



**Рис. 7** Формування факела по довжині ванни, що зноситься потоком димових газів при різній концентрації вуглецю в розплаві

По результатам вимірів контурів видимої частини температурних полів факела, на базових (а) і експериментальних (б) фурмах побудована схема (рис. 8) і залежності (рис. 9).

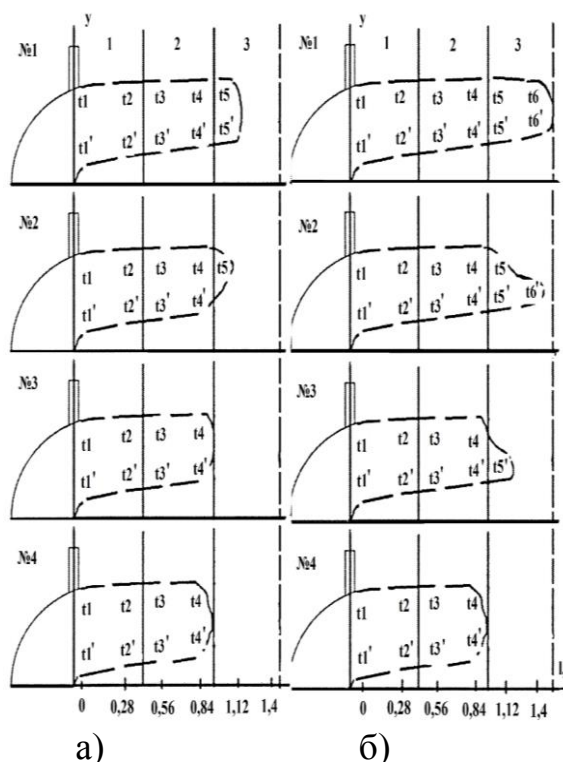
На рис. 9 наведено залежність температурних полів факела при використанні експериментальної й базової фурм при концентрації вуглецю 3 %. Видно, що при збільшенні інтенсивності продування ванни киснем від  $1800$  до  $2400$  м<sup>3</sup>/год (на одну фурму) довжина факела і його температура збільшується від  $0,65$ - $0,70$  до  $1,05$ - $1,15$  м (базові фурми) і від  $0,70$ - $0,85$  до  $1,30$ - $1,40$  м (експериментальні фурми), а температура факела збільшується від  $1700$  до  $1870$  °С. При цьому, найбільш раціональними є параметри та результати дослідження №2.

На підставі отриманих залежностей для ДСА, задаючись величиною інтенсивності продування ванни киснем, можна визначити температуру факела, що зноситься, у кожному місці факела по наступних рівняннях (табл. 1).

Відносна похибка при апробації рівняння регресії склала  $1,7$  -  $2,5$  %.

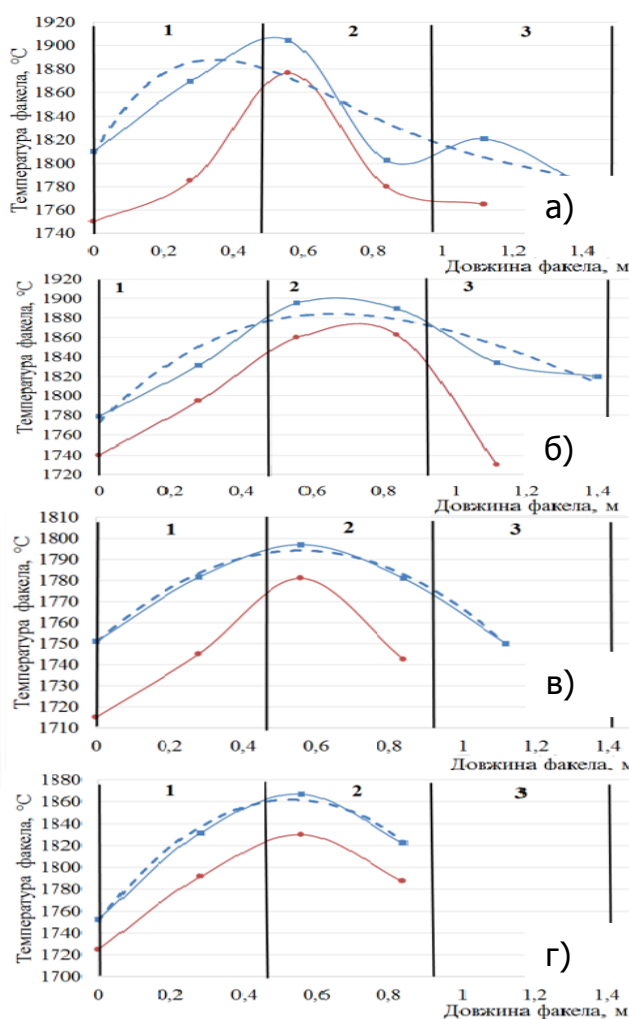
**Залежність температури факела, що зноситься, від інтенсивності продування ванни киснем і довжини факела**

