

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук

Дешка Валерія Івановича

на дисертаційну роботу кандидата технічних наук

Федорова Сергія Сергійовича

на тему «Розвиток наукових основ створення високотемпературних агрегатів з електротермічним киплячим шаром для очищення вуглецевих матеріалів», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Актуальність теми дисертації.

Новітні сучасні технології, пов'язані із енергозбереженням та раціональним використанням природних ресурсів, постійно використовуються та отримують свій подальший розвиток в Україні. Літій-іонні автономні джерела живлення, які на 20-25% складаються із спеціального графіту знайшли своє застосування практично в усіх сферах суспільного життя. Україна завдяки потужній інфраструктурі виробництва синтетичного та природного графіту здатна задовольнити як власні потреби в цій сировині так і потреби інших країн.

Отримання графіту відповідної якості можливо завдяки декільком технологіям: багато ступенева обробка кислотою, високотемпературна обробка хлором та високотемпературна термічна обробка. Технологія обробки природної сировини за допомогою сильних кислот, поширені здебільшого у КНР, призводить до утворення величезної кількості стічних вод. Використання хлору також пов'язано з екологічними питаннями та питаннями безпеки експлуатації. Таким чином, напрямок термічної очистки графіту є перспективним. Обробка графіту у електротермічних печах з щільним шаром (печі Ачесона) є коштовним, енерговитратним та тривалим процесом. Альтернативою йому є технологія високотемпературного електротермічного киплячого шару, яка дозволяє виробляти графітовані матеріали відповідної якості у поточному режимі.

Розвиток технології високотемпературної обробки у електротермічному киплячому шарі вимагає створення високопродуктивних промислових комплексів на основі високотемпературних печей і потребує відповідного наукового супроводження. Усе це робить актуальною дисертаційну роботу Федорова С.С., яка спрямована на вирішення актуальної науково-технічної проблеми - розвиток наукових основ створення високотемпературних печей з електротермічним киплячим шаром для обробки вуглецевої сировини при температурах 2000-3000°C.

Дисертація відповідає «Енергетичній стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» та «Державній цільовій економічній програмі енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2020 роки», науковим напрямам кафедри промислової теплоенергетики Національної металургійної академії України, і виконувалася у рамках декількох держбюджетних тем НМетАУ, а також 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). Зв'язок роботи з науковими програмами і темами також підтверджує її актуальність.

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, представлених у дисертаційній роботі.

Автором особисто визначені загальна проблематика, концепція, основні науково-технічні засади та положення роботи; сформульовані мета, задачі та обрано методи досліджень; розроблені математичні моделі, експериментальні пристрої, а також принципові технічні рішення щодо основного та допоміжного обладнання технології електротермічного псевдозрідженого шару; отримані результати теоретичних досліджень впливу щільності струму та температури на питомий електричний опір псевдозрідженого шару; розроблено загальною концепцією та досліджено теплову ефективність застосування секційних утилізаторів теплоти готового продукту за технологічною схемою; отримано результати математичного моделювання та аналізу провідності шару.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків та їх достовірність.

Наукові положення і висновки наведені у дисертації отримані автором на основі глибокого теоретичного аналізу та експериментальних досліджень процесів високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів у електротермічному киплячому шарі. Достовірність отриманих результатів підтверджена застосуванням: фундаментальних положень теорій процесів переносу у неоднорідних середовищах, електричної провідності контакту, псевдозрідження, тепломасообміну та загальноприйнятих фізичних уявлень про електричну провідність псевдозрідженого шару; відповідністю отриманих результатів до результатів експериментальних досліджень питомого електричного опору шару, упаковки шарових структур; використанням в експериментальних дослідженнях загальноприйнятих методів випробувань та вимірювального обладнання.

Ступінь новизни результатів дисертаційного дослідження.

У дисертаційній роботі:

1. Отримала подальший розвиток фізична картина електричної провідності киплячого шару електропровідних часток в електротермічному киплячому шарі на основі використання двофазної моделі псевдозрідження. Провідність обумовлена електроконтактною взаємодією часток емульсійної фази. Зростання електричного опору шару під час псевдозрідження переважно є результатом поступового розриву їх фізичних 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.

2. 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 ПЕО від розміру часток, щільності струму та температури.

