

ВІДГУК

офіційного опонента Нікольського В. Є. на дисертаційну роботу Федорова Сергія Сергійовича «Розвиток наукових основ створення високотемпературних агрегатів з електротермічним киплячим шаром для очищення вуглецевих матеріалів», що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»

Актуальність теми.

Розвиток відновлювальної енергетики є одним із пріоритетних напрямів енергетичної стратегії України до 2035 р. Потужним ресурсом для вирішення такого класу задач є сонячні електростанції, які забезпечують пряму конвертацію електромагнітної енергії в електричну. Проте вже зараз країна відчуває певні технічні проблеми з цього приводу, що призводить до небажаних економічних наслідків. Глибина й складність питання полягає у синхронізації роботи енергетичних комплексів із національною енергетичною системою. В цьому контексті створення акумуляторів електричної енергії та розробка відповідних технологій щодо отримання матеріалів для цих потреб, зокрема графіту, є важливою науково-практичною задачею.

Ринок вуглецевих матеріалів спеціального призначення постійно зростає і за окремими показниками, цей процес можна без перебільшення охарактеризувати як бурхливий: вже у найближче десятиріччя потреба у батарейному графіті стане еквівалентною до наявного споживання графітових електродів.

Ще одним аспектом використання вуглецю, до якого дисертаційна робота має безпосереднє відношення, є глобальне підвищення температури навколишнього середовища. Одним з напрямів вирішення цієї проблеми є саме створення таких умов сталого розвитку промисловості, за яких будь-які матеріальні відходи можуть бути багаторазово перероблені й залишитися таким чином у технологічному циклі. Проблема відходів вуглецю та їх рециклінгу актуальна та набуває значного масштабу відповідно до рівня його споживання.

Технологія електротермічного киплячого шару дозволяє мати справу із «брудними» вуглецевими відходами. Водночас вона вирішує не тільки питання очищення графіту від хімічних сполук, але й відновлення фізичних властивостей цього матеріалу безпосередньо пов'язаних із його споживчою цінністю.

Таким чином, рецензована робота, яка спрямована на розробку й удосконалення технології та агрегатів електротермічного киплячого шару для отримання чистих графітованих матеріалів є актуальною у науковому та прикладному плані.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана відповідно до наукових напрямів кафедри промислової теплоенергетики Національної металургійної академії України та є складовою частиною

науково-дослідних п'яти держбюджетних робіт, що виконувалися у академії, та міжнародних 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).

Методи дослідження

Наукові результати дисертаційної роботи отримані шляхом теоретичних та експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження електричної провідності дисперсних вуглецевих матеріалів у щільному та псевдозрідженому шарі проведені за допомогою розроблених експериментальних установок із подальшою перевіркою робочих гіпотез на створеній пілотній електротермічній печі. Розрахунково-теоретичні дослідження виконанні на основі створених математичних моделей: структурних властивостей випадкових дисперсних систем, електричної провідності неоднорідних структур у поєднанні із каркасною моделлю провідності елементарного об'єму, процесів теплообміну у високотемпературних електротермічних печах на основі двофазної теорії псевдозрідження, процесів тепломасообміну в теплообмінних апаратах із псевдозрідженням та рухомим щільним шаром. Дослідження температурних умов високотемпературного очищення вуглецевих матеріалів виконано за допомогою програмного пакету термодинамічних розрахунків рівноважного стану та властивостей багатоконпонентних гетерогенних систем «Terra».

Наукова новизна отриманих результатів

Новими результатами, отриманими у ході виконання дисертації є наступні положення:

На основі експериментальних та теоретичних досліджень отримало подальший розвиток фізичне уявлення електричної провідності киплячого шару електропровідних часток в атмосфері інертного газу для температур 273-3500 К. Доведено що провідність 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. Ефект зниження електропровідності киплячого шару із збільшенням щільності струму та температури процесу обумовлений джоулевою теплотою в контактах та дисипацією енергії в у прилеглих зонах.