Інтенсивність продування, м <sup>3</sup> /ГОД	Рівняння	R	номер
1800	$t_{\phi} = -393,8 \cdot l_{\phi}^2 + 418,4 \cdot l_{\phi} + 1750$	0.95	(18)
2000	$t_{\phi} = -140,7 \cdot l_{\phi}^2 + 156,7 \cdot l_{\phi} + 1750$	0.95	(19)
2200	$t_{\phi} = 89,2 \cdot l_{\phi}^3 - 371,9 \cdot l_{\phi}^2 + 375,3 \cdot l_{\phi} + 1772$	0.89	(20)
2400	$t_{\phi} = -220 \cdot l_{\phi}^4 + 874 \cdot l_{\phi}^3 - 1197 \cdot l_{\phi}^2 + 552 \cdot l_{\phi} + 1806$	0,83	(21)



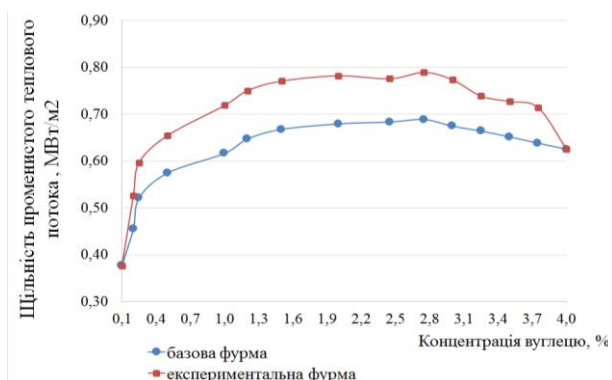
**Рис. 8 Схематичне зображення контурів видимої частини температурних полів факела, що зноситься (за результатами вимірів на ДСА при різних інтенсивностях продування ванни киснем):**

1, 2, 3 – зони факела;  
 $t_1-t_6$  – місця вимірів температур верхньої частини факела, °С;  
 $t_1'-t_6'$  – місця вимірів температур нижньої частини:  
 а) - базові фурми;  
 б) - експериментальні фурми факела, °С

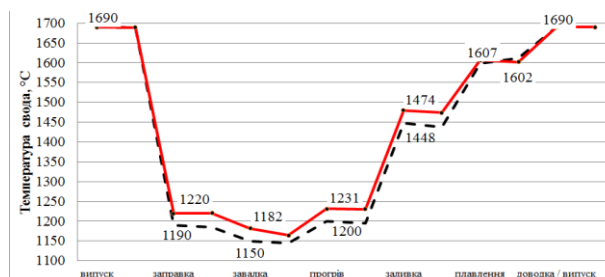


**Рис. 9 Температурні поля факелу: пунктиром відзначена розрахункова залежність для експериментальної фурми при інтенсивності продування розплаву киснем: а) 2400 м<sup>3</sup>/год (дослід № 1); б) 2200 м<sup>3</sup>/год (дослід № 2); в) 2000 м<sup>3</sup>/год (дослід № 3); г) 2400 м<sup>3</sup>/год (дослід № 4): —■— дослідна фурма; —●— базова фурма; - - - поліноміальна (дослідна)**

За результатами експериментальних даних отримано розподіл щільності променистих результуючих теплових потоків у ДСА при використанні базових і дослідних фурм (рис. 10).



