

ВІДГУК

офіційного опонента Б.І. Бондаренка на дисертаційну роботу
С.С. Федорова **«Розвиток наукових основ створення
високотемпературних агрегатів з електротермічним киплячим
шаром для очищення вуглецевих матеріалів»**, подану на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»

Актуальність обраної теми

Дисертаційна робота С.С. Федорова спрямована на вирішення важливої проблеми енергетики – забезпечення вироблення високоякісних анодних вуглецевих матеріалів для літій-іонних акумуляторів, що сприяє розвитку інноваційних галузей світової економіки: широке використання відновлюваних джерел енергії, виробництво електромобілів, мобільних джерел енергії для електронних приладів тощо. Одним з основних елементів літій-іонних акумуляторів є аноди на основі природного та штучного графіту, якість якого визначається його чистотою. Саме вилучення домішок з вуглецевих матеріалів термічним методом є основною метою, яку вирішує автор у дисертації. Важливість цього питання підтверджується значною кількістю публікацій у провідних виданнях. З огляду на викладене тему дисертації слід вважати актуальною.

Дисертаційна робота С.С. Федорова тісно пов'язана з науковими програмами, планами Національної металургійної академії України (НМетАУ). Вона базується на результатах досліджень, що виконувались в НМетАУ за держзамовленням 2010-2017 роках, в рамках міжнародних науково-прикладних проектів: GIPP BNL372 / STCU P482 Project «Recycling of spent batteries from electric drive vehicles» (2012-2014) та STCU PARTNER PROJECT P645 «Modelling thermostatic control of storage batteries at low temperatures» (2014 - 2017).

Загальна характеристика роботи

Дисертація складається із вступу, п'яти основних розділів, загальних висновків, налічує 302 сторінки загального машинописного тексту та містить 33 таблиці, 102 рисунки, бібліографічний список з 338 джерел і 4 додатки. Роботу виконано в Національній металургійній академії України.

У першому розділі роботи автор обґрунтовує актуальність роботи та переваги обраного напрямку очищення графіту у електротермічних печах киплячого шару безперервної дії, визначає основні напрямки

досліджень та технологічні параметри термічної обробки вуглецевої сировини (температура, час обробки). На основі математичного моделювання визначено можливість досягнення вмісту вуглецю в графіті не менш 99,95%.

Слід відзначити, що роботу умовно можливо поділити на три основні розділи

- Дослідження електропровідності електротермічного киплячого шару (2-й розділ дисертації);
- Розвиток наукових основ створення високотемпературних печей і технологічних комплексів на їх основі (розділи дисертації 3, 4);
- Результати впровадження рекомендацій дисертаційної роботи (5-й розділ дисертації).

Основою для реалізації нагріву вуглецевих матеріалів у електротермічному киплячому шарі є можливість розрахунку електричного опору шару та визначення впливу основних технологічних параметрів на його величину. Саме вирішенню цього завдання і присвячений другий розділ дисертаційної роботи. На основі моделі двофазної моделі киплячого шару автор уточнив фізичну картину електропровідності киплячого шару, а саме: механізм підвищення електричного опору при переході від щільного шару у псевдозріджений, вплив пазирів на величину електричного опору. В результаті їм запропоновано залежність для розрахунку електричного опору псевдозрідженого шару у діапазоні параметрів характерних для термічної обробки вуглецевих матеріалів.

Друга частина дисертації пов'язана з дослідженням теплової роботи електротермічних печей із киплячим шаром, в тому числі питанню розподілу джерел теплоти і температури у шарі та вплив на них конструктивних параметрів печі. В результаті параметричних досліджень на основі математичного моделювання запропоновано критеріальні залежності для визначення основних розмірів робочого простору печей та методика їх розрахунку. Крім цього розроблено алгоритм вибору технологічних режимів роботи печей та розроблено заходи з підвищення їх ефективності за рахунок утилізації теплоти готового продукту, схеми подачі інертного газу та режимів завантаження печі.

Завершальна частина роботи (розділ 4) присвячена впровадженню результатів роботи при розробці та виготовленні промислових печей продуктивністю 1000кг/год.

Наукова новизна результатів і положень, сформульованих у дисертації

Значна частина результатів дослідження електропровідності киплячого шару та електротермічних печей побудованих на його основі

отримана вперше. Детально ці результати викладені у вступній частині дисертації та автореферату. Нижче наведено тільки такі, які мені здаються найбільш вагомими.

