

НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ФЕДОРОВ СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 66.096.5-932.2

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ
АГРЕГАТИВ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ
ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національній металургійній академії України Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Губинський Михайло Володимирович,
Національна металургійна академія України,
м. Дніпро, завідувач кафедри промислової
теплоенергетики

Офіційні опоненти:

академік НАН України,
доктор технічних наук, професор,
Бондаренко Борис Іванович,
Інститут газу НАН України, м. Київ, директор

доктор технічних наук, професор
Дешко Валерій Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,
завідувач кафедри теплотехніки та
енергозбереження

доктор технічних наук, професор,
Нікольський Валерій Євгенович,
Український державний хіміко-технологічний
університет, м. Дніпро, професор кафедри
енергетики

Захист відбудеться «04» грудня 2018 року о 13.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.05 при Національній металургійній академії України за адресом: 49005, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 4.

Факс: +38 (0562) 47-44-27, e-mail: gubinmv@ukr.net.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної металургійної академії України (м. Дніпро, просп. Гагаріна, 4)

Автореферат розісланий «29» жовтня 2018.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
Д 08.084.05, к.т.н., доц.

М. С. Чемеринський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Світовий попит на хімічні джерела живлення для автономних приладів обумовлює значну потребу у високоякісному графіті як основній складовій речовині анодних матеріалів. Тому питання ефективного видобутку, переробки та подальшого застосування графіту в значній мірі формують стратегічну політику багатьох розвинених країн на державному рівні.

Аналіз сучасного рівня науки і техніки показує, що серед відомих технологій фінішної стадії отримання батарейних марок графіту найбільш привабливим є спосіб обробки вуглецевої сировини у високотемпературних електротермічних печах киплячого шару (ЕТПКШ), який дозволяє у комплексі вирішувати технічні задачі термічного очищення матеріалу від сторонніх хімічних домішок та його графітації. У порівнянні до відомих поширених альтернативних процесів (в електротермічних печах щільного шару, методах хлоротермічної обробки та кислотного вилуговування) зазначений спосіб відрізняється високим ступенем технологічності завдяки реалізації поточного руху матеріалу, а також конкурентоспроможними показниками енергоспоживання, собівартості та відповідно низьким рівнем негативного впливу на навколишнє середовище.

Незважаючи на вагомий доробок черги науковців, Голдберга В., Грахама У., Бордулі В. А., Бондаренко Б. І., Махоріна К. Є. та багатьох інших, щодо особливостей та закономірностей фізичних процесів в електротермічному псевдозрідженому шарі, основними проблемами подальшого розвитку зазначеної технології є: необхідність систематизації відомих результатів досліджень та розвитку наукових основ щодо тепломасообмінних та електротермічних процесів у високопродуктивних агрегатах; відсутність науково обґрунтованих методів розрахунку подібних агрегатів та алгоритмів їх керування. Окрім цього не менш важливим залишається питання зменшення енерговитрат та створення на базі ЕТПКШ енергоефективних технологічних комплексів.

Отже, дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної науково-практичної проблеми розвитку наукових основ високотемпературного електротермічного псевдозрідженого шару, а також роботи агрегатів та комплексів з термічної переробки вуглецевої сировини на їх основі.

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

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка відповідає «Енергетичній стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» (Розпорядження Кабінету Міністрів України №605-р від 18.08.2017 р.) та «Державній цільовій економічній програмі енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2020 роки» (Постанова Кабінету Міністрів України №243 від 01.03.2010 р.).

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

- *держбюджетних науково-дослідних робіт*: «Дослідження високотемпературної обробки відходів промисловості та сільського господарства з метою енергозбереження

та поліпшення екологічного стану» № 0106U002205; «Дослідження процесів теплової переробки біомаси, вугілля, вапнякової сировини у щільному та зваженому шарі з метою поліпшення екологічного стану та економії викопного палива» №0109U004007; «Розробка інноваційних технологій використання палива в енерготехнологічних установках з метою зменшення витрат експортних енергоресурсів та поліпшення екологічного стану» № 0111U002923; «Вдосконалення технології утилізації в металургійній промисловості матеріальних і енергетичних відходів» № 0113U003266; «Наукове обґрунтування й розробка ефективних тепломасообмінних процесів у інноваційних металургійних технологіях» №0115U003176;

- 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).

В зазначених роботах автор є відповідальним виконавцем.

Мета і завдання досліджень.