**Рис. 10** Залежність щільності променистих результуючих теплових потоків від концентрації вуглецю в ДСА при використанні базових і дослідних фурм



**Рис. 11** Температурний режим склепіння ДСА по періодах плавки: — - при подачі природного газу (базові фурми); — - без подачі природного газу (експериментальні фурми)

При цьому щільність променистого теплового потоку в робочому об'ємі печі при використанні експериментальних фурм у порівнянні з базовими збільшується на 0,07-0,1 МВт/м<sup>2</sup> або 11,3-16,1 %.

Знаючи зміст вуглецю в розплаві (при заданій інтенсивності продування киснем 2200 м<sup>3</sup>/год) можна визначити щільність променистого теплового потоку від факела в будь-який період плавки по наступному рівнянню, МВт/м<sup>2</sup>, що дозволить розробити режимну карту виплавлення сталі ДСА в усі періоди плавки:

$$q = 0,013 \cdot [C]^3 - 0,143 \cdot [C]^2 + 0,42 \cdot [C] + 0,43. \quad (3)$$

Температурний режим склепіння ДСА за базовий і дослідний періоди (за даними вимірів оптичним пірометром) наведено на рис. 11. Видно, що при роботі печі на дослідних фурмах (без подачі природного газу) у порівнянні з базовими (з подачею природного газу) температура склепіння збільшується на 26-32 °С. Що призводить до більш рівномірного розподілу температур.

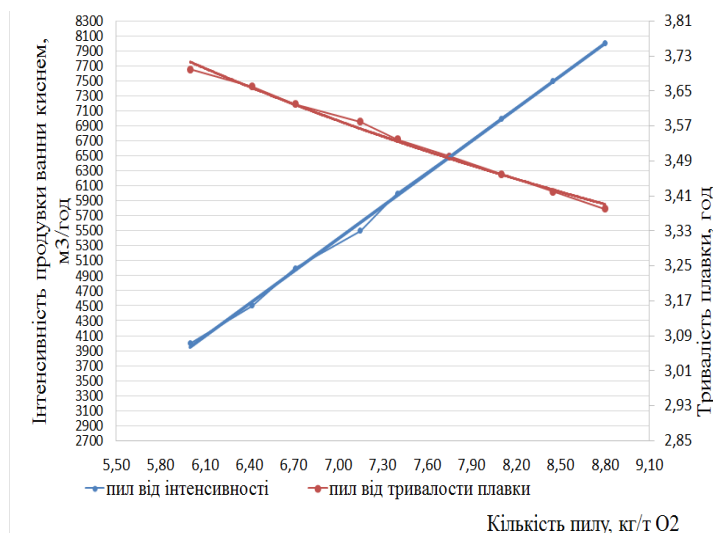
Таким чином, спостерігається інтенсифікація теплообміну при збільшенні температур і довжини при використанні запропонованої конструкції фурми.

У четвертому розділі експериментальним і теоретичним шляхом встановлено закономірності впливу параметрів теплового режиму і інтенсивності продування на процес пилоутворення під час продування ванни сталеплавильного агрегату киснем.

Виконано дослідження механізму пилоутворення механічного (бризки) та випарного (бурий дим) походження.

Випари заліза відбуваються не з усією ванни, а в реакційних зонах (місцях занурення фурм у розплав). Встановлено, що при збільшенні діаметра бульбашок від 5 до 12 мм, відбувається збільшення кількості пилу механічного походження

від 0,86 до 3,32 кг/т. При збільшенні інтенсивності продування від 4000 до 8000 м<sup>3</sup>/год винос пилу випарного походження збільшується від 6,07 до 8,80 кг/т. Це дозволило підібрати раціональну інтенсивність продування для мінімізації викидів пилу з ванни.



**Рис. 12** Визначення раціональної інтенсивності продування ванни киснем при мінімальній кількості пилу

енергозберігаючий тепловий та кисневий режим виплавлення сталі, що забезпечує підвищення ефективності використання теплоти при допалюванні оксиду вуглецю при використанні раціональної конструкції фурми в сталеплавильному агрегаті (ДСА), що дозволило перейти агрегату на процес виплавлення сталі без використання природного газу.