На основі експериментальних та теоретичних досліджень доведено що електропровідність киплячого шару вуглецевого матеріалу обумовлена електроконтактною взаємодією часток емульсійної фази і є результатом відповідного числа їх фізичних контактів, які перебувають під незначним динамічним навантаженням. Зростання електричного опору шару під час псевдозрідження переважно є результатом поступового розриву цих контактів. В результаті гідродинамічної перебудови нерухомого шару у киплячий доля розімкнених контактів, зростає від 30% до 60-70% в діапазоні збільшення значень числа псевдозрідження 0,75-1,25.

Вперше на основі математичного моделювання встановлено, що зміна розміру та взаємного розташування пазирів відносного друг друга практично не впливає на електропровідність киплячого шару, за об'ємної частки пазирів $\delta = 2-5\%$ відносна електропровідність складає $\Lambda = 0,98-0,92$.

Вперше науково обґрунтована комплексна напівемпірична модель електропровідності шару дисперсних часток електропровідного матеріалу, що включає диференційне рівняння електричного поля з неоднорідними властивостями та систему кінцевих алгебраїчних рівнянь відносно потенціалів часток, фізичні контакти яких у шарі утворюють полігональний електропровідний каркас. Контактний опір визначається на основі емпіричних залежностей питомого електричного опору від розміру часток, щільності струму та температури. Модель враховує геометрію робочого простору, тиск у шарі та гідродинамічний режим процесу.

Важливим результатом теоретичних досліджень є визначення основного фактору, який визначає рівномірний розподіл теплової потужності у робочому просторі електротермічної печі з киплячим шаром. Це є відносна висота активної зони, де відбувається найбільш інтенсивне перемішування матеріалу. За умов значень цього показника ≥ 2 доля теплової потужності відповідної зони перевищує 85% сумарної потужності печі, а збільшення відносної висоти ділянки під електродом в межах > 1 практично не впливає на роботу печі.

Створені дисертантом математичні моделі дозволили провести параметричні дослідження роботи електротермічних печей у практично важливому діапазоні параметрів та узагальнити результати у вигляді критеріальних залежностей, що дозволяють науково обґрунтовано обирати основні конструктивні і технологічні параметри роботи печей.

Значний інтерес являє запропонований алгоритм та результати вибору режимів управління електричною потужністю ЕТПКШ для пуску,

роботи при заданій продуктивності та холостому ході печі на основі вольт амперних характеристик, які дозволяють визначити області сталої роботи агрегату.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення і висновки наведені у дисертації отримані автором на основі глибокого теоретичного аналізу та експериментальних досліджень процесів електропровідності, тепломасообміну гідродинаміки у щільному і киплячому шарі. Експерименти виконувались як на лабораторних та пілотній установах. Достовірність та обґрунтованість результатів забезпечувались використанням сучасних методик проведення експериментальних досліджень та засобів вимірювання. Адекватність математичного моделювання розрахунків підтверджуються їх відповідністю результатам власних та відомих експериментальних досліджень та випробувань пілотної електротермічної печі продуктивністю 10- кг/год.

Практична цінність отриманих результатів

В роботі запропонована методика розрахунку основних конструктивних параметрів та технологічних режимів роботи електротермічних печей з киплячим шаром для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів. Методику використано ТОВ «УкрННІЕлектротерм» і ТОВ «Центр матеріалознавства» (Київ, Україна) для проектування промислових печей продуктивністю 30кг/год, 100кг/год, 1000кг/год.

З участю ДП «Конструкторське бюро «Південне» (Дніпро, Україна), ТОВ «Центр матеріалознавства» (Київ, Україна) за підтримки US Department of energy (SW Washington, DC, US), Brookhaven National Laboratory (New York, US) і міжурядової організації «Український Науково-Технологічний Центр» (Київ, Україна) для умов American Energy Technologies Co. (Chicago, US) розроблена та виготовлена ЕТПКШ продуктивністю до 1 т/г з робочою температурою до 2500°C для термічної переробки вуглецевої сировини, а також допоміжне обладнання, в тому числі: охолоджувачі готового продукту першої (2500/900°C) та другої (900/300°C) ступені.

Дисертаційна робота містить ряд оригінальних інженерних рішень, новизна яких підтверджена чотирма патентами на корисну модель України. Ці рішення включають удосконалені конструкції електротермічних печей з киплячим шаром що передбачає утилізацію теплоти готового продукту, відповідні розміри робочого простору печі,

подачу псевдозріджуючого газу через електрод, та режими заправки сировини та видалення готової продукції з робочого простору печі.

Для ТОВ «Заваллівський графіт» (Київ, Україна) розроблена технічна пропозиція щодо розробки технологічного комплексу високотемпературної термічної очистки та графітації природних графітів марок ГЕ-3 та ГЕО-92 за температур до 3000°C на базі ЕТПКШ загальною потужністю до 8,0 тис. т на рік. Термін окупності реалізації проекту складає менш двох років.