Метою досліджень є 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%.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені наступні задачі:

- проведено аналіз вимог ринку вуглецевої продукції щодо якості графітованих матеріалів, процесів і агрегатів для їх виробництва та обрані пріоритетні напрямки дослідження;

- на основі термодинамічного аналізу хіміко-термічних процесів високотемпературної обробки вуглецевої сировини визначено вимоги до неї та основні технологічні параметри, які забезпечують вміст вуглецю у готовому продукті до 99,95%;

- вдосконалена фізична модель процесу електричної провідності киплячого шару вуглецевого матеріалу та визначено механізм впливу основних технологічних параметрів на неї;

- розроблено комплексну напівемпіричну модель електричної провідності шару дисперсних частинок електропровідного матеріалу на основі уточнених фізичних уявлень та даних експериментальних досліджень;

- на основі математичного моделювання визначено вплив пузирів на електричну провідність електротермічного киплячого шару та отримано регресійну залежність для провідності шару від об'ємної долі пузирів;

- на основі математичного моделювання визначено вплив коефіцієнту електропровідності каркасу щільного та киплячого шару вуглецевого матеріалу та визначено його залежність від режиму псевдозрідження;

- розроблено та адаптовано математичну модель випадкової упаковки полідисперсного шару в полі діючої масової сили в об'ємі, розмір якого на декілька порядків перевищує розмір часток;

- на основі комплексного аналізу результатів імітаційного моделювання полідисперсних систем визначені параметри та розмір елементарного об'єму ядра шару, характеристики якого відповідають властивостям шару;

- створено «холодні» моделі для досліджень електропровідності киплячого і щільного шару та експериментально досліджено вплив характеристик сировини й гідродинамічних режимів на електропровідність шару;

- на основі теоретичних та експериментальних досліджень отримана регресійна залежність ПЕО електротермічного киплячого шару частинок графіту як функції питомої теплової потужності одиниці об'єму, температури шару, розміру часток, долі пупирів і коефіцієнту каркасу шару;

- на основі математичного моделювання виконано комплексне дослідження розподілу джерел теплоти та температури у високотемпературній печі з електротермічним киплячим шаром в залежності від продуктивності агрегатів, електричної потужності, гідродинамічного режиму псевдозрідженого шару, геометрії робочого простору;

- на основі математичного моделювання процесів нагріву вуглецевої сировини у печах з електротермічним киплячим шаром розроблено критеріальні залежності та методику визначення основних розмірів робочого простору печей;

- створено пілотну піч електротермічного киплячого шару продуктивністю 10 кг/год, на якій експериментально підтверджено результати розробленої моделі електричної провідності шару;

- науково обґрунтовано методику вибору режимів роботи печей з електротермічним киплячим шаром на основі ВАХ та визначено область їх сталої роботи, а також вимоги до джерела живлення;

- розроблені теоретичні засади щодо підвищення теплової ефективності комплексу з високотемпературної термічної обробки вуглецевої сировини в електротермічному шарі шляхом управління режимами руху матеріалу та вдосконалення технічних рішень стосовно завантаження матеріалу, подачі псевдозріджуючого агента, а також використання фізичної теплоти готового продукту для підігріву вихідної сировини;

- розроблені нові ефективні конструкції високотемпературних ЕТПКШ та науково обґрунтовані раціональні режими їх експлуатації, які забезпечують необхідні робочі температури;

- розроблено та виготовлено основне й допоміжне обладнання технологічного комплексу з термічної обробки вуглецевої сировини для отримання графіту із вмістом вуглецю не менш 99,95% на основі печі з електротермічним киплячим шаром продуктивністю 1 т/год.

Об'єкт досліджень – процеси тепломасообміну і гідродинаміки в технологічних пристроях та апаратах із киплячим шаром, які пов'язані із високотемпературною електротермічною обробкою вуглецевих матеріалів.

Предмет досліджень – вплив фізичних властивостей дисперсних вуглецевих матеріалів, геометричних і режимних факторів на процеси тепломасообміну, гідродина-

міки та теплову потужність технологічних комплексів на базі високотемпературних електротермічних печей киплячого шару.

Методи досліджень. Поставлені задачі вирішені шляхом поєднання методів аналітичного та емпіричного аналізу.

Експериментальні дослідження електричної провідності дисперсних вуглецевих матеріалів у щільному та псевдозрідженому шарі проведені за допомогою розроблених експериментальних установок з використанням потенціометричного методу вимірювання електричних величин із подальшою перевіркою робочих гіпотез на створеній фізичній моделі електротермічної 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 псевдозрідженим та рухомим щільним шаром. Дослідження температурних умов високотемпературного очищення вуглецевих матеріалів виконано за допомогою програмного пакету термодинамічних розрахунків рівноважного стану та властивостей багатокомпонентних гетерогенних систем «Terra».