## ВИСНОВКИ

У дисертації виконано теоретичне узагальнення й отримано комплексний розв'язок важливого науково-прикладного завдання – зниження витрати природного газу, кисню й інших енергоресурсів на виплавку сталі в сталеплавильному агрегаті за рахунок розробки раціональної конструкції дуттьового пристрою, нових режимів виплавлення сталі при підвищенні ступеня допалювання оксиду вуглецю в газах, що відходять. Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Виконано аналіз конструктивних особливостей і ефективності використання пристроїв для продування ванни сталеплавильних агрегатів киснем, який показав їх вплив на утворення і допалювання оксидів вуглецю в робочому просторі агрегатів і формування теплового балансу плавки стосовно до реальних виробничих умов.

2. Експериментально і теоретично досліджено вплив параметрів дуттьового пристрою (кутів нахилу і діаметрів сопел) під час продування ванни сталеплавильного агрегату киснем на процеси, що протікають в реакційній зоні.

Як видно з рис. 12 зі збільшенням інтенсивності продування від 4000 м<sup>3</sup>/год до 8000 м<sup>3</sup>/год відбувається ріст маси пилу від 6,0 до 8,8 кг/т, при цьому тривалість плавки знижується від 3,70 до 3,38 годин. На підставі результатів досліджень розроблено теплотехнічний режим виплавлення сталі з визначенням раціональної витрати кисню для досягнення мінімальних викидів пилу в навколишнє середовище.

Таким чином, на підставі досліджень проведених у даній роботі на МК ПАТ «Запоріжсталь» розроблений і впроваджений в промислове виробництво новий

Розроблено інноваційну конструкцію дуттьового пристрою з комбінованим розташуванням діаметрів отворів і кутів нахилу сопел, що дозволило знизити тривалість плавки на ДСА від 3,71 до 3,51 години, знизити питомі витрати кисню на плавку від 58,34 до 56,97 м<sup>3</sup>/т при зниженні інтенсивності продування від 5707 до 5659 м<sup>3</sup>/год при збільшенні коефіцієнта допалювання на 2-7 %.

3. Експериментальним шляхом при проведенні балансових плавок на 250-тонному ДСА ПАТ МК «Запоріжсталь» визначено вплив конструкції дуттьового пристрою і інтенсивності продування на процеси допалювання СО. Визначено, що при збільшенні інтенсивності продування від 2300 до 8000 м<sup>3</sup>/год і зміні кутів нахилу сопел від 20 до 50° інтенсифікується процес утворення та допалювання СО у ванні сталеплавильного агрегату, що призводить до збільшення швидкості нагріву розплаву з 74,0 до 89,4 °С/год, а об'ємна частка СО збільшується від нуля (в струменя кисню) до 80% на виході з розплаву. При цьому спостерігається формування факела по довжині ванни, що зноситься потоком димових газів. Встановлено, що при зміні інтенсивності продування ванни від 1800 до 2400 м<sup>3</sup>/год довжина факела, що зноситься потоком димових газів, збільшується від 0,65 - 0,70 до 1,30-1,40 м, а температура факела від 1700 до 1870 °С. Що дозволяє підійти до питання розробки раціонального енергозберігаючого режиму виплавлення сталі та вибрати конструкцію дуттьового пристрою, що забезпечує найбільше тепловиділення.

4. Експериментальним і теоретичним шляхом визначено вплив параметрів теплового режиму і інтенсивності продування на процес пилоутворення під час продування ванни сталеплавильного агрегату киснем. Встановлено, що при збільшенні діаметра бульбашок від 5 до 12 мм, відбувається збільшення кількості пилу механічного походження від 0,86 до 3,32 кг/т. При збільшенні інтенсивності продування від 4000 до 8000 м<sup>3</sup>/год винос пилу випарного походження збільшується від 6,07 до 8,80 кг/т. Це дозволить підібрати раціональну інтенсивність продування для мінімізації викидів пилу з ванни.

5. На підставі досліджень проведених у даній роботі на МК ПАТ «Запоріжсталь» розроблений і впроваджений в промислове виробництво новий енергозберігаючий тепловий та кисневий режим виплавлення сталі, що забезпечує підвищення ефективності використання теплоти при допалюванні оксиду вуглецю при використанні раціональної конструкції фурми в сталеплавильному агрегаті (ДСА), що привело до зниження технологічної витрати природного газу на виплавку сталі на 6,89 м<sup>3</sup>/т (з 6,89 до 0 м<sup>3</sup>/т) і тривалості продування на 0,2 год (з 3,71 до 3,51 год), що дозволило перейти агрегату на процес виплавлення сталі без використання природного газу при забезпеченні високої якості металопродукції.