Науково обґрунтована комплексна напівемпірична модель електропровідності шару дисперсних часток електропровідного матеріалу, що включає диференційне рівняння електричного поля з неоднорідними властивостями та систему кінцевих алге-

браїчних рівнянь відносно потенціалів часток, фізичні контакти яких у шарі утворюють полігональний електропровідний каркас. Контактний опір визначається на основі емпіричних залежностей ПЕО від розміру часток, щільності струму та температури. Модель враховує геометрію робочого простору, тиск у шарі та гідродинамічний режим процесу.

На основі математичного моделювання визначено вплив газових бульбашок на електропровідність електротермічного киплячого шару вуглецевого матеріалу. Встановлено, що зміна розміру та взаємного розташування бульбашок відносно одне одного практично не впливає на електропровідність киплячого шару, а за об'ємної частки бульбашок $\delta = 2-5\%$ відносна електропровідність складає $\Lambda = 0,98-0,92$. Отримано регресійну залежність відносної електропровідності від об'ємної долі бульбашок у шарі $\Lambda = 0,99 - 1,34 \cdot \delta$, яка дозволяє визначати вплив бульбашок з похибкою менш 1%.

За допомогою імітаційної каркасної моделі фізичної взаємодії часток полідисперсного матеріалу доведено, що мінімальному об'ємі нерухомого шару (емульсійної фази киплячого шару), якому притаманні фізичні характеристики та властивості шару у задачах теплообміну, відповідає 3D-структура з лінійним розміром $\times 12-15d$ у калібрах середнього медіанного діаметру частинок.

Отримало подальший розвиток уявлення про вплив на електропровідність киплячого шару полідисперсної вуглецевої сировини. На основі математичного моделювання доведено, що в результаті гідродинамічної перебудови нерухомого шару у киплячий в діапазоні збільшення значень числа псевдозрідження $0,75-1,25$. доля розімкнених контактів у 3D-структурі емульсійної фази зростає від 30% до 60-70%, що обумовлює збільшення електричного опору у 8,5-10 разів по відношенню до нерухомого шару.

За результатами чисельного моделювання процесів тепломасообміну в електротермічних печах киплячого шару із коаксіальним розташуванням електродів та струмопровідним газорозподільчим пристроєм в діапазоні висоти, діаметру активної зони та висоти ділянки під електродом віднесених до діаметру електроду відповідно $0,5-5$; $1,4-2,3$ та $0,25-2$ доведено, що основним фактором, який визначає рівномірний розподіл теплової потужності у робочому просторі є відносна висота активної зони, де відбувається найбільш інтенсивне перемішування матеріалу. За умов значень цього показника ≥ 2 доля теплової потужності відповідної зони перевищує 85%, а збільшення відносної висоти ділянки під електродом в межах > 1 практично не впливає на роботу печі.

На основі математичного моделювання отримано залежності відносного діаметру D_a/D_e та відносної висоти H_a/D_e активної зони ЕТПКШ від безрозмірних потужності печі $P_1 = N \cdot \Omega / U^2 \cdot V^{1/3}$ і діаметру електроду $P_2 = D_e/V^{1/3}$. Залежності справедливі для наступного діапазону параметрів: напруга на електродах 20-220В, ПЕО киплячого шару 0,01-0,17 Ом·м, ємність печі 5-500 кг, допустима щільність струму 5-25 А/см².

Науково обґрунтовано вибір режимів управління електричною потужністю ЕТПКШ для пуску, сталій роботі та холостому ході печі на основі системи кривих, що включають: вольт-амперні характеристики псевдозріженого шару в діапазоні температур до 3000°C; вольт-амперні характеристики печі для заданої продуктивності; криві щільності струму на поверхні електродів та середньої за радіусом печі $i(I)$; залежності постійної потужності $N = \text{const}$. На основі аналізу ВАХ визначається область сталої роботи печі.

