

## В І Д Г У К

офіційного опонента Ганжі Антона Миколайовича  
на дисертаційну роботу Петрика Олексія Анатолійовича  
«Підвищення ефективності використання теплоти в сталеплавильному агрегаті  
шляхом допалювання оксиду вуглецю», яка подана на здобуття наукового  
ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна  
теплофізика та промислова теплоенергетика

### 1. Актуальність роботи

Відомо багато режимів продувки й різних методів допалювання оксиду вуглецю в робочому просторі сталеплавильних агрегатів, що дозволяють використовувати додаткову теплоту від спалювання оксиду вуглецю (CO) киснем (O<sub>2</sub>) для інтенсифікації теплових і технологічних процесів плавки сталі, поліпшення технологічних, екологічних і техніко-економічних показників виробництва. Однак ці методи продувки мають істотні недоліки, які полягають у тому, що дотепер не визначені раціональні умови проведення дуттьового режиму з допалюванням CO киснем над зоною продувки в сталеплавильних агрегатах з урахуванням впливу загальної кількості кисню, інтенсивності продувки.

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 виплавки сталі на основі підвищення інтенсивності продувки ванни й більш ефективним використанням теплоти від допалювання CO киснем.

### 2. 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 «Виплавка 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 м<sup>3</sup>/год при продувці ванни киснем», №20/2017/336в від 14.11.2017 «Поступове зниження витрати кисню на факел в завалку і прогрів».

### 3. Аналіз змісту дисертації та її завершеність

Дисертаційна робота, що подана на відгук, являє собою рукопис, загальний обсяг якого складає 168 сторінок, включаючи 127 сторінок загального машинописного тексту, містить 14 таблиць, 53 рисунків, бібліографічний список з 273 джерел і 9 додатків. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох основних розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Роботу виконано на кафедрі теплоенергетики та гідроенергетики у Запорізькій державній інженерній академії (м. Запоріжжя).

У вступі (с. 17-22) автор обґрунтовує актуальність теми дисертації, формулює мету роботи, яка полягає в підвищенні 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; формулює завдання дослідження, об'єкт, предмет й методи досліджень, визначає наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, надає відомості про публікацію та апробацію результатів роботи, надає інформацію про особистий внесок у досягнення поставленої мети.

У першому розділі (с. 23-42) викладено 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. Показано, 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. Відмічено, що 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.

В першому розділі також наведено, 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. При цьому автор відмічає, що на сьогоднішній день відсутні однозначні відомості щодо раціональних витрат  $O_2$  і природного газу. 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.

На основі виконаного аналізу сформульовані цілі та завдання досліджень, які послідовно вирішені в наступних розділах роботи.

**У другому розділі** (с. 43-81) наведено дані про вплив параметрів продування (інтенсивність продування, концентрація вуглецю) ванни сталеплавильного агрегату киснем на процеси, які протікають в реакційній зоні та розроблено інноваційну конструкцію дуттьового пристрою.

Дисертантом наведено дані про проведення досліджень в промислових умовах на ДСА (250-т двохванному сталеплавильному агрегаті) ПАТ МК «Запоріжсталь». 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 враховувався вплив взаємодії кисневого струменя з розплавом і об'ємами СО, що виділялися 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 впливає ступінь взаємодії кисневого струменя і робота реакції зневуглецювання. Досліди проводили при різній висоті положення фурми над розплавом.

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

Виконано визначення величини коефіцієнта допалювання. Отримані теоретичні результати підтверджується дослідними даними, отриманими при



проведенні дослідно-промислових випробувань на балансових плавках: на експериментальній фурмі в порівнянні зі звичайною відзначається збільшення ступеня допалювання газів, що відходять, на 2-7 % (або 21 % від базового значення) 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 при порівнянні базової та дослідної фурм.

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.

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

**У третьому розділі** (с. 82-120) з метою дослідження теплообміну у ванні сталеплавильного агрегату викладено результати досліджень температурних полів реакційних зон при продуванні.