Фактичний чистий економічний ефект від даної роботи склав 4634,71 тис. грн/рік.

Результати дисертаційної роботи, проектні й технічні рішення, впроваджені:

- у вигляді розробленої й впровадженої конструкції дуттьового пристрою для продування ванни киснем, з використанням комбінованого розташування отворів і сопел, яка забезпечує підвищення ефективності продування ванни сталеплавильного агрегату, зниження тривалості плавки з 3,71 до 3,51 години і зниження витрат на виплавлення сталі. Дуттьовий пристрій впроваджено в сталеплавильному цеху МК ПАТ «Запоріжсталь»;



- у вигляді рекомендацій щодо оптимізації технології виплавлення сталі з допалюванням оксидів вуглецю над зоною продування в сталеплавильному цеху МК ПАТ «Запоріжсталь» (патент України на корисну модель № 108529. В результаті впровадження виключено використання природного газу. Зниження собівартості виробництва сталі на 43,48 грн/т, що відповідає річному економічного ефекту 4634,71 тис. грн/рік при обсязі виробництва сталі 1065965 т/рік.
- у навчальному процесі при вивченні дисципліни «Високотемпературні процеси й установки».

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Яковлева И.Г. К вопросу определения концентрации газов в ванне сталеплавильных агрегатов / И.Г. Яковлева, А. А. Петрик // Вісник НТУ «ХП», - 2017. – № 16 (1238). - С. 94-98. *Дисертант зробив основний об'єм досліджень та сформулював висновки.*

2. Яковлева И.Г. Определение влияния теплофизических параметров на интенсификацию процессов теплообмена в ванне сталеплавильных агрегатов / И.Г. Яковлева, А.А. Петрик // Холодильная техника и технология,- 2017. – № 53 (1). - С. 54-62. *Дисертантом сформульовані задачі досліджень та зроблені висновки.*

3. Яковлева И.Г. Исследование температурных полей реакционных зон при продувке ванны сталеплавильного агрегата кислородом / И.Г. Яковлева, А.А. Петрик // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика,- 2016. – № 8. - С. 193-199. *Дисертант зробив основний об'єм досліджень, провів експерименти та сформулював висновки.*

4. Яковлева И.Г. Исследование влияния параметров продувки металла кислородом в конвертере на процесс пылеобразования испарительного происхождения / И.Г. Яковлева, А.А. Петрик // Metallurgическая и горнорудного промышленность,- 2017. – № 2. - С. 72-77. *Дисертант визначив мету досліджень, виконав розрахунки та узагальнив отриманні результати.*

5. Яковлева И.Г. Исследование влияния параметров продувки металла кислородом в конвертере на процесс пылеобразования механического (брызги) происхождения / И.Г. Яковлева, А.А. Петрик // Metallurgическая и горнорудного промышленность,- 2017. – № 3. - С. 103-106. *Дисертант визначив мету досліджень, виконав розрахунки та узагальнив отриманні результати.*

6. Яковлева И.Г. Общая характеристика и особенности дутьевых устройств при верхней продувке ванны сталеплавильного агрегата кислородом / И.Г. Яковлева, А.А. Петрик // Metallurgия,- 2017. – № 1 (37). - С. 24-27. *Дисертантом проведений аналіз конструктивних особливостей і ефективності використання пристроїв для продування ванни сталеплавильних агрегатів киснем.*

7. Petrik A. Investigation of the carbon monoxide post-combustion flame in the working space of a steelmaking unit / A. Petrik, I. Yakovleva // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,- 2017. – № 5/8 (89). - P. 51-57. *Дисертант визначив мету досліджень, сформулював ідею формування факела по довжині*

ванни, що зноситься потоком димових газів, провів експерименти та сформулював висновки.

