

## ВІДГУК

офіційного опонента Сімейко Костянтина Віталійовича на дисертаційну роботу Губинського Семена Михайловича «Удосконалення роботи високотемпературних агрегатів з електротермічним киплячим шаром з метою зменшення викидів парникових газів», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика»

### **1. Актуальність теми дисертації**

Кілька слів щодо історії розвитку електротермічного псевдозрідженого шару. Детальні дослідження були початі у 60-70 роках минулого століття в Україні (Інституті газу НАН України), НАН Білорусі та декількох університетах США. Але на той період отримані результати не були затребувані практикою. Сучасний етап розвитку електротермічних псевдозріджених шарів характеризується переходом до використання електроенергії як основного джерела енергозабезпечення високотемпературних технологічних процесів.

Так, одним із ключових завдань сучасної теплоенергетики є забезпечення високої енергоефективності технологічних процесів при одночасному дотриманні екологічних норм, що зумовлені вимогами декарбонізації. Водночас виробництво вуглецевих матеріалів високої якості (штучного і природнього графіту) залишається однією з найбільш енергоємних галузей із характерним високим рівнем викидів парникових газів. Важливо підкреслити, що перехід від традиційних джерел нагріву до електротермічних систем, зокрема з електротермічним псевдозрідженим шаром, має значний потенціал для зменшення викидів CO<sub>2</sub> за рахунок інтеграції з відновлюваними джерелами енергії.

У цьому контексті тема дисертаційної роботи Губинського С. М. є надзвичайно актуальною, оскільки вона спрямована на вдосконалення роботи високотемпературних агрегатів з електротермічним псевдозрідженим шаром, що дозволяє реалізувати електронагрів з високими швидкостями теплопередачі, інтенсифікацією тепло- та масообміну і з мінімальними витратами енергії. Дослідження автора охоплює широкий спектр важливих для теплоенергетики питань: від вибору конструктивних і теплотехнологічних параметрів агрегатів з електротермічним псевдозрідженим шаром до моделювання температурних полів і аналізу режимів роботи систем. З огляду на наведене, актуальність теми дисертації не викликає сумнівів.

Дисертаційна робота С.М. Губинського тісно пов'язана з науковими програмами, планами, темами Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ). Вона базується на результатах фундаментальних та прикладних досліджень, що виконувались в УДУНТ по держбюджетній тематиці господарчих договорів у 2018-2024рр.

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

Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основна частина дисертації представлена на 131 сторінці і містить 18 таблиць та 45 рисунків. Робота має 4 додатки і список використаних літературних джерел із 122 найменувань.

Роботу виконано в УДУНТ на кафедрі енергетичних систем та енергоменеджменту.

Основою дисертаційної роботи є використання електротермічного псевдозрідженого шару у високотемпературних технологіях, які застосовуються для отримання графіту високої якості та піролізу природного газу з метою отримання водню.

У першому розділі роботи автор обґрунтовує перспективи використання електротермічного псевдозрідженого шару для отримання водню, термічного рафінування графіту, отримання штучного графіту. Кожна з цих технологій вирішує завдання отримання наукоємних продуктів, які спрямовані на вирішення екологічних та кліматичних проблем глобального характеру. Наприкінці розділу сформульовано завдання дослідження, що забезпечують можливість впровадження електротермічного псевдозрідженого шару у практику.

Розділ 2 дисертації присвячено визначенню теплотехнологічних параметрів реакторів з електротермічним псевдозрідженим шаром відповідно до отримання графіту високої якості, що може використовуватись для виготовлення анодів літій-іонних акумуляторів. Цим дослідженням передувала розробка оригінальної конструкції високотемпературної печі, що імітує режими нагріву у електротермічному псевдозрідженому шарі.

У третьому розділі роботи наведено конструкції лабораторних установок для дослідження електротермічного псевдозрідженого шару та представлені методики досліджень електричного опору по висоті псевдозрідженого шару, можливості використання турбулентного режиму для нагріву графіту у електротермічному псевдозрідженому шарі, визначення електричного опору бінарної суміші графіту та карбіду кремнію. Отримані результати стали підґрунтям для формулювання низки положень наукової новизни дослідження.

Четвертий розділ є одним з вагомих елементів, що сприяють впровадженню технологій на основі електротермічного псевдозрідженого шару. Результати розрахункових досліджень емісії парникових газів при виробленні штучного графіту доводять, що використання електротермічного псевдозрідженого шару дозволить значно зменшити викиди у порівнянні з печами Ачесона і Кастнера. При рафінуванні природного графіту основний екологічний ефект буде досягнутий за рахунок виключення використання кислот та вапна і зменшення обсягу очищення води.