Практична цінність отриманих результатів полягає у :

- створенні методики визначення раціональних конструктивних параметрів робочого простору ЕТПКШ для заданих значень продуктивності, фракційного складу сировини, тривалості обробки, напруги, питомого електричного опору шару та температури процесу;

- розробці нових конструкцій ЕТПКШ, що забезпечують ефективну роботу печі, спрощують конструкцію елементів газорозподілу інертного газу та підвищують енергетичну ефективність печей за рахунок використання теплових ВЕР готового продукту (патенти на корисну модель України №UA108964, №UA107972, №UA100018);

- розробці способу роботи ЕТПКШ з дискретним завантаженням / вивантаженням матеріалу, що гарантує мінімальну вірогідність недостатньої тривалості обробки вуглецевого матеріалу.

- створенні пілотної установки ЕТПКШ продуктивністю 10 кг / год для умов ТОВ «Центр Матеріалознавства» (Київ, Україна). За результатами тестових випробувань графіту обробки марки ГТ-1 підтверджено вплив температури шару та питомої теплової потужності на питомий електричний опір киплячого шару.

- розробці в рамках міжнародного проекту GIPP BNL372 / STCU P482 конструкції 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.

- розробці технічної пропозиції щодо 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 для

умов ТОВ «Заваллівський графіт» (Київ, Україна).

Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри промислової теплоенергетики Національної металургійної академії України у підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційних рівнів бакалавр / магістр напрямку «144 – Теплоенергетика».

Особистий внесок здобувача полягає в розробці загальної концепції роботи, її основних науково-технічних напрямів, принципів і положень, формулюванні мети і завдань досліджень, виборі методів досліджень та узагальнення результатів, розробці експериментальних установок та математичних моделей. Всі результати, представлені в дисертаційній роботі, базуються на експериментальних і теоретичних дослідженнях, виконаних особисто та за безпосередньої участі автора.

Апробація роботи і достовірність результатів

Основні результати дисертаційної роботи докладені на 11-ти міжнародних наукових конференціях та семінарах.

Достовірність отриманих здобувачем результатів підтверджена коректністю постановок задач тепломасообміну у електротермічному киплячому шарі та конструктивних елементах високотемпературних печей, розробленими математичними моделями, що підтверджують з різною ступенем кореляції результати експериментальних та розрахункових даних.

Мова та стиль роботи

Стиль написання дисертаційної роботи та її виклад відповідають вимогам до друкованих видань, зміст роботи викладено послідовно і логічно. Текст роботи повністю відображає результати наукових досліджень, при викладі використана сучасна загальноприйнята наукова і технічна термінологія.

Публікації та автореферат

Матеріали дисертації опубліковані у 33 друкованих працях, в тому числі – 23 статті у фахових журналах (з яких 13 статей – у виданнях, рекомендованих МОН України, 6 статей – у виданнях наукометричної бази Scopus; 4 статті – у періодичних виданнях інших закордонних наукометричних баз); 4-х патенти України; 6 публікацій у матеріалах конференцій.

Аutoreферат докторської дисертації за змістом і викладом відповідає дисертаційній роботі.

Структура і обсяг роботи.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, 9 додатків (у тому числі,

5-ть – документи, що підтверджують впровадження результатів наукових досліджень). Список використаних літературних джерел містить 338 найменувань, переважна частина – це посилання на сучасні закордонні публікації. Основа частини дисертації викладена на налічує 296 сторінках загального машинописного тексту, містить 33 таблиці та 102 рисунки.

II. АНАЛІЗ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.

У вступі викладено обґрунтування дисертаційної роботи, визначено мету і завдання досліджень, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, дані про апробацію результатів дослідження та публікації здобувача за темою дисертації.

У першому розділі автор описує загальні питання пов'язані із проблемою отримання чистого вуглецевого матеріалу, зокрема для виробництва анодів літій-іонних акумуляторів.

Виконано аналіз хімічного складу вуглецевих матеріалів сировинної бази України, які потенційно можуть бути використані для зазначених потреб: зокрема, природного графіту Заваллівського родовища, антрациту, термоантрациту на його основі та нафтового коксу. Визначені та надана характеристика основних властивостей батарейного графіту, що має безпосереднє відношення як до якості кінцевого продукту так і технології його отримання..