8. Патент 108529 України, МПК С21С 5/04. Оптимізація витрат природного газу в рідкі періоди плавки / Петрик О.А., Коломієць Д.Н., Чернишов С.І., Вавілов А.Ф., Степаков С.В. (Україна); заявник і патентовласник МК ПАТ «Запоріжсталь». – № и 2015 108529; заявл. 21.12.2015; опубл. 25.07.2016, Бюл. №14. – 4 с. *Дисертант сформулював ідею нового енергозберігаючого теплового та кисневого режиму виплавлення сталі, що забезпечує підвищення ефективності використання теплоти при допалюванні оксиду вуглецю.*

9. Петрик А.А. Исследование факела дожигания оксида углерода в рабочем пространстве сталеплавильного агрегата / А. А. Петрик // «43 міжнародна науково-технічна конференція комбінату «Запоріжсталь»» (м. Запоріжжя, 26-27 жовтня 2015 р.). — Запоріжжя: Запоріжсталь, 2015. – С. 58. *Дисертант підготував доповідь та запропонував теорію підвищення ефективності факелу допалювання оксиду вуглецю.*

10. Петрик А.А. Исследование температурных поле реакционных зон при продувке ванны сталеплавильного агрегата кислородом / А. А. Петрик, Д.Н. Коломиец // «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики» (м. Одеса, 20-24 вересень 2016 р.). — К: ІПЦ АЛКОН, 2017. – С. 141-144. *Дисертант підготував доповідь та зробив аналіз полів реакційних зон при продуванні ванни киснем.*

11. Петрик А.А. Оптимизация кислородных режимов работы сталеплавильных агрегатов в условиях ПАО «Запорожсталь» / А. А. Петрик // «44 міжнародна науково-технічна конференція комбінату «Запоріжсталь»» (м. Запоріжжя, жовтень 2017 р.). — Запоріжжя: Запоріжсталь, 2017. – С. 59. *Дисертант підготував доповідь та запропонував новий енергозберігаючий тепловий та кисневий режими виплавлення сталі в умовах ПАТ «Запоріжсталь».*

12. Петрик А.А. Разработка энергосберегающих режимов выплавки стали / А. А. Петрик // «27 всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів» (м. Одеса, 14 квітня 2017 р.). — Одеса: ОНАХТ 2017. – С. 53-54. *Дисертант підготував доповідь та запропонував ідею нового кисневого режиму виплавлення сталі.*

13. Petrik A.A. Thermophysical processes at the intensification of thermal work of the steel-smelting bath / A. Petrik, I. Yakovleva, L. Klimenco // Теорія і практика ефективного управління: зб. наукових праць / ЗДІА. - Запоріжжя, 2016. - т. 5. - С. 181. *Дисертант зробив аналіз та висновки щодо теплового балансу сталеплавильних агрегатів, які споживають природний газ.*

14. Петрик А.А. Исследование теплообмена в объеме сталеплавильного агрегата / А. А. Петрик // «Теорія и практика сучасної науки» (м. Дніпро, 24-25 лютого 2017 р.).-Херсон: Видавничий дім "Гельветика", 2017. – С. 137-140. *Дисертант зробив аналіз теплообміну у ванні сталеплавильного агрегату.*

15. Петрик А.А. К вопросу определения рациональной конструкции дутьевого устройства / А. А. Петрик // «Інноваційний розвиток науки нового тисячоліття» (м. Ужгород, квітень 2017 р.). — Херсон: Видавничий дім "Гельветика", 2017. – С. 135-141. *Дисертант зробив аналіз та запропонував методику визначення раціональної конструкції дутьевого пристрою.*

16. Петрик А.А. Снижение выбросов вредных веществ при продувке расплава струей в ванне сталеплавильного агрегата в условиях ПАО «Запорожсталь» / А. А. Петрик // 43 міжнародна науково-технічна конференція ПАТ «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя, 10-11 листопада 2016 р). - Запоріжжя: Вид. "Запоріжсталь", 2016. - С. 55. *Дисертант підготував доповідь та запропонував ідею зниження викидів шкідливих речовин при збереженні продуктивності сталеплавильного агрегату.*

17. Петрик А.А. Определение влияния теплофизических параметров на интенсивность перемешивания расплава в ванне сталеплавильного агрегата/ XIII international scientific and practical conference «Prospects of world science - 2017» (Sheffield, England, July 30 – August 7,- 2017. – P.3-5. *Дисертант зробив аналіз та запропонував залежність, яка дозволяє визначити вплив інтенсивності продування, характеристик дуттьового пристрою і його положення над розплавом на інтенсивність перемішування розплаву у ванні сталеплавильного агрегату.*

## АНОТАЦІЯ

**Петрик О.А. Підвищення ефективності використання теплоти в сталеплавильному агрегаті шляхом допалювання оксиду вуглецю –** Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика (144 – теплоенергетика). Національна металургійна академія України, спеціалізована вчена рада Д 08.084.05 при Національній металургійній академії України, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена дослідженню підвищення ефективності використання теплоти в сталеплавильному агрегаті шляхом допалювання оксиду вуглецю на основі розробки енергоефективного теплового і кисневого режимів виплавлення сталі, що дозволяють знизити витрати природного газу.

Досліджено вплив параметрів дуттьового пристрою (кутів нахилу і діаметрів сопел) під час продування ванни сталеплавильного агрегату киснем на процеси, що протікають в реакційній зоні. Розроблено інноваційну конструкцію дуттьового пристрою з комбінованим розташуванням отворів і сопел.

При проведенні балансових плавок на 250-тонному ДСА ПАТ МК «Запоріжсталь» визначено вплив конструкції дуттьового пристрою й інтенсивності продування на процеси допалювання СО. При цьому спостерігається формування факела по довжині ванни, що зноситься потоком димових газів. Експериментально встановлено вплив вмісту вуглецю і тривалості продування на довжину і температуру факела, що зноситься потоком газів, які відходять із зони продування.

Визначено раціональні геометричні характеристики дуттьового пристрою за критерієм К (відношення глибини лунок в розплаві до діаметру реакційної зони) і інтенсивності перемішування розплаву.

Вперше на основі аналізу механізмів пилоутворення під час продування металу киснем при проведенні промислових експериментів визначено раціональне значення інтенсивності продування, що забезпечує зниження викидів

пилу.

Розроблений і впроваджений в промислове виробництво новий енергозберігаючий тепловий та кисневий режим виплавлення сталі, що забезпечує підвищення ефективності використання теплоти при допалюванні оксидів вуглецю при використанні інноваційної конструкції фурми в сталеплавильному агрегаті (ДСА), що привело до зниження технологічної витрати природного газу на виплавлення сталі на  $6,89 \text{ м}^3/\text{т}$  (з  $6,89$  до  $0 \text{ м}^3/\text{т}$ ) і тривалості продування на  $0,2$  год (з  $3,71$  до  $3,51$  год), що дозволило перейти агрегату на процес виплавлення сталі без використання природного газу при забезпеченні високої якості металопродукції.

Ключові слова: дуттьовий пристрій, теплотехнічні параметри, факел, допалювання монооксиду вуглецю, температурне поле, інтенсифікація теплообміну, коефіцієнт тепловіддачі, процеси теплообміну, теплота.

## ABSTRACT

**Petrik A.A. The improving of efficiency of heat use in the steelmaking unit by carbon monoxide post-combustion. - Manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.06 - Technical thermal physics and industrial Heat of Power Engineering. - National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2018.

This work is devoted to the study of increasing the efficiency of heat use in the steelmaking unit by carbon monoxide post-combustion. It basis of the development of energy efficient thermal and oxygen modes. That allow reducing the consumption of natural gas.

An innovative design of the blowing device with a combined arrangement of holes and nozzles was developed.

The influence of the carbon content and the duration of the purge on the length and temperature of the flame of the flue gas from the purge zone was experimentally determined.

The optimum geometric characteristics of the blowing device were determined by the criterion K (the ratio of the depth of the holes in the melt to the diameter of the reaction zone) and the intensity of mixing of the melt.

A new energy-saving thermal and oxygen steelmaking regime was developed and introduced into industrial production, which provides for an increase in the efficiency of heat use in the afterburning of carbon oxides using a rational design of the lance in the steelmaking unit, which led to a decrease in the technological consumption of natural gas for steelmaking by  $6.89 \text{ м}^3/\text{t}$  (from  $6.89$  to  $0 \text{ м}^3/\text{t}$ ), purging time for  $0.2$  h (from  $3.71$  to  $3.51$  h) and allowed the unit to switch to the process of steelmaking without the use of natural gas.

Keywords: blowing device, thermotechnical parameters, flame, carbon monoxide post-combustion, temperature field, heat transfer intensification, heat transfer coefficient, heat transfer processes, heat.