Автор зазначає, що для отримання достовірних результатів проведена значна кількість балансових плавок з залученням спеціального обладнання (тепловізора, пірометра, термопар) при продуванні ванни сталеплавильного агрегату ДСА ПАТ МК «Запоріжсталь», у ході яких отримані відомості про характер макрофізичних процесів, що протікають у реакційній зоні.

Експериментально для двохванного сталеплавильного агрегату встановлено вплив вмісту вуглецю і тривалості продування на довжину і температуру факела, що зноситься потоком газів, які відходять із зони продування: побудована залежність зміни довжини й температури факела, при різній концентрації вуглецю в розплаві. Визначено найбільш раціональний режим продування для різних видів фурм. На підставі отриманих залежностей для ДСА, задаючись величиною інтенсивності продування ванни киснем, можна визначити температуру факела, що зноситься, у кожному місці факела.

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

Автором експериментальним шляхом визначено температурний режим склепіння ДСА за базовий і дослідний періоди (за даними вимірів оптичним пірометром) при порівнянні базових та дослідних фурм при різних теплотехнічних режимах роботи. Таким чином, спостерігається інтенсифікація



теплообміну при збільшенні температур і довжини при використанні запропонованої конструкції фурми.

У **четвертому розділі** (с. 121-136) дисертантом за допомогою експериментального і теоретичного шляхів 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.

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, що забезпечує зниження викидів пилу в навколишнє середовище, що дозволило розробити новий раціональний теплотехнічний режим виплавлення сталі.

Таким чином, 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 дозволило перейти агрегату на процес виплавлення сталі без використання природного газу.

У **висновках** сформульовано основні наукові результати дисертаційної роботи.

В **додатках** наведені детальні дані про методики проведення розрахунків, засоби вимірювальної техніки, що застосовуються в технологічному процесі під час проведення експериментальних досліджень, документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи.

Усі чотири розділи дисертаційної роботи логічно пов'язані між собою і є цілісним завершеним дослідженням. Дисертаційна робота і автореферат написані українською мовою з використанням сучасної термінології. Загалом виклад роботи та автореферату чітко і зрозуміло висвітлюють методи досліджень та отримані результати. Мова та стиль дисертації відповідають вимогам науково-технічних текстів та публікацій.

Зміст автореферату повністю відображує зміст дисертації, а основні наукові положення, що містяться в них, ідентичні.

#### **4. Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків та їх достовірність**

Основні положення дисертації, її висновки та рекомендації науково аргументовані. Їх достовірність базується на використанні в дослідженнях відомих методів термодинамічного аналізу енергетичної ефективності процесів та чисельного розв'язання задач.



При проведенні експериментальних досліджень застосовані загально-прийняті методологічні підходи визначення температури, витрати повітря, аналізу газів та обробки експериментальних даних. Вимірювальне обладнання про-ходило відповідну метрологічну атестацію.

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджена результатами, отриманими при проведенні дослідно-промислових випробувань в умовах МК ПАТ «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя).

### **5. Наукова новизна роботи та важливість одержаних результатів для науки і практики**

У роботі 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 виплавки сталі при підвищенні ступеня допалювання оксиду вуглецю в газах, що відходять.

Нові наукові результати отримані автором полягають в наступному:

1. Вперше для двохванного сталеплавильного агрегату експериментально встановлено вплив вмісту вуглецю і тривалості продувки на довжину і температуру факела, що зноситься потоком газів, які відходять із зони продувки. 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  $K$  (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  $K$  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.



## **6. Практична цінність отриманих результатів** полягає у наступному:

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

2. Розроблено та впроваджено рекомендації щодо оптимізації технології виплавки сталі з допалюванням оксиду вуглецю над зоною продувки 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 економічного 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».

## **7. Особистий внесок здобувача** полягає в

узагальненні результатів досліджень відносно конструктивних особливостей дуттьових пристроїв для продувки ванни сталеплавильних агрегатів киснем; участі у розробці конструкції дуттьового пристрою, у встановленні закономірностей впливу розмірів бульбашок оксиду вуглецю й інтенсивності продувки ванни киснем на процес пилоутворення; експериментальному дослідженні впливу концентрації вуглецю в розплаві й тривалості продувки на довжину й температуру факела, що зноситься потоком газів, які відходять із зони продувки; 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 виплавки сталі 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.

