

## **ВІДГУК**

офіційного опонента ГАНЖІ Антона Миколайовича на дисертаційну роботу ГОГОЦІ Олексія Георгійовича «**Удосконалення режимних і конструктивних параметрів високотемпературних печей з електротермічним киплячим шаром для термічної обробки вуглецевих матеріалів**», яка подана на здобуття ступеня доктора філософії, за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, галузь знань 14 – Електрична інженерія.

### **1. Актуальність обраної теми**

Дисертаційна робота О.Г. Гогоці спрямована на вирішення однієї з найважливіших проблем отримання високочистого графіту, попит на який підвищується кожного року, що пов'язано насамперед з значним попитом на літій-іонні акумулятори. Запропонована у роботі технологія термічного очищення графіту має значні переваги перед відомими конкуруючими технологіями у екологічних показниках. Основні її переваги – відсутність використання кислот та хлору, можливість організації поточного процесу, зменшення енерговитрат. Все це пов'язано з використанням електротермічного киплячого шару. Впровадження цього процесу у промисловість потребує удосконалення режимних та конструктивних параметрів роботи високотемпературних печей з електротермічним киплячим шаром, що пов'язано з необхідністю підвищення якості продукту та ефективності роботи всієї системи. З огляду на те, що в роботі вирішується саме ці завдання, вважаю що тема дисертації є актуальною.

Дисертація Гогоці О.Г. тісно пов'язана з науковими напрямками кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Національної металургійної академії України (НМетАУ) і базується на результатах досліджень, які виконувались в НМетАУ 2012-2021 роках в рамках виконання міжнародного проекту та господарчих договорів.

### **2. Загальна характеристика роботи**

Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і 5 додатків. Основна частина дисертації представлена на 123 сторінках і містить 14 таблиць та 51 рисунок.

У першому розділі роботи автор наводить аналіз конструктивних та технологічних особливостей використання печей з електротермічним киплячим шаром для різних процесів: отримання карбідів, сірко-водню, очищення

вуглецевих матеріалів тощо. В результаті запропоновано класифікацію печей з електротермічним киплячим шаром та сформульовано завдання досліджень.

**Другий розділ** дисертації присвячено дослідженню гідродинамічних режимів роботи печей з ЕКШ. Дослідження проведено на холодній моделі печі, розміри якої відповідали печі продуктивністю 10 кг/год. В результаті досліджень 4 розмірів вуглецевих матеріалів визначено режими, які забезпечують перемішування твердої фази у всьому об'ємі киплячого шару, що забезпечує підвищення його електричного опору. Автором рекомендовано гідродинамічний режим з порозністю шару 0,55-0,65 та запропоновано використовувати відому залежність для визначення необхідної швидкості зріджуючого газу.

**У третьому розділі** дисертації автор наводить результати розробки та випробування пілотної печі для термічної обробки природнього графіту продуктивністю 10кг/год. Ним запропоновано методику розрахунку печей з ЕКШ та використано її для визначення основних конструктивних параметрів пілотної печі. Випробування цієї печі показали принципову можливість реалізації цього процесу.

**Четвертий розділ** роботи спрямовано на вдосконалення системи охолодження готового продукту після обробки. Запропоновано використання двоступеневого охолоджувача: перша ступень 3000°C - 900°C і друга ступень 900 °C - 300 °C. Аспірантом створено математичну модель прямотрубного охолоджувача першої ступені з використанням секційного перемішування матеріалу. На її основі проведено параметричні дослідження процесу охолодження природнього графіту. В результаті запропоновано регресійну залежність середньої температури матеріалу від конструктивних та режимних параметрів роботи охолоджувача, яка може бути використана при його проєктуванні.

В цьому ж розділі рекомендовано залежність для визначення коефіцієнту тепlop передачі від матеріалу до теплообмінної поверхні у перехреснотоковому охолоджувачі другої ступені. Експериментально визначено залежності абразивного зносу теплообмінних труб у цьому апараті.

**П'ятий розділ** роботи присвячено розробці ефективної системи охолодження та очищення відхідних газів без допалення на основі апаратів сухого очищення. Це значно зменшує капітальні та експлуатаційні витрати. Основна частина розділу присвячена дослідженню радіаційного охолоджувача запилених газів на основі математичного моделювання. Автором використано зональний метод розрахунку радіаційного теплообміну з урахуванням газу, як сірого тіла. В результаті досліджень показано принципову можливість використання запропонованої системи та визначено основні розміри охолоджувача.

