

ВІДГУК

офіційного опонента Книш Людмили Іванівни на дисертаційну роботу Губинського Семена Михайловича на тему «Удосконалення роботи високотемпературних агрегатів з електротермічним киплячим шаром з метою зменшення викидів парникових газів», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика.

Актуальність теми

Високий попит на штучний графіт та високочистий природний графіт у таких галузях, як акумуляторні технології, металургія, виробництво карбюраторів, вимагає ефективних і екологічно чистих технологій. Електротермічний киплячий шар (ЕКШ) надає можливість реалізувати безперервний, контрольований процес, що можуть забезпечити значне зниження енерговитрат, підвищити якість продукту та зменшити викиди парникових газів. Розробка таких технологій на основі глибокого розуміння теплотехнологічних параметрів — важливий крок до їх промислової реалізації.

Дисертаційна робота Губинського С.М. спрямована на розробку і обґрунтування ефективних конструкцій і режимів роботи високотемпературних агрегатів з ЕКШ. Актуальність підсилюється тим, що на практиці існує чимало невирішених питань щодо оптимального вибору теплових і електричних параметрів обумовлених закономірностями ЕКШ, складом матеріалу шару, гідродинамічними режимами.

Таким чином, тема роботи повністю відповідає сучасним викликам розвитку високотемпературних процесів і безумовно є актуальною.

Результати дисертації були отримані при виконанні наукових досліджень за конкурсними держбюджетними роботами та в рамках

міжнародних проектів відповідно до тематичних планів УДУНТ на кафедрі енергетичних систем та енергоменеджменту: «Розробка технології виробництва інноваційних карбюраторів та отримання на їх основі синтетичних чавунів високої якості» (0122U001800), «Розробка інноваційної «зеленої» технології глибокої переробки вугілля з метою отримання термоантрациту та штучного графіту високої якості» (0121U109528), «Feasibility study of high temperature refining of anode material» (X077E10002), «Розроблення технології виробництва графіту для літій-іонних акумуляторів» (0118U005464)

Загальна характеристика роботи.

Дисертаційна робота є рукописом загальним обсягом 132 сторінки загального машинописного тексту та містить 18 таблиці, 45 рисунки, бібліографічний список з 122 джерела і 4 додатки.

Дисертацію виконано в Українському державному університеті науки і технологій (УДУНТ).

У вступі наведено актуальність дослідження, сформульовано мету і завдання, предмет та об'єкт дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Також надані данні щодо публікацій та апробації результатів дисертації.

Перший розділ дисертації – літературний огляд - пов'язаний з обґрунтуванням завдань дослідження, таких як визначення основних теплотехнологій для впровадження електротермічного киплячого шару (рафінування та графітація штучного і природнього графіту), отримання водню шляхом піролізу природнього газу. Визначено основні шляхи підвищення ефективності роботи печей з ЕКШ, в тому числі використання теплоти готового продукту, та розділення операцій нагріву сировини та її витримки при високій температурі.

Другий розділ присвячений визначенню параметрів роботи печей ЕКШ для отримання графіту анодної якості. Для вирішення цього завдання було створено оригінальну конструкцію камерної високотемпературної печі з наступними параметрами: $t=3000^{\circ}\text{C}$, швидкість нагріву $100-1000^{\circ}\text{C/хв}$. Створенню печі передувало

теоретичне дослідження розподілу температур у нагрівачі з графітованої повсті.

Третій розділ роботи містить результати експериментальних досліджень тепловиділення у електротермічному киплячому шарі, які визначають рівномірність температурного поля по висоті шару, можливість використання ЕКШ у турбулентному режимі псевдозрідження, використання бінарних сумішей графіта та каталізатора на основі карбіду кремнію.

Четвертий розділ пов'язаний з розрахунками викидів парникових газів при виробництві штучного графіту та рафінування природнього графіту по технологіям що використовують у промисловості з печами Ачесона чи Кастнера та безперервною технологією ЕКШ. Порівняння показало, що термічне рафінування природнього графіту практично не змінює викиди парникових газів при переході на технологію ЕКШ, в той час як при виробленні штучного графіту викиди зменшуються на 40-50%.

П'ятий розділ пов'язаний з розробкою удосконалених конструкцій печей ЕКШ, які дозволяють підвищити енергоефективність, продуктивність агрегатів та якість готової продукції. Особливо слід відзначити обґрунтування використання теплоутилізатора для підігріву сировини перед загрузкою до печі, що проводилася шляхом математичного моделювання процесів теплообміну в камері утилізатора з киплячим шаром.

У висновках узагальнені основні наукові та практичні результати отримані в дисертації.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків та їх достовірність.

Наукові положення і висновки, наведені у дисертації, отримані автором в основному шляхом експериментальних досліджень на високотемпературній камерній печі, що моделює режими нагріву сировини у ЕКШ, лабораторній установці з електротермічним киплячим шаром та холодній гідродинамічній моделі.

Достовірність результатів досліджень забезпечена коректною постановкою завдань виконаних досліджень, застосуванням оригінальних експериментальних установок і сучасних методів та приладів вимірювання фізичних величин, використанням відповідних методів обробки отриманих експериментальних результатів.

Достовірність результатів моделювання забезпечено коректністю математичних постановок задач, використанням в роботі фундаментальних положень теорій тепломасообміну та гідродинаміки, загальноприйнятих сучасних методів математичного моделювання.

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

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі підвищення ефективності печей з ЕКШ та зменшення викидів парникових газів шляхом вдосконалення режимних та конструктивних параметрів їх роботи для високотемпературних процесів рафінування природного графіту та отримання штучного графіту, а також каталітичного піролізу метану.