Проведений змістовний аналіз сучасних технологій, які здатні забезпечити якість графіту за вмістом вуглецю не менш 99,95%. Зокрема висвітлені хімічні методи вилуговування, термічне очищення у печах графітації Ачесона, термохімічне очищення – із використанням галогенів та технології електротермічного киплячого шару. На основі співставлення технологічних, екологічних та енергетичних показників зазначених процесів автор доводить перспективність подальшого розвитку саме напрямку на основі електротермічного киплячого шару.

Наприкінці розділу наведено результати термодинамічних розрахунків хімічної рівноваги вуглецевої сировини в атмосфері азоту, як основного компоненту псевдозрідження, в умовах високих температур. У підсумку автор формулює завдання подальших досліджень у своїй роботі.

Зауваження до першого розділу:

1. В аналізі ринку графітових матеріалів, виконаному у першому розділі, так само як і в матеріалах про впровадження результатів дисертаційної роботи, відсутня інформація щодо економічних показників технології термічної обробки сировини у печах електротермічного киплячого шару. Також не висвітлено проблему подальшого застосування відходів сфередизації вже очищеного графіту для потреб анодів літійєвих акумуляторів, що має істотно впливати на собівартість кінцевої продукції.

2. Стор.32 п. « Мета і завдання досліджень» вказано «...отримання графіту з вмістом вуглецю не менш 99.95 %...», але ні в п. «Наукова новизна одержаних результатів», ні в п. «Практичне значення одержаних результатів» автореферата, ні в «Висновках по дисертаційній роботі» автор не вказує, що поставлена мета реалізована на діючому або експериментальному апараті. Окрім цього, з тексту дисертації теж не зрозуміло, чи взагалі досліджувались вказані показники, або якісні показники чистоти одержаних вуглецевих матеріалів, та втрат матеріалу наприклад з угаром.

Другий розділ присвячений дослідженню явища електричної провідності киплячого шару, оскільки саме це є визначальним фактором у тепловій роботі високотемпературних електротермічних печей киплячого шару.

Основною метою розділу автор ставить саме розробку методичного апарату, який би дозволив йому визначати та прогнозувати питомий електричний опір шару. Для цього були проведені теоретичні та експериментальні дослідження. В якості параметрів, що визначають електричний опір розглянуті режим псевдозрідження, висота шару, структура неоднорідного киплячого шару (розмір та характер розподілу пазирів), провідні властивості газової фази та матеріалу, а також контактний опір між частинками.

В теоретичному аналізі автор застосовує доволі складну власну імітаційну модель емульсійної фази матеріалу, яка відтворює умови випадкової упаковки частинок полідисперсного матеріалу у полі дії об'ємної сили. Зазначений підхід дозволив вирішити декілька принципів питань, зокрема, який лінійний розмір шару може вважатися таким що відповідає елементарному об'єму, а також зв'язок контактної взаємодії частинок із режимом псевдозрідження та величиною питомого електричного опору. Розрахункові результати поєднані із отриманими експериментальними даними стосовно питомого електричного опору нерухомого шару в умовах відсутності навантаження.

Відносно впливу температури та щільності струму на величину опору на основі відомих експериментальних даних автор доходить висновку та підтверджує, зв'язок питомого електричного опору із кількістю активних контактів частинок в емульсійній фазі та виділенням джоулевої теплоти у них.

У підсумку автор наводить розроблену методику розрахунку (моделювання) питомого електричного опору киплячого шару частинок вуглецевого матеріалу, що дозволяє перейти до дослідження самих електротермічних печей киплячого шару.

Зауваження до другого розділу:

1. На підставі виконаного у п. 2.3.1 аналізу провідності азоту в умовах слабкої іонізації за температур до 3500°C здобувач робить висновок про можливість у подальшому не враховувати фактор провідності газової фази. У той же час пічна атмос-

фера електротермічної печі, окрім азоту, буде насичена безліччю часток інших хімічних елементів, тому теза про непровідні властивості пазирів, вочевидь, потребує експериментального підтвердження або уточнення.

У третьому розділі автором вирішуються задачі здебільшого прикладного характеру, але також із елементами наукової новизни. За головну мету розділу поставлено розробку обґрунтованих методів визначення конструктивних параметрів електротермічних печей киплячого шару для обробки вуглецевої сировини. Переважна частина досліджень розділу зроблена шляхом теоретичного аналізу.