П'ятий розділ дисертації присвячений розробці енергоефективних режимів та конструкцій агрегатів з електротермічним псевдозрідженим шаром. У розділі:

- запропонована конструкція печі з додатковою камерою витримки штучного графіту, яка дозволить підвищити продуктивність печі та зменшить можливість проскоку часток через шар без необхідної тривалості обробки,

- запропонована конструкція печі з теплоутилізатором, що дозволить підігрівати сировину за рахунок теплоти готового продукту і таким чином зменшити витрати енергії у печі та підвищити надійність її роботи.

Автор довів можливість реалізації розробленої конструкції шляхом моделювання охолодження графіту у теплоутилізаторі.

Завершують дисертацію висновки та список використаних джерел.

### **3. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше на основі експериментальних досліджень отримано параметри роботи печей ЕКШ для графітації антрациту Донецького вугільного басейну, що забезпечать якість штучного графіту, характерну для традиційних марок ( $DOG > 93\%$ ) при тривалості витримки  $\tau = 55-60$  хв та температури нагріву  $3000^\circ\text{C}$ .

2. Вперше на основі експериментальних досліджень отримано параметри роботи печей ЕКШ для рафінування природного графіту, які забезпечують якість анодного графіту ( $99,95\%$  C) при температурі обробки  $2800-3000^\circ\text{C}$ , термін обробки  $5-10$  хв.

3. Вперше при нагріві у ЕКШ експериментально підтверджено нерівномірний розподіл електричного опору за висотою шару. Величина питомого опору підвищується по мірі занурення у шар з його поверхні. Нерівномірність питомого опору за висотою шару зменшується з підвищенням температури. Різниця у розподілі потужності пов'язана з нерівномірністю електричного опору по висоті шару й може призвести до перепаду температур  $50-60^\circ\text{C}$ .

4. Вперше експериментально доведено неможливість нагріву у ЕКШ фракцій графіту малих розмірів у турбулентному режимі кипіння, що пов'язано значним ростом електричного опору киплячого шару на  $1-2$  порядки. Необхідність підвищення напруги між електродами призводить до пробойів газу та виникнення дуг і зупинення процесу нагріву.

5. Вперше експериментально досліджено нагрів бінарної суміші «природний графіт + карбід кремнію» у ЕКШ. Визначено величини питомого електричного опору шару в залежності від температури. Отримано величину температури  $1000 \pm 50^\circ\text{C}$ , при якій спостерігалось різке зменшення опору псевдозрідженого шару у  $8-10$  разів, пов'язане з відновленням оксидної плівки на частках SiC.

6. Вперше на основі розрахунку викидів парникових газів при виробництві графіту анодного класу для умов України показано, що технологія

використання електротермічного псевдозрідженого шару для очищення природного графіту та графітизації штучного графіту забезпечує:

- при термічному рафінуванні природного графіту замість хімічного таку емісію парникових газів, яка практично залишається на одному рівні. Одночасно повністю виключається використання кислот і вапна, в 10 разів зменшується необхідність очищення стічних вод і кількість промислових відходів.

- виробництво штучного графіту анодної якості в печах з електротермічним псевдозріденим шаром дає змогу знизити викиди парникових газів на 40-50% порівняно з традиційними технологіями графітації у печах Ачесона і Кастнера.

Дисертація містить обґрунтовані результати. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, сформульованих у дисертації, підтверджується достатньою кількістю проведених теоретичних та експериментальних досліджень з використанням сучасних методів, які базуються на загальноприйнятих підходах щодо аналізу процесів тепло- масообміну та електропровідності. Отримані результати не суперечать висновкам відомих теорій. Результати досліджень пройшли апробацію на міжнародних наукових та науково-практичних конференціях.

Наукові положення і висновки наведені у дисертації отримані автором на основі теоретичного аналізу та експериментальних досліджень процесів нагріву матеріалів у електротермічному псевдозріджену шарі на чисельних лабораторних установках з метою визначення закономірностей тепловиділення у киплячому шарі, параметрів роботи печей при отриманні графіту високої якості. Слід відмітити переважно експериментальний характер досліджень, що, на мою думку, слід розглядати як перевагу роботи.

*Практичне значення* результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що:

- розроблено оригінальну конструкцію камерної високотемпературної печі ( $3000^{\circ}\text{C}$ ), яка забезпечує моделювання термічної обробки у ЕКШ з швидкістю нагріву не менш  $1000^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ .

- запропоновано дискретно-непереривні режими термічної обробки вуглецевої сировини та конструкцію печі ЕКШ для їх реалізації, які забезпечують необхідну якість готового продукту та підвищення продуктивності удвічі (Патент на корисну модель 154510).

- запропоновано конструкцію печі з утилізацією теплоти готового продукту і підігрівом сировини з використанням теплообмінника киплячого шару без вторинного забруднення очищеного графіту (Заявка на корисну модель U202400858 від 20.02.2024, Рішення про державну реєстрацію корисної моделі 10.06.2024)

- результати досліджень були використані при проектуванні реактора електротермічного псевдозрідженого шару в рамках грантової угоди Горизонт-Європа 101058100 від 22.06.2022 року. «Технологія швидкодіючого

каталітичного реактора з електричним нагріванням для скорочення викидів CO<sub>2</sub>».