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.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. 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. Вплив газових пузирів на збільшення опору незначний. Ефект зниження електропровідності киплячого шару із збільшенням щільності струму та температури процесу обумовлений джоулевою теплою в контактах та дисипацією енергії у прилеглих зонах.

2. Вперше науково обґрунтована комплексна напівемпірична модель електропровідності шару дисперсних часток електропровідного матеріалу, що включає диференціальне 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.

Модель враховує геометрію робочого простору, тиск у шарі та гідродинамічний режим процесу.

3. Вперше на основі математичного моделювання визначено вплив газових пузирів на електропровідність електротермічного киплячого шару вуглецевого матеріалу. Встановлено, що зміна розміру та взаємного розташування пузирів відносного одне одного практично не впливає на електропровідність киплячого шару, а 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 $\Lambda = 0,99 - 1,34 \cdot \delta$, яка дозволяє визначати вплив пузирів з похибкою менш 1%.

4. Вперше 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.

5. 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 доля розімкнених контактів у 3D-структурі емульсійної фази, яка обумовлює збільшення електричного опору, зростає від 30% до 60-70% в діапазоні збільшення значень числа псевдозрідження 0,75-1,25.

6. На основі експериментальних досліджень вперше визначено взаємодію між гідродинамічним режимом псевдозрідження і ПЕО в діапазоні співвідношень висоти до еквівалентного діаметру шару 1-2,5. Показано, що основна перебудова шару, яка призводить до істотного збільшення електричного опору в результаті розриву контактів часток, відбувається в інтервалі чисел псевдозрідження $W = 0,75-1,25$. За висоти піделектродної ділянки, що перевищує діаметр робочого простору апарату, кратність підвищення ПЕО по відношенню до нерухомого шару складає 8,5-10.

7. Вперше 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.

8. Вперше за результатами параметричного дослідження впливу робочої температури, продуктивності, фракційного складу матеріалу, геометрії робочого простору, режиму псевдозрідження та теплового балансу на неоднорідність температурного поля високотемпературних електротермічних печей киплячого шару показано, що змен-

шення температури шару 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.

9. Вперше 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.

10. Вперше 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 псевдозрідженого 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.

Практичне значення одержаних результатів:

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, в яких: висота робочої зони складає 2-5 калібрів центрального електроду, а відстань від нижнього торця центрального електроду до газорозподільчої решітки – не менш одного калібру центрального електроду, що забезпечує ефективну роботу печі за рахунок виділення до 90% теплової потужності в області інтенсивного перемішування матеріалу (Патент №UA108964); центральний електрод додатково має коаксіальний вертикальний канал та сопла у нижній торцевій частині для підведення газу, що дозволяє спростити конструкцію газорозподільчого апарату (Патент №UA107972); агрегат додатково оснащений багатосекційним охолоджувачем готового продукту псевдозрідженого шару для утилізації до 50% теплоти готового продукту за технологічною схемою (Патент №UA100018).

3. Розроблений спосіб роботи ЕТПКШ 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. Кожен операційний цикл складається з трьох послідовних етапів: стадії завантаження сировини; стадії витримки; стадії вивантаження готового продукту (Патент №UA107971). Показано, що шляхом дотримання тривалості операційного циклу на рівні 5-10% від середнього періоду обробки матеріалу за відносної тривалості періоду витримки на рівні 50% забезпечується повне нагрівання сировини до робочої температури печі в умовах контрольованої амплітуди температури шару в межах 2-5%.

4. З метою перевірки адекватності математичної моделі питомого електричного

опору киплячого шару та вивчення особливостей електротермічного нагрівання вуглецевих матеріалів різного походження розроблена пілотна установка 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 теплової 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. Термін окупності реалізації проекту складає менш двох років.

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 курсі лекцій дисциплін «Високотемпературні процеси», «Високотемпературні установки», «Тепломасообмін» та «Спеціальні питання тепломасообміну у високотемпературних теплотехнологічних установках», а також для виконання дипломних та науково-дослідних робіт.

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертації отримані автором особисто або за його безпосередньої участі. Автором самостійно: 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 загальну концепцію та досліджено теплову ефективність застосування секційних утилізаторів теплоти готового продукту за технологічною схемою; отримано результати математичного моделювання та аналізу провідності шару [2, 7-8].