Автором вивчаються питання щодо вибору висоти так-званої активної зони термічної обробки, ділянки під електродом та надшарового простору, діаметру печі та електроду. Водночас у якості критеріїв, що забезпечують раціональний вибір конструкції печі, є: виділення основної (більш 90%) потужності в активній зоні печі, неоднорідність температурного поля за радіусом активної зони, допустима щільність струму в електроді, питомі теплові втрати від зовнішнього охолодження через футеровку печі та центральний електрод.

На основі отриманих результатів автором розроблено методику розрахунку основних розмірів печі за допомогою якої створено пілотну установку- прототип електротермічної печі продуктивності 10 кг/год, на який досліджено вольт-амперні характеристики печі, та визначені режими сталої роботи в залежності від продуктивності печі та робочого струму. Визначено, що нелінійна залежність питомого електричного опору від температури та потужності печі має неоднозначний характер, що потребує додаткових вимог до джерел живлення.

Проведені випробування електротермічної печі, знайдена відповідність електротермічного та гідродинамічного режимів в шару до математичних моделей та гіпотез.

Зауваженнями до третього розділу є:

1. З метою визначення конструктивних характеристик електротермічних печей здобувач наводить результати теоретичних досліджень розподілу потужності між активною зоною термічної обробки та ділянкою під електродом, неоднорідності температурного поля за радіусом печі, а також теплових втрат через ізоляцію та футеровку. Недоліком є досить узагальнений підхід щодо гомогенної структури шару за радіусом, що не враховує у повній мірі локальні характеристики притаманні пазирковому режиму: наявність пазирів здебільшого у середині матеріалу та на периферії.

2. На стор.171. автор вказує, «...що в якості критеріїв раціональних інженерних рішень на рівні з технічними умовами експлуатації і питомими енерговитратами, повинні прийматися наступні показники: надійність роботи печі, рівномірність

обробки та якість готового продукту». Але у одержаних аналітичних залежностях вказані показники, або їх аналоги відсутні.

З тексту дисертаційної роботи не зрозуміло адекватність якої математичної моделі дотримувався автор у створенні лабораторної ЕТПКШ продуктивністю 10 кг/год. Автор не наводить у тексті роботи ні схеми лабораторної ЕТПКШ, ні методики дослідження, ні апаратурно-вимірювального оформлення досліджень, окрім малюнка принципової схеми робочого простору ЕТПКШ. Не зрозуміло на яких підставах базуються висновки автора (мал.3.2 і 3.3).

У додатку Г автор надає «Методику випробувань ЕТПКШ продуктивністю 10 кг/год». Але методика випробувань не є аналогом методики досліджень, за результатами яких автор робить наукові висновки.

3. На стор.176, вказано «На рис.3.2 - 3.3. представлені окремі результати для потужності тепловиділень піделектродної ділянки...».

З тексту не зрозуміло: результати яких досліджень, за якою методикою вони отримані. Якщо це є результати досліджень автора, то яким чином вони одержані, а якщо це результати інших авторів, то повинна бути посилання на інші роботи.

4. На стор.180 п.«Дослідження неоднорідності температурного поля ЕТПКШ...» вказано, що методика досліджень базується на дослідженнях інших авторів і автор робить відповідне посилання. Але через кілька сторінок на стор.187 автор вказує, що подібна методика не відображає «реальної картини...». Не зрозуміло навіщо цю методику покладено в основу досліджень неоднорідності температурного поля ЕТПКШ.

Замість методології досліджень ЕТПКШ, котра би включала взаємозв'язок режимних та конструктивних параметрів, автором запропоновано чисельний експеримент і одержана залежність (3.13), яка включає безрозмірний час перебування матеріалу в зоні термообробки та відношення активного та еквівалентного діаметрів активної зони термообробки та температурний перепад за радіусом печі. Не зрозуміло, як це пов'язане з конструктивними параметрами ЕТПКШ з тепломасообміном, з потужністю, гідродинамікою, що впливають на апаратурне конструктивне оформлення ЕТПКШ.