- результати роботи використані у навчальному процесі кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту УДУНТ при викладанні курсів «Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки».

#### **4. Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Губинського С.М. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144 Теплоенергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Теплоенергетика. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у наукові і практичні результати роботи. На основі цього можна зробити висновок, що дисертаційна робота є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

#### **5. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 18 наукових публікаціях здобувача, серед яких:

- 4 статті у наукових виданнях, що включено до переліку наукових фахових видань, проіндексованих у базі даних Scopus,
- 4 статті у фахових виданнях категорії «Б» ,
- 4 патенти України,
- 6 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій

Результати дисертації були апробовані на 4 міжнародних конференціях.

На підставі аналізу опублікованих автором робіт можна стверджувати, що матеріали дисертації достатньо повно висвітлені у виданнях.

#### **6. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. У другому розділі здобувач описує створення високотемпературної камерної печі, що дозволяє проводити нагрів вуглецевого матеріалу з швидкістю до 1000°C/хв. Це можливо за рахунок використання нагрівача, який водночас є теплоізолятором. Це неординарне технічне рішення на мій погляд, тому виникає питання: чому це рішення не патентується?

2. У третьому розділі автор вперше експериментально довів нерівномірність електричного опору по висоті електротермічного псевдозрідженого шару, але в роботі нема пояснень, що може викликати цей ефект, і чому з підвищенням температури цей ефект зменшується?

3. Автор експериментально визначив залежність електричного опору від складу бінарної суміші графіт + карбід кремнію (рис. 3,9). Чи можливо розповсюдити цю залежність на інші бінарні суміші?

4. У практичних результатах роботи автор навів дані щодо використання результатів роботи при проектуванні реактора з електротермічним псевдозрідженим шаром в рамках проекту Горизонт Європа «Технологія швидкодіючого каталітичного реактора з електричним нагріванням для скорочення викидів CO<sub>2</sub>», але в роботі нема інформації відносно того, що саме було використано?

5. Зауваження стосується термінології, яку використає автор. На сам перед це «електротермічний киплячий шар». На мій погляд, заміна «киплячий» на «псевдозріджений» є більш доречною, що одночасно визначає та уточнює предмет дослідження.

6. У висновках глави 2 автор наголошує : «Вперше на основі аналізу фізико-хімічних процесів при термічному рафінуванні вуглецевих матеріалів сформульовані вимоги до реалізації періодичного чи безперервного процесу у високотемпературних печах ...» і далі формулює вимоги до конструкції та організації технологічних процесів з урахуванням виходу розплаву золи на поверхню вуглецевих часток, що на мій погляд є дуже важливим результатом роботи, але ні в наукових ні в практичних результатах, що анонсує автор, його нема.

7. У другому розділі на сторінці 50 автор вказує швидкість нагрівання 1000° С/с, а у висновках з розділу на сторінці 60 фігурує швидкість нагрівання 1000° С/хв. Так яка дійсно швидкість нагрівання?

8. На рисунку 3.11 наведена експериментальна залежність питомого опору бінарної суміші графіт + карбід кремнію. Незрозуміло, чому графік має декілька локальних максимумів, з чим це пов'язано?

9. Наскільки видно з роботи, температуру автор вимірював за допомогою зміни фізичних властивостей «Зразків-свідків», однак є більш точніші методи вимірювання, наприклад використання пірометра чи термопар? Чому було обрано методику «Зразків-свідків»?

10. У таблиці 4.1 автор наводить структуру виробництва електроенергії в Україні – у період 2020-2021 років. Наразі після повномасштабного вторгнення ця структура суттєво змінилася. Чому не були взяті більш свіжі дані?

## **7. Загальний висновок по дисертаційній роботі**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Губинського Семена Михайловича на тему «Удосконалення роботи високотемпературних агрегатів з електротермічним киплячим шаром з метою зменшення викидів парникових газів» виконана на високому науковому рівні, не порушує академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність отриманих результатів якого вирішує актуальне завдання підвищення ефективності високотемпературних агрегатів з псевдозрідженим

електротермічним шаром та зменшення викидів парникових газів. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022р № 44. Автор дисертації – Губинський Семен Михайлович - заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 144 – «Теплоенергетика».

Офіційний опонент, доктор технічних наук, старший дослідник,  
в.о. ученого секретаря та завідувач лабораторії  
досліджень опроміненого графіту  
Інституту проблем безпеки  
атомних електростанцій НАН України

Костянтин СІМЕЙКО



Підпис К.В. Сімейка

ЗАСВІДЧУЮ

Завідувач відділу кадрів

ІПБ АЕС НАН України

Ірина ПОГРЕБІЯК