Завершують дисертаційну роботу висновки, список літературних джерел, на які є посилання в роботі, та додатки.

Текст дисертації викладено послідовно. Робота виконана відповідно поставленій меті та завданням і є завершеною науковою працею.

### **3. Оцінка наукової новизни дисертаційної роботи**

Значна частина результатів дослідження отримана вперше. Детально ці результати викладені у вступній частині дисертації. Назvu тільки такі, які мені здаються найбільш вагомими.

Вперше експериментально доведено необхідний розвиток псевдозрідження електротермічного киплячого шару (порозність 0,55-0,65) який забезпечує рівномірність температурного поля та підвищення його електричного опору.

Автор на основі математичного моделювання роботи прямотрубного холодильника з секційним перемішуванням вперше отримав регресійну залежність, що дозволяє визначити раціональні конструктивні та режимні його параметри.

В роботі вперше запропоновано систему очищення та охолодження відхідних газів печей ЕКШ для термічної обробки вуглецевих матеріалів без їх допалення. На базі математичного моделювання основного елемента цієї системи – радіаційного охолоджувача визначено ефективність його роботи на рівні 65-85% в діапазоні параметрів: температура та витрати відхідних газів  $t_r = 2500-3000^{\circ}\text{C}$ ,  $V_r = 50-150 \text{ нм}^3/\text{год}$ , концентрації пилу  $\mu = 400-2000 \text{ г}/\text{нм}^3$ , діаметру часток пилу  $d_q = 100-300 \text{ мкм}$ . Доведено що застосування штучного запилення відхідних газів дозволяє зменшити температуру з  $2500^{\circ}\text{C}$  до  $2100-1500^{\circ}\text{C}$ , тобто нижче температури десублімації випарів.

### **4. Значення результатів для науки і практики**

В роботі запропоновано методику розрахунку теплового балансу печі ЕКШ для високотемпературної термічної обробки вуглецевих матеріалів на базі якої отримано основні конструктивні параметри печі ЕКШ для обробки природнього графіту продуктивністю 10 кг/год. Ці параметри використані при проєктуванні та виготовленні цієї печі в ТОВ «Центр матеріалознавства» м. Київ, що підтверджено актом впровадження.

Крім того, в роботі запропоновано методику розрахунку перехреснотокового охолоджувача готового продукту від температури  $900-1000^{\circ}\text{C}$  до  $300^{\circ}\text{C}$ , яку використано при проєктуванні охолоджувача продуктивністю 1000 кг/год;

Дисертаційна робота містить ряд оригінальних інженерних рішень, новизна яких підтверджена двома патентами на корисні моделі. Ці рішення включають удосконалені конструкції безпосередньо печі та системи

охолодження та очищення відходів газів. Також розроблено рекомендації щодо конструкції прямотрубного охолоджувача готового продукту з щільним шаром, які на мій погляд теж необхідно патентувати.

До практичних слід віднести експериментальні результати досліджень ерозійного впливу вуглецевих матеріалів на трубчасті теплообмінні поверхні охолоджувача готового продукту.

Відповідні результати роботи використані у навчальному процесі кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту НМетАУ.

## **5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Наукові положення і висновки наведені у дисертації отримані автором на основі теоретичного аналізу та експериментальних досліджень процесів теплообміну та гідрогазодинаміки у печі з електротермічним киплячим шаром та її елементів. Слід відмітити збалансований характер досліджень які основані як на експериментах, так і математичному моделюванні в рівних межах.

Експерименти виконувались на лабораторних та пілотних установках. Достовірність та обґрунтованість результатів забезпечувались використанням сучасних методик проведення експериментальних досліджень та засобів вимірювання, використанням відомих статистичних методик обробки результатів.

Адекватність математичного моделювання забезпечувалась коректністю постановки задач, використанням в роботі фундаментальних закономірностей тепломасообміну та гідродинаміки, відомих сучасних методів математичного моделювання, відповідністю результатам відомих тестових задач.

## **6. Відповідність дисертації встановленим вимогам щодо дотримання академічної добросередності**

Особистий внесок автора роботи полягає у підготовці проведенні експериментальних досліджень на лабораторних та пілотній установках, обробці та аналізу отриманих експериментальних результатів, створення розрахункових методик і математичних моделей прямотрубного холодильника та радіаційного охолоджувача та проведення чисельних досліджень, аналізі отриманих результатів та доведенні наукових положень.