Повнота викладення основних положень дисертації в опублікованих роботах

Зміст дисертації повністю висвітлений у 33-х опублікованих здобувачем у співавторстві та особисто наукових працях та в авторефераті. Результати роботи пройшли апробацію на 11-ти міжнародних наукових конференціях та семінарах в Україні та за кордоном у Росії, Польщі, США, Китаї.

Дисертаційна робота та автореферат написані державною мовою. Стиль і виклад послідовний та відповідає вимогам до наукових праць. Текст роботи повністю відтворює результати наукових досліджень. Під час викладення тексту застосовується, в основному, сучасна наукова і лексична термінологія.

Зауваження по роботі:

1. До кінця незрозумілим залишається питання стосовно вимог до вихідної сировини, зокрема вмісту та складу її мінеральної частини. Як відомо, пічні агрегати металургійної та хімічної галузі дуже залежні від первинного матеріалу, який, наприклад, визначає стійкість футеровки. Вочевидь, ця проблема матиме місце в технології ЕТПКШ. Результати досліджень проведених Інститутом газу НАН України свідчать, що термічна обробка матеріалу із початковою зольністю 6-8% призводить до утворення непровідних сполук на поверхні електродів, що унеможливорює подальшу реалізацію технологічного процесу.

2. На рис. 2.3 приведена розрахункова схема ЕТПКШ. Незрозуміло як у подальших дослідженнях була використана вертикальна електрична провідність киплячого шару, яка за даними окремих дослідників має нижчий порядок ніж радіальний коефіцієнт. Окрім цього, ділянка під електродом відповідно до плоского виконання цього вузлу, вочевидь, не матиме надійного контакту з ним. Отже, чи досліджував автор вплив нижньої частини на електричні параметри шару? Якщо ні, то чому оминув цей надважливий момент.

3. У пп. 2.4.1 автор наводить досить стислий аналіз моделей питомого електронного опору щільних упаковок шару, зокрема

залежності Лакомського В.І., Дульнева Г.Н., В.А. Єршова й В.А Кравченко та обирає у підсумку останню, як таку що у найбільшій мірі відповідає критеріям адекватності, зручності використання тощо. Проте в дисертації немає жодних кількісних підтверджень висновку здобувача. Мабуть аналогічні залежності є і у закордонних публікаціях.

4. На рис. 4.6 четвертого розділу дисертації автор приводить характер зношення електроду в процесі експлуатації електротермічної печі. Чим обумовлений цей механізм зміни форми електроду?

5. Як в літературному огляді так в основних матеріалах дисертації відсутня інформація стосовно впливу газорозподільного пристрою, хоча це один із ключових чинників щодо структури шару. Отже, питання підведення газу, відведення матеріалу, провалу частинок крізь решітку, та їх вплив на загальну роботу печі залишилися невизначеними у роботі?

6. Впровадження результатів дисертації в більшості обмежується впровадженням у проект. В дисертації досить обмежено надана інформація щодо практичних аспектів реалізації розробки та пуску печі на базі електротермічного шару. У п'ятому розділі роботи автор надає результати щодо впровадження результатів, зокрема розробки електротермічної печі продуктивністю 1 т/г, а також допоміжного обладнання. Необхідно надати актуальну інформацію щодо стану пуску технологічної лінії та перспективах її подальшої експлуатації.

7. Формулювання новизни роботи на мій погляд не дуже вдале. Так пункти новизни 1, 3, 5, 6 дещо доповнюють та повторюють один одне.

Висновки.

Представлена на відгук дисертація Федорова Сергія Сергійовича є завершеною науково-дослідною роботою, у якій сукупність результатів, а саме: вдосконалена фізична модель процесу електричної провідності киплячого шару вуглецевого матеріалу, комплексна напівемпірична модель електричної провідності киплячого шару та результати його експериментального дослідження, комплексне дослідження розподілу джерел теплоти та температури у високотемпературній печі з електротермічним киплячим шаром та методика визначення її основних конструктивних параметрів та технологічних режимів роботи, можна розглядати як значний внесок у розвиток наукових основ створення високотемпературних печей з електротермічним киплячим шаром для обробки вуглецевої сировини при температурах 2000-3000°C та отримання графіту із вмістом вуглецю не менш 99,95%.

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

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 апробовані на міжнародних конференціях.

Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», що затверджений постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24 липня 2013 р., а її автор Федоров Сергій Сергійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,
Академік НАН України,
доктор технічних наук, професор,
директор Інституту газу НАН України



Б. І. Бондаренко