3. На основі математичного моделювання визначено вплив газових пузирів на електропровідність електротермічного киплячого шару вуглецевого матеріалу. Встановлено, що за об'ємної частки пузирів $\delta = 2-5\%$ відносна електропровідність складає $\Lambda = 0,98-0,92$. Отримано регресійну залежність відносної електропровідності від об'ємної долі пузирів у шарі $\Lambda = 0,99 - 1,34 \cdot \delta$.

4. Отримала подальший розвиток уявлення про вплив на електропровідність киплячого шару полідисперсної вуглецевої сировини. На основі теоретичних і експериментальних

досліджень доведено, що основна перебудова нерухомого шару у киплячий, відбувається в інтервалі чисел псевдозрідження $W = 0,75-1,25$. В результаті доля розімкнених контактів емульсійної фази зростає від 30% до 60-70%, а кратність підвищення ПЕО по відношенню до нерухомого шару складає 8,5-10.

5. За результатами чисельного моделювання процесів тепломасообміну в електротермічних печах киплячого шару із коаксіальним розташуванням електродів визначено, що основним фактором, який визначає рівномірний розподіл теплої потужності у робочому просторі є відносна висота активної зони, при значеннях ≥ 2 її доля теплої потужності перевищує 85%, а збільшення відносної висоти ділянки під електродом в межах > 1 практично не впливає на роботу печі.

6. За результатами параметричного дослідження впливу різних факторів на неоднорідність температурного поля високотемпературних електротермічних печей киплячого шару показано, що перепад температур матеріалу у радіальному напрямку робочої зони визначається відносними втратами теплоти від зовнішнього охолодження, співвідношення діаметрів активної зони й електроду, а також безрозмірним часом перебування матеріалу у шарі.

7. Вперше на основі математичного моделювання отримано узагальнені науково обґрунтовані 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 діаметра електрода $P_2 = D_e/V^{1/3}$.

8. Вперше науково обґрунтовано вибір режимів управління електричною потужністю ЕТПКШ для пуску, області сталої роботи та холостого ходу печі на основі системи кривих, що включають: вольт-амперні характеристики псевдозрідженого шару, вольт-амперні характеристики печі для заданої продуктивності, залежності постійної потужності та ін.

Практична цінність отриманих результатів.

Отримані результати досліджень дозволили здійснити ряд методичних, технічних та технологічних розробок пов'язаних із електротермічними печами киплячого шару для високотемпературної обробки вуглецевої сировини. Основними з них є наступні:

1. Розроблена методика визначення раціональних розмірів внутрішнього робочого простору ЕТПКШ для заданих значень продуктивності, фракційного складу сировини, тривалості обробки, напруги, питомого електричного опору шару та температури процесу.

2. Розроблені конструкції ЕТПКШ захищені патентами на корисну модель №UA108964, №UA107972, №UA100018 що вирішують питання надійності роботи печі, спрощення конструкції вузла подачі інертного газу, використання теплоти готового продукту для підігріву сировини.

3. Запропоновано спосіб роботи ЕТПКШ (патент №UA107971) на основі дискретного завантаження / вивантаження матеріалу, в якому середній період термічної обробки сировини у робочому просторі залишається без змін та поділяється на окремі операційні цикли. Спосіб забезпечує необхідну тривалість обробки вуглецевого матеріалу та якість готового продукту.

4. Створено пілотну установку ЕТПКШ продуктивністю 10 кг / год для умов ТОВ «Центр Матеріалознавства» (Київ, Україна). За результатами тестових випробувань графіту марки ГТ-1 підтверджено вплив температури шару та питомої теплої потужності в одиниці об'єму на питомий електричний опір киплячого шару.

5. З участю ДП «Конструкторське бюро «Південне» (Дніпро, Україна), ТОВ «Центр матеріалознавства» (Київ, Україна) та ТОВ «УкрНПЕлектротерм» (Запоріжжя, Україна) за підтримки US Department of energy (SW Washington, DC, US), Brookhaven National Laboratory

(New York, US) і міжурядової дипломатичної 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.

6. Для умов 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.

7. Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри промислової теплоенергетики Національної металургійної академії України у підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційних рівнів бакалавр / магістр напряму «144 – Теплоенергетика» в курсах лекцій, а також для виконання дипломних та науково-дослідних робіт.