У дисертації не виявлено ознак академічного плаґіату, самоплаґіату, фабрикації чи фальсифікації та інших порушень, які могли б ставити під сумнів самостійний характер виконання дисертаційного дослідження. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

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

Зміст дисертації повністю висвітлений у 18-х опублікованих здобувачем у співавторстві в наукових працях. В тому числі – 4 роботи у виданнях, які індексуються у наукометрічній базі SCOPUS. Результати роботи пройшли апробацію на 5-и міжнародних конференціях.

Стиль і виклад результатів досліджень послідовний та відповідає вимогам до наукових праць. Текст роботи повністю відтворює результати наукових досліджень.

## **8. Дискусійні положення та зауваження**

1. При розробці класифікації печей з електротермічним киплячим шаром автор врахував як режимні параметри так і конструктивні, але при цьому в класифікації відсутня характеристика саме киплячого шару (ступінь псевдозрідання, прозність тощо).

2. У другому розділі автором проведено дослідження на холодній моделі киплячого шару та запропоновано гідродинамічні режими роботи, що забезпечують рівномірність температурного поля. Виникає питання що дослідження проведені виключно для одного геометричного співвідношення розмірів робочої камери, характеристик решітки і т.ін чи можливо розповсюджувати отримані результати на роботу печей з іншим співвідношенням розмірів печі.

3. З підсумками вивчення гідродинамічних режимів (стор. 52) прийнятних для існування ЕКШ автор доходить висновку щодо доцільності наступної їх класифікації: щільний шар, нерухомий шар, перехідний режим, режим малоінтенсивного кипіння, режим інтенсивного кипіння. Незрозумілим залишається, як саме вони збігаються з відомою класифікацією режимів киплячих шарів: пузирковим, турбулентним, поршневим, тощо.

4. При іспитах пілотної печі продуктивністю 10 кг/год температура в печі не перевищила 900°C, тобто не вдалося досягти температури очищення графіту 2500-3000°C. З роботи неясно у чому причини цього, чому непродовжені роботи з цією піччю.

5. Четвертий розділ роботи пов'язаний з моделюванням та дослідженням охолодження готового продукту в прямотрубних охолоджувачах. Автор пропонує використання моделі де рухомий шар представлена як суцільний циліндр з ефективною тепlopровідністю, але в роботі не доведено можливість використання такого підходу.

Крім того при параметричному дослідженні автор використав від 1 до 4 паралельних каналів, чому не більше?

6. В п'ятому розділі дисертантом запропоновано нову схему очищення та охолодження відходних газів яка використає апарати сухого очищення газу в тому числі рукавний фільтр. З тексту незрозуміло як штучне запилення буде впливати на подальший процес охолодження та очищення газів після радіаційного охолоджувача.

7. Зауваження щодо оформлення. Немає пояснень величин у формулі (2.3) та системи рівнянь (3.18)–(3.22). Незрозуміло, що означає «температура печі» у табл. 3.1. По тексту трапляються орфографічні та стилістичні помилки. На мою думку, застосування терміну «холодильник» у розділі 4 не є зовсім коректним, більш вдалим буде термін «охолоджувач».

Однак, зазначені зауваження не змінюють загальну позитивну оцінку дисертації та не знижують її наукову та практичну цінність.

## 9. Висновок

Дисертація Гогоці Олексія Георгійовича є завершеною науково-дослідною роботою, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що мають теоретичну та практичну цінність та вирішують задачу підвищення ефективності та надійності печей для термічної обробки вуглецевих матеріалів з електротермічним киплячим шаром шляхом вдосконалення режимних та конструктивних параметрів їх роботи.

Основні наукові результати роботи повно представлені в публікаціях в журналах, рекомендованих МОН України та у достатній мірі апробовані на міжнародних конференціях.

За напрямом досліджень дисертаційна робота відповідає спеціальності 144 – Теплоенергетика.

Дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 10, 11, 12 Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 р. №167 «Про присудження ступеня доктора філософії» зі змінами (Постанови Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2020 р. №979, від 9 червня 2021 р. №608), а її автор – Гогоці Олексій Георгійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика.

Офіційний опонент, д.т.н., професор,  
завідувач кафедри теплотехніки  
та енергоекспективних технологій,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