Нові наукові результати отримані автором полягають в наступному:

1. Вперше на основі експериментальних досліджень отримано параметри роботи печей ЕКШ для графітації антрациту (тривалість витримки $\tau = 55-60$ хв та температура нагріву 3000°C) та рафінування природного графіту (температура обробки $2800-3000^{\circ}\text{C}$, термін обробки $5-10$ хв), що забезпечує якість готового продукту для виготовлення анодів літій-іонних акумуляторів.
2. 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, яка пов'язана з нерівномірністю електричного опору по висоті шару, може призвести до перепаду температур $50-60^{\circ}\text{C}$.

3. Вперше експериментально доведено неможливість нагріву у ЕКШ фракцій графіту малих розмірів у турбулентному режимі кипіння, що пов'язано зі значним ростом електричного опору киплячого шару на 1-2 порядки.

4. 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.

5. Вперше на основі аналізу викидів парникових газів при виробництві графіту анодного класу для умов України доведено, що при термічному рафінуванні природного графіту замість хімічного рафінування емісія парникових газів практично залишається на одному рівні. Виробництво штучного графіту анодної якості в печах ЕКШ дає змогу знизити викиди парникових газів на 40-50% порівняно з традиційними технологіями графітації у печах Ачесона і Кастнера.

6. Практична цінність отриманих результатів полягає у наступному:

1. Результати роботи використані при проектуванні печі ЕКШ в рамках грантової угоди Горизонт - Європа 101058100 від 22.06.2022 року. "Технологія швидкодіючого каталітичного реактора з електричним нагріванням для скорочення викидів CO₂"

2. Розроблено інноваційну конструкцію камерної високотемпературної печі (3000°C), яка забезпечує моделювання термічної обробки у ЕКШ з швидкістю нагріву не менш 1000°C/хв .

3. 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).

4. 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)
5. Результати роботи використані у навчальному процесі кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту НМетАУ при викладанні курсів «Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки».

Особистий внесок здобувача полягає у наступному:

розробка конструкцій лабораторних установок, методик проведення експериментальних досліджень, участь у дослідженнях та обробка їх результатів, розробка інженерних рішень щодо удосконалення печей з ЕКШ; розробка математичних моделей лабораторної камерної печі та теплоутилізатора, а також проведення розрахунково-теоретичних досліджень на їх основі.

Повнота викладення основних положень дисертації в опублікованих роботах.

Основні матеріали дисертації представлені у 18-ти друкованих працях, в тому числі 4 статі входять до наукометричної бази Scopus; 3-х патентах України; 4-х матеріалах конференцій. Всі публікації містять результати безпосередньої роботи автора на окремих етапах досліджень та відображають основні положення та висновки дисертаційної роботи.

Основні положення і результати роботи доповідались і обговорювались на 4 міжнародних наукових конференціях.

Недоліки та зауваження по дисертаційній роботі.

1. В першому розділі автор розглядає дві високотемпературні технології одержання водню на основі піролізу природного газу та технології вироблення графіту для виготовлення анодів літій-іонних акумуляторів. На його думку в саме цих технологіях доцільно

використовувати процес з електротермічним киплячим шаром. Чи існують інші процеси, де можливо використовувати ЕКШ і в чому переваги саме цього методу нагріву у киплячому шарі?

2. При розробці камерної високотемпературної печі автор стверджує, що вона забезпечує можливість моделювання процесів нагріву часток у ЕКШ, і анонсується швидкість нагріву $100-1000^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. В роботі нема даних щодо динаміки нагріву часток у ЕКШ. Крім того, діаметр робочої камери камерної печі складає 40 мм, а нагрів відбувається з поверхні шару сировини. Яким чином досягається висока швидкість нагріву?

3. У дисертації автор багато разів згадує температуру 3000°C як верхню межу рафінування та графітації вуглецевих матеріалів. Виникає питання, чим обумовлене саме це обмеження?

4. В четвертому розділі автор проводить порівняння викидів парникових газів при виробленні штучного графіту у печах Ачесона та Кастнера, котрі також використовують електричну енергію, яка може бути одержана від відновлювальних джерел енергії. Чому таке велике зменшення емісії парникових газів при переході на технологію ЕКШ?

5. В розділі 5 автор розробив математичну модель охолодження обробленого графіту у теплоутилізаторі. Розглядався процес у сталому режимі. Поясніть, будь ласка, як враховувалася зміна радіаційної складової теплового потоку від поверхні каналу транспортування графіту у верхній частині теплоутилізатора?

Водночас слід зазначити, що зроблені зауваження не впливають на науковий рівень дисертації, новизну та достовірність її результатів.

ВИСНОВОК ОПОНЕНТА

Одержані автором нові експериментальні і теоретичні результати у сукупності розв'язують складне науково-практичне завдання підвищення ефективності печей з ЕКШ та зменшення викидів парникових газів шляхом вдосконалення режимних та

конструктивних параметрів їх роботи для високотемпературних процесів рафінування природного графіту та отримання штучного графіту, а також каталітичного піролізу метану. Вважаю, що дисертація Губинського Семена Михайловича "Удосконалення роботи високотемпературних агрегатів з електротермічним киплячим шаром з метою зменшення викидів парникових газів" виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, за своїм змістом та оформленням відповідає Наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та задовольняє вимогам Постанови КМУ №44 від 12.01.2022 р (зі змінами, внесеними згідно Постанови КМУ №341 від 21.03.2022 р) «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 - теплоенергетика, галузі знань: 14 - електрична інженерія

Офіційний опонент, д.т.н., професор,
професор кафедри комп'ютерних технологій
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара

 Людмила КНИШ

Підпис Людмили КНИШ засвідчую:

Вчений секретар Дніпровського
національного університету
імені Олеся Гончара,
канд. фіз.-мат. наук, доцент



Тетяна ХОДАНЕН