Аналіз основного змісту роботи.

Дисертаційна робота являє собою рукопис, обсяг якого складає 302 сторінки основної текстової частини, 33 таблиць, 102 рисунків і 4 додатків. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків за результатами досліджень і переліку використаних літературних джерел, який містить 338 найменувань. Роботу виконано в Національній металургійній академії України.

У *вступі* висвітлені стан, значущість наукової проблеми, наведене обґрунтування актуальності роботи, визначені мета та задачі досліджень, надані відомості про публікації автора за темою дисертації, апробацію її результатів та особистий внесок автора. Обсяг та форма «Вступу» відповідають загальноприйнятим вимогам до докторських дисертацій та достатні для ознайомлення з вихідними передумовами і змістом положень, що виносяться автором на захист.

У *першому розділі* автор шляхом критичного аналізу сучасних літературних джерел обґрунтоває актуальність батарейного графіту, визначає сучасні тенденції світового ринку та економічне підґрунтя подальших наукових та технічних розробок його виробництва. Автором також виконаний аналіз якісних показників технологій рафінування графіту, економічної доцільності технології електротермічного киплячого шару.

Логічним розвитком змісту розділу є аналіз фізичних властивостей як самої сировини так графітових матеріалів, що є необхідним для сприйняття та аналізу високотемпературних теплових процесів у зазначених агрегатах. На основі моделювання термічного очищення з використанням програмного комплексу TERRA визначені рівноважні термодинамічні умови вилучення хімічних домішок із графіту, що дало змогу автору отримати певну базу температурних умов, за яких необхідно вести у подальшому технологічний процес.

Перший розділ завершується постановкою завдань досліджень .

Другий розділ дисертації є одним із найбільших структурних елементів роботи, який охоплює близько 25-30% загального змісту. Основною проблематикою розділу є дослідження явища електричної провідності високотемпературного електротермічного киплячого шару, як основного механізму, що визначає обробку сировини. З огляду на складність питання та розрізненість наукової інформації з цього приводу, автор поєднує власні експериментальні дослідження із моделюванням структури киплячого шару та залученням даних інших дослідників. Зокрема автором теоретично визначено вплив газових пузирів, їх розміру та розподілу та провідності газової фази, упаковки емульсійної фази, шорсткості контактів.

Експериментально отримані нові дані про питомий електричний опір електродного та природного графіту у так-званому ненавантаженому стані.

На основі аналізу експериментальних даних щодо впливу надвисоких температур та щільності струму у поєднанні із моделюванням каркасу шару автор доходить висновку, що питомий електричній опір здебільшого залежить саме від теплової потужності, яка виділяється безпосередньо у наявних контактах частинок емульсійної фази.

Третій розділ присвячений розвитку наукових основ конструювання та вибору режимів електротермічних печей киплячого шару. Автором проведено додаткові дослідження теплообміну за умов коаксіальної орієнтації електродів: вплив режиму псевдозрідження на розподіл теплової потужності; умови ефективної роботи активної зони печі; розподіл теплової потужності за радіусом та його зв'язок з неоднорідністю температурного поля.

Шляхом їх поєднання з результатами другого розділу автором проведено вивчення параметричного зв'язку розмірів робочого простору та режимів електротермічних печей. У підсумку, отримані результати узагальнені у вигляді критеріальних залежностей для конструювання електротермічних печей киплячого шару та методик їх розрахунку.

В якості апробації створена пілотна піч продуктивністю 10 кг/год. На основі її випробувань підтвердженні робочі гіпотези, зроблені у попередніх розділах дисертації.

Четвертий розділ має відношення до заходів підвищення ефективності роботи електротермічних печей киплячого шару, якості готової продукції, забезпечення сталого електротермічного режиму та енергозбереження.

Проблемою поточних однокамерних апаратів киплячого шару є стохастичний вихід необрблених пакетів продукту через інтенсивне перемішування матеріалу. Традиційні методи подовження тривалості процесу за рахунок декількох робочих камер або додаткових перегородок неможливі в електротермічних печах. Автор знаходить та вивчає вдале рішення розведення у часі подачі та відведення матеріалу шляхом імпульсної роботи відповідних живильників, часу перебування матеріалу у шарі за рахунок розробленої схеми цілком достатньо для повної обробки сировини.