5. На стор.172-226, викладено аналітичний аналіз джерел та чисельний експеримент, що пояснює умови ефективної роботи ЕТПКШ. Автор робить висновки, що впливає на енергоефективність, технологічні та конструктивні особливості роботи ЕТПКШ: неоднорідність температурного поля $\Delta t/t_{\text{раб}}$, продуктивність G , розмір частинок d_2 , збільшення висоти активної зони, зменшення втрат теплоти крізь стінку $Q_{\text{втр}}$

та інші показники, але у отриманих чисельним методом залежностях вказані показники відсутні. Не зрозуміло, яким показникам відповідає коефіцієнт кореляції 0,98 отриманого виразу (3.13).

6. У п. 3.5.1. стор.209 «Розробка дослідної конструкції ЕПТКС продуктивністю 10 кг/год для ТОВ «Центр матеріалознавства», при обговоренні експериментальних результатів пуску дослідної конструкції автор вказує, що «... температура матеріалу після вивантаження становила 700-800 °С...», тоді як раніше у п. «Мета завдання досліджень» стор. 31 автор вказує, що «...отримання графіту із вмістом вуглецю не менш 99-95% повинно відповідати температурі 2000-3000 °С...». Крім того автор вказує, що «...умовами видалення сторонніх хімічних елементів та часом графітації має бути температура більше 2800 °С...».

Не зрозуміло яким якісним показникам має відповідати графіт при таких низьких температурних навантаженнях.

Мета експерименту підтвердити аналітичні та теоретичні положення дисертаційної роботи. У висновках до розділу 3 п.9 автор вказує «...співставлення експериментальних даних по нагріванню матеріалу в діапазоні до 700 °С і математичної моделі печі показало відповідність результатів отриманих опитним та теоретичним шляхом...». Не зрозуміло, яким чином дані по нагріванню матеріалу які одержані при температурах до 700-800°С можуть відповідати даним, одержаним при температурах 2500-3000°С. Не зрозуміло, що автору заважало одержати достовірні експериментальні результати, які би підтверджували всі теоретичні та аналітичні висновки дисертаційної роботи. Крім того з тексту дисертаційної роботи не зрозуміло з яких компонентів складається математична модель печі в якому місці дисертації вона прописана.

В четвертому розділі та його висновках автор аналізує причини погіршень показників очищення графіту у дослідній конструкції ЕПТКС та пропонує заходи до її покращення. В якості пріоритетних напрямків обрані управління режимами завантаження / вивантаження матеріалу, раціоналізація схеми подачі агенту псевдозрідження та утилізації теплоти готового продукту на нагрів сировини.

Стосовно режиму завантаження / вивантаження розроблена автором схема передбачає дискретизацію процесу у часі: завантаження – пауза (термічна обробка) – вивантаження. При чому у схемі задіяна тільки певна (незначна) частина матеріалу по відношенню до його маси у робочому простір, що дозволяє зберегти електротермічний і гідравлічний режими. Автором визначені умови та кількісні показники реалізації процесу у вигляді допустимих значень долі витримки матеріалу.

З метою удосконалення газорозподільчого пристрою запропоновано підведення газу через центральний електрод. Нова конструкція дозволяє суттєво спростити конструкцію ділянки під електродом по відношенню до відповідних аналогів. Переваги

такого рішення підтверджені експериментально.

Утилізація теплоти готового продукту на основі технологічної схеми передбачає застосування системи каскадних теплообмінників киплячого шару до та після печі, що у підсумку дозволяє наблизити схему до протитечії. Визначено радіальне компонування секцій теплообмінника та надані рекомендації щодо організації надійного руху сировини у цих апаратах.

У підсумку, зауваженнями до четвертого розділу є:

1. В 4-му розділі здобувачем розроблений режим завантаження / вивантаження матеріалу спрямований на збільшення гарантованого часу перебування матеріалу у робочому просторі та відповідно покращення якості готового продукції. Автором отримані залежності коливання температури (ентальпії) матеріалу в залежності від режиму, проте надані виключно кінцеві вирази. Отже, в дисертації не вистачає проміжних викладок як само ці залежності були отримані.

2. На рис. 4.4. надана розроблена схема подачі газу у шар матеріалу через центральний електрод, що як мінімум дає змогу унеможливити втрати азоту через нещільності. Проте для доведення переваги зазначеної схеми над аналогами не вистачає її апробації на гарячій фізичній моделі.

П'ятий розділ присвячений впровадженню результатів роботи для умов American Energy Technologies Co. (Chicago, US), яка спеціалізується на розробці інноваційних технологій на базі вуглецевих матеріалів. На основі результатів попередніх розділів за безпосередньою участю автора була розроблена технологія спрямована на високотемпературну термічну переробку первинної та вторинної (відходи анодів) вуглецевої сировини. При цьому були розроблені технічні завдання, конструкторська документація та виготовлено основне та допоміжне обладнання, зокрема піч продуктивністю 1 т/год, холодильники готового продукту, шнекові живильники, сушарка, скруббер та циклон системи очищення. Розроблено обладнання відправлено до замовника.

Зауваженнями п'ятого до розділу є:

1. Розроблений комплекс (рис. 5.1) позиціонується як універсальна технологія як для вуглецевої первинної сировини так і відпрацьованих анодів літєвих батареї. Постає питання стосовно вимог до вихідної сировини. Другим питанням з приводу переробки анодів є вибір інших температур процесу, оскільки матеріал чистіший у порівнянні до тих самих природних графітів. Крім того, складовою анодів є сферичний графіт у вигляді сфер 10-35 мкм. Отже, ця сировина заздалегідь непридатна для обробки у киплячому шарі. Не зрозуміло як планується вирішувати це питання?

III. ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ ТА ПОБАЖАННЯ.

1. Автор роботи володіє знаннями в галузі з тепломасообміну та пов'язаних із ним прикладних питань, має навички постановки і проведення фізичних експериментів і узагальнення результатів. Їм отримано узагальнюючий науково-практичний матеріал про властивості електротермічного киплячого шару, теплову роботу печей та методи визначення їх конструктивних параметрів. Автором продемонстрував сучасний рівень знань в галузі математичного моделювання, чисельного аналізу, та складання програм для чисельного розрахунку електротермічних печей киплячого шару.

2. Закономірним є продовження отриманих наукових досліджень для втілення у промисловість електротермічних печей киплячого шару, режимів їх експлуатації та показників якості готової продукції. Це розширить рівень уявлення про електротермічний спосіб обробки графіту в киплячому шарі, а також застосування цього методу у сучасних проблемах обробки вуглецю.

3. З наведених у дисертаційній роботі матеріалів та у додатках не наводяться технічні, якісні, екологічні та комерціалізаційні данні запропонованого автором технологічного комплексу з термічного очищення графіту. Не наводяться строки втілення комплексу з термічного очищення графіту у промисловість, не зрозуміло чи буде коли небудь розроблений комплекс запроваджено у промисловість і яким чином мають бути одержані високі показники якості вуглецевого графіту та супутні екологічні показники, що замовлені автором у постановочній частині досліджень.

IV. ВИСНОВКИ ОПОНЕНТА

Дисертаційна робота Федорова Сергійовича є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі виконаних наукових досліджень досягнута мета : «розвиток наукових основ створення високотемпературних печей з електротермічним киплячим шаром для обробки вуглецевої сировини».

Роботу виконано на сучасному науково-технічному рівні, отримані результати розширюють знання в галузі процесів тепломасообміну у високотемпературному електротермічному шарі для термічного очищення та графітації вуглецевих матеріалів, які дозволяють використовувати методичний апарат для моделювання відповідних процесів та створення агрегатів на їх основі і вносять новизну у існуючу практику створення високотемпературних печей з електричним киплячим шаром.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки та рекомендації є обґрунтованими.

Оформлення та стиль подання матеріалу дисертаційної роботи доступні до сприйняття і відповідають сучасним вимогам, що пред'являються до наукових праць.

Зміст автореферату повністю відповідає тексту дисертації, основні наукові положення, що містяться в дисертації і авторефераті повністю ідентичні.