В роботах, виконаних у співавторстві з іншими дослідниками, автору належить провідна роль у постановці задач досліджень, проведенні комплексу експериментальних та теоретичних досліджень, аналізі та узагальненні отриманих результатів. Особистий

вклад автора полягає у наступному: загальний аналіз енергетичних та технологічних показників роботи високотемпературних пічних агрегатів з щільним та псевдозрідженим шаром [18, 32, 33]; постановка проблеми та узагальнення результатів щодо впливу складу вуглецевої сировини та пічної атмосфери на якісні показники готового продукту за термічної обробки у високотемпературних агрегатах [1, 28]; розробка експериментальних установок, методів проведення експериментів, безпосередня участь у дослідженнях та узагальнення наукових результатів щодо питомого електричного та гідравлічного опору шару, а також особливостей руху матеріалу в секційних апаратах псевдозрідженого шару [3, 10, 23]; розробка математичних моделей, проведення розрахунково-теоретичних досліджень та узагальнення результатів структурних властивостей дисперсних упаковок, електричної провідності шару та тепломасообміну у шарових апаратах [4, 9, 12, 14, 16-17, 20, 22-23, 29]; постановка задачі, теоретичні дослідження та узагальнення результатів щодо взаємозв'язку геометричних та режимних параметрів високотемпературних електротермічних печей псевдозрідженого шару, а також розробка методики вибору розмірів їх робочого простору [6]; дослідження впливу дифузії газу на роботу шарових високотемпературних агрегатів [11, 13]; розробка концепції високотемпературної технології обробки вуглецевої сировини для отримання батарейних марок графіту [15]; розробка ефективних конструкцій та способів експлуатації високотемпературних електротермічних печей [19, 24-27]; загальна постановка проблеми негативного впливу явища зношення сталі на якість очищеного графіту в охолоджувачі готового продукту [5]; постановка загальної проблеми утилізації теплоти вихідних газів високотемпературних електротермічних печей псевдозрідженого шару та визначення шляхів її вирішення [21].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 11-ти міжнародних наукових конференціях та семінарах: XVIII міжнародна конференція «Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії – 2017» (НМетАУ, Дніпро, Україна, 10-13 жовтня 2017); науковий семінар «Ultrahigh-Temperature Purification of Carbonaceous Materials Based on Electrothermal Fluidized Bed Concept» (Dalian University of Technology – Department of Material Science, Dalian, China, April 6th, 2016); XVII International Scientific Conference «New Technologies and Achievements in Metallurgy and Material Engineering and Production Engineering» (Politechnika Częstochowska, Częstochowa, Poland, May 19-20, 2016); IV научно-практическая конференция «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (УрФУ, Екатеринбург, Россия, 26-27 марта 2015); XVII Міжнародна конференція «Теплотехніка та енергетика в металургії» (НМетАУ, Дніпропетровськ, Україна, 7-9 жовтня, 2014); ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2014 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels (Chicago, Illinois, USA, August 3-7, 2014); ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting (Incline Village, Nevada, USA, July 7-11, 2013); Международная научно-практическая конференции «Творческое наследие В.Е. Грум-

Гржимайло» (УрФУ, Екатеринбург, Россия, 27-29 марта 2014); II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (УрФУ, Екатеринбург, Россия, 28-29 марта 2013); Международная научно-практическая конференция «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (УрФУ, Екатеринбург, Россия, 19-21 сентября 2012); Международная научно-практическая конференция «Творческое наследие Б.И. Китаева» (УГТУ-УПИ, Екатеринбург, Россия, 12-13 февраля 2009).

Публікації. Основні матеріали дисертації представлені у 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. Всі публікації містять результати безпосередньої роботи автора на окремих етапах досліджень та відображають основні положення та висновки дисертаційної роботи.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти основних розділів, загальних висновків, налічує 302 сторінки загального машинописного тексту та містить 33 таблиці, 102 рисунки, бібліографічний список з 238 джерел і 4 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику роботи: обґрунтовано актуальність теми; сформульовані мета та основні задачі; визначено об'єкт, предмет і методи досліджень; висвітлено наукову новизну, практичну цінність, результати апробації та структуру дисертації.

В першому розділі виконаний аналіз ринку вуглецевих матеріалів, властивостей вуглецевої сировини та батарейного графіту, а також технологій рафінування графіту.