Газорозподільча решітка печі є витратним елементом, що працює у складних температурних умовах. Для спрощення подової частини печі, в якій відбувається вивантаження матеріалу, автором запропоновано замість неї здійснювати подачу газу через центральний електрод. Ефективність заходу підтверджена натурними експериментами.

Останній пункт четвертого розділу присвячений економії енергії при використанні нагріву сировини в секційних апаратах киплячого шару із проміжним теплоносієм за рахунок теплоти готового продукту.

В п'ятому розділі приведені дані промислового впровадження результатів дисертаційної роботи для умов фірми АЕТС (США), які були отримані за безпосередньої участі автора та були реалізовані у рамках міжнародного проекту Р482 міжурядової організації НТЦУ (м. Київ). Результати впровадження підтвердженні відповідними актами.

Повнота викладення матеріалів дисертації в публікаціях та її апробація.

Матеріали дисертації опубліковані в 33 друкованих працях, в тому числі: 23 статті у фахових журналах, з яких 6 статей входять до наукометричної бази Scopus, 4 – до періодичних видань інших закордонних наукометричних баз); 4 – патенти України; 6 – матеріали конференцій.

Текст дисертаційної роботи повністю відповідає результатам наукових досліджень та наукових розробок.

Основні положення і результати роботи доповідались, обговорювались на 11 конференціях і семінарах міжнародного рівня.

Автореферат дисертації за змістом і викладом відповідає дисертаційній роботі.

Мова і стиль викладання матеріалів роботи.

Дисертаційна робота та автореферат написані державною мовою.

Матеріали дисертації подані логічно з використанням сучасної наукової та технічної термінології, з додержанням вимог щодо оформлення матеріалів досліджень та технічних розробок.

Зауваження та пропозиції по дисертаційній роботі.

Do другого розділу.

1. У другому та третьому розділах автор багато посилається на так-звану осередкову модель киплячого шару, яка ґрунтуються на відомих залежностях стосовно розміру и частоти пузирів. Проте не вистачає детального опису цієї моделі у дисертації або її додатках, зокрема як само визначався розрахунковий шаг за висотою та як враховувався вплив газорозподільчого пристрою (розмір, орієнтація, кількість отворів тощо) на розвиток пузирів.

2. Результати досліджень представлена на рис. 2.9-2.10 і в табл. 2.5 показують суттєвий вплив прикладання тиску $P = 11\text{-}50$ кПа на ПЕО щільного шару електропровідного матеріалу. Тому доречними були б відповідні дослідження при проміжних та понижених значеннях тиску.

3. В пп. 2.7.3. автор експериментально визначає ступінь впливу висоти шару на неоднорідність питомого електричного опору за висотою. Зокрема встановлено, опір шару зменшується у напрямку руху пузирів як результат, у першу чергу, збільшення їх розміру. Тому виникає питання, як враховувалась визначена особливість у подальших дослідженнях електротермічних печей.

4. Яким чином проведені тестування та перевірка адекватності запропонованої у другому розділі математичної моделі електричної провідності електротермічного киплячого шару вуглецевого матеріалу за температур до 3000°C

5. Розроблена у підсумку методика визначення питомого електричного опору високотемпературного електротермічного киплячого шару у пузирковому режимі псевдозрідження (п. 2.9) була надана автором у вигляді загального алгоритму розрахунку, основні положення якого ґрунтуються на здобутках всього другого розділу дисертації. Проте у дійсності сама методика, як продукт, що може бути використаний іншою стороною у подальших дослідженнях або для конструкторської розробки, відсутня у матеріалах дисертації.

Do третього розділу.

6. Стосовно моделі внутрішнього теплообміну у ядрі киплячого шару слід зауважити, що вертикальна складова масообміну суттєво перевищує радіальну дифузію. Згідно із конструкцією печі, розробленою для умов АЕТС (рис. 5.2) верх агрегату, вочевидь, мусить мати температури значно нижчі ніж заявлені 3000°C у ядрі активної зони. Але тепломасообмін за віссю висхідного газового потоку був виключений з аналізу в матеріалах дисертації. Потребує додаткових пояснень, як впливатиме масообмін саме на градієнт температури за висотою. Чи взагалі робилися автором спроби визначити температурне поле шару та футеровки печі, наприклад, на основі 3D-моделювання?