## **8. Повнота викладення основних положень дисертації в опублікованих роботах**

Основні матеріали дисертації представлені у 17 друкованих працях, в тому числі 7 статей у спеціалізованих наукових журналах і виданнях, зі списку, рекомендованого МОН (1 стаття входить до наукометричної бази Scopus), 1 патент України та 9 – у матеріалах конференцій. Всі публікації містять



результати безпосередньої роботи автора на окремих етапах досліджень і відображають основні положення та висновки дисертаційної роботи.

Основні положення і результати роботи доповідались і обговорювались на 2 всеукраїнських та 7 міжнародних конференціях.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Опубліковані матеріали у повній мірі відповідають основним положенням дисертації, а статті, виданні автором одноосібно свідчать про високу самостійність виконаних досліджень.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.14.16 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Автореферат дисертації за змістом і викладом відповідає дисертаційній роботі та відображає її основні положення.

### 9. Недоліки та зауваження по дисертаційній роботі.

1. З тексту, наведеному на стор. 64, 65

"Чисельні розрахунки за фактично отриманими даними згідно рівняння (2.17) відзначили збільшення коефіцієнту допалювання ( $\eta_{CO}$ , %). Значення даного параметра має межі 0,15-0,27.

При цьому на експериментальній фурмі в порівнянні зі звичайною відзначається збільшення ступеня допалювання газів, що відходять, на 2-7 % (або 21 % від базового значення) залежно від тривалості продування."

незрозуміло, яким чином встановлені межі параметра  $\eta_{CO}$ ?

2. Рівняння (2.27) та (2.30) являють собою граничні умови другого роду на поверхні, що граничить з об'ємною газовою зоною. Не описано, яким чином визначались теплові потоки у правих частинах цих рівнянь.

3. На стор. 101 наведено незрозуміле твердження

«З таблиць 3.1, 3.2 і рисунку 3.9-3.12 видно, що величина температурних полів факела, що зноситься, на дослідних фурмах у порівнянні з базовими збільшується на 16-104 °C (середнє 42 °C): у зоні №1 на 28-85 °C, у зоні №2 на 16-38 °C, у зоні №3 на 27-104 °C.»

4. З тексту стор. 106. постановки завдання зовнішнього теплообміну з використанням спрощеного резольвентного зонального методу незрозуміло, чому автор зневажає конвективним і кондуктивним теплообміном.

5. Неясно, чому рівняння (3.9) на стор. 107 приведене для абсолютно чорного тіла.

6. Навіщо у підпункті 4.1.1. так детально описується процес утворення, переміщення та зникнення бульбашок?

7. Щодо оформлення дисертації – по тексту деколи зустрічаються некоректні терміни та русизми.

Однак, зроблені зауваження не можуть вплинути на науковий рівень дисертації, новизну та достовірність її результатів та її позитивну оцінку.



## ВИСНОВКИ ОПОНЕНТА

Представлена на відгук дисертація Петрика Олексія Анатолійовича є завершеною науково-дослідною роботою, у якій на основі виконаних експериментальних та теоретичних досліджень 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 виплавки сталі при підвищенні ступеня допалювання оксиду вуглецю в газах, що відходять.

Сформульовані наукові положення дисертації, висновки і рекомендації є достовірними та відповідають об'єктивній дійсності.

Мова та стиль дисертації відповідають вимогам до науково-технічних текстів та публікацій.


Зміст автореферату повністю відповідає тексту дисертації, а основні наукові положення, що містяться в них, ідентичні.

Основні наукові положення, висновки та рекомендації цієї роботи повно висвітлені в фахових джерелах, визнаних МОН України. Матеріали дисертації у достатній мірі були представлені на міжнародних конференціях.

За напрямом обраних і вирішених питань дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Вважаю, що дисертаційна робота Петрика Олексія Анатолійовича відповідає вимогам пп. 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, щодо кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент  
доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри теплотехніки  
та енергоефективних технологій  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»

 А. М. Ганжа