Обґрунтована доцільність обробки вуглецевої сировини у високотемпературних ЕТПКШ, що дозволяє вирішувати у комплексі задачі термічного очищення та графітації. У порівнянні до альтернативних процесів (в печах щільного шару, методах хлорнотермічної обробки та кислотного вилуговування) зазначений спосіб відрізняється високим ступенем технологічності завдяки реалізації поточного руху матеріалу, а також конкурентоспроможними показниками: енергоспоживання на рівні 2,0-3,0 кВт·год/кг та відповідно собівартості продукції й рівня негативного впливу на навколишнє середовище.

ЕКТКШ (рис .1) являє собою вертикально орієнтовану шахту обмежену корпусом 1, тепловою ізоляцією 2 та футеровкою 3, уздовж осі якої розташований центральний електрод. Завантаження та вивантаження матеріалу відбувається відповідно по каналах 5, 6. Система подачі газу включає канал підведення азоту 7 і розподільчу решітку 8. Відведення газів відбувається за допомогою каналу 9. Робочий простір поділяється на зони: активну зону термічної обробки 10, ділянку під електродом 11 та надшаровий простір 12.

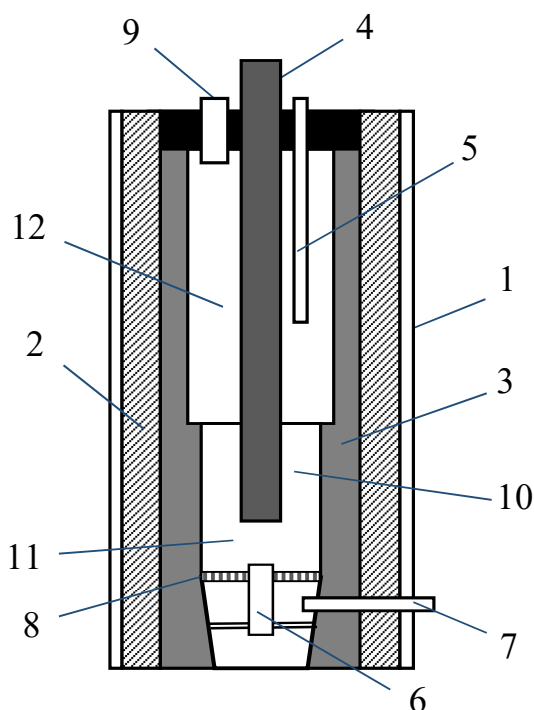


Рисунок 1. Принципова схема високотемпературної ЕТПКШ
 1 - корпус; 2 - тепла ізоляція; 3 - футеровка; 4 - центральний електрод; 5 - канал завантаження сировини; 6 - випускна труба готового продукту; 7 - канал підведення агента псевдозрідження; 8 - газорозподільча решітка; 9 - канал відведення газів; 10 - активна зона термічної обробки; 11 - ділянка під електродом; 12 - надшаровий простір

Дослідження рівноважного хімічного складу вуглецевих матеріалів в умовах ЕТПКШ показало можливість використання в Україні в якості вихідної сировини природних графітів Заваллівського родовища, антрацитів та «зелених» нафтових коксів. Технологія ЕТПКШ потребує сушіння сировини та, у випадку вугілля і продуктів нафтопереробки, попередньої кальцинації. Температурний режим печей (до 3000°C) визначається умовами повного видалення сторонніх хімічних елементів та часом графітації.

З урахуванням наявного світового доробку про явище електричної провідності киплячого шару та конструкцій ЕТПКШ сформульовано задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі досліджено явище електричної провідності киплячого шару на основі двофазної моделі псевдозрідження, згідно якої шар утворюють газові пузири та щільна (емульсійна) фаза дисперсного матеріалу. Теоретичні дослідження виконані за допомогою диференціального рівняння миттєвого електричного поля у неоднорідному середовищі; наближеного рішення кінетичного рівняння Больцмана та моделі хімічного рівноважного стану високотемпературних багатокомпонентних систем для газу; імітаційної моделі упаковки та каркасної моделі провідності шару. Експериментальні – на основі розроблених експериментальних установок.

Імітаційна модель емульсійної фази киплячого шару враховувала гранулометричний склад графітових частинок описаного рівнянням Розіна-Раммлера для співвідношення фракцій 2,5:1. Алгоритм формування шару полідисперсного матеріалу в полі об'ємної сили передбачав поступове заповнення умовного об'єму $1 \times 1 \times 1$ кулями з відносним медіанним діаметром 0,025 (рис. 2). Для отриманих упаковок досліджені геометричні властивості шару, зокрема порозність та координаційне число, а також, утворений точковими контактами, струмопровідний каркас.