7. У розділі 3.5.3. розглянуто аналіз проблем управління електротермічними режимами печі. Деякі аспекти цього аналізу потребують додаткових пояснень. Чи перевірені запропоновані режими на практиці, наприклад, режим розігріву для досягнення температур

2000-2500°C? Далі, тривалість періоду розігріву визначалась згідно з експертною оцінкою, чи доцільно для цього використати нестационарні моделі? Чому на рис. 3.18, 3.19 меншій потужності відповідає більша температура?

8. При реалізації пробних випробувань печі контрольні термопари були розташовані далеко від робочої зони. Це знижує точність даних контролю за параметрами робочої зони.

До четвертого розділу.

9. В п. 4.3 автором розроблена технологічна схема використання теплоти готового продукту для забезпечення нагріву вихідної сировини. Зокрема вихідний матеріал може мати легкоплавкі сполуки, які при температурах 1000-1500°C з високою ймовірністю призведуть до агломерації частинок. Як наслідок, подальший рух матеріалу буде унеможливлений.

Далі - про доцільність використання проміжного теплоносія у вигляді азоту. Якщо скидати відпрацьований азот в атмосферу, то з урахуванням енерговитрат на його отримання заявлені показники економії (рис. 4.7) можуть бути зведені до нуля. Чи розглядалась замкнена схема використання азоту? Чи використання теплових вторинних енергоресурсів на інші потреби, наприклад, побутових споживачів цеху?

10. *Загальні зауваження стосовно редагування тексту.* Стор.66: питомі витрати електроенергії досягають 4,5-9 кВт/кг. Стор.233 має посилання на рис. 4.5а, якого немає в тексті. Стор.261: Математична модель трубного елементу вертикального теплообмінника (рис. 5.5), насправді це рис. 5.4. Стор.265: Принципова схема холодильника 1 з переходником 2 з печі показана на рис. 5.7, який в тексті відсутній.

Пункт 9 висновків: Розроблено експериментальний стенд для дослідження електропровідних властивостей дисперсних систем, що включає комплекс з експериментальних установок для визначення ПЕО: 1) щільного шару, який продувається без зовнішнього механічного навантаження; 2) щільного шару, що продувається під тиском... *Продувка на схемах і в описі установок не показана.*

Наведені зауваження та побажання не знижують загального позитивного враження від дисертаційної роботи і можуть бути використані та враховані у подальшій науковій діяльності автора.

Висновки опонента.

Дисертація Федорова С. С. є завершеною науково-дослідною роботою, містить наукові положення, нові науково-обґрунтовані результати в області теорії та практики технічної теплофізики, відомості про розроблені нові методи розрахунків, методики та експериментальне обладнання, результати впровадження розробок у виробництві та навчальний процес, які у сукупності вирішують актуальну науково-прикладну проблему - розвиток наукових основ створення високотемпературних печей з електротермічним киплячим шаром для обробки вуглецевої сировини та отримання графіту.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки і рекомендації достатньо обґрунтовані, а їх вірогідність та новизна не викликають сумніву.

Структура, оформлення та логічна побудова дисертаційної роботи відповідають сучасним вимогам, а стиль викладання матеріалу доступний до сприйняття.

Зміст автoreферату повністю відповідає тексту дисертації, а основні наукові положення, що містяться в них, ідентичні.

Основні наукові положення, висновки та рекомендації цієї роботи адекватно відображені в публікаціях автора у науково-технічних виданнях, визнаних ДАК МОН України. Матеріали дисертації були у достатній мірі представлені на конференціях державного та міжнародного рівня.

За напрямом обраних і вирішених завдань дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.14.05 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

На підставі викладеного вважаю, що дисертація «Розвиток наукових основ створення високотемпературних агрегатів з електротермічним киплячим шаром для очищення вуглецевих матеріалів» відповідає вимогам п.9,10 «Порядку присудження наукових ступенів» до докторських дисертацій, 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,
завідувач кафедри теплотехніки та
енергозбереження Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
д.т.н., професор



Дешко В.І.

Підпис Дешка В. І. засвідчує:

Вчений секретар Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



Відгук надійшов
у Раду: 20.11.2018
Вчений секретар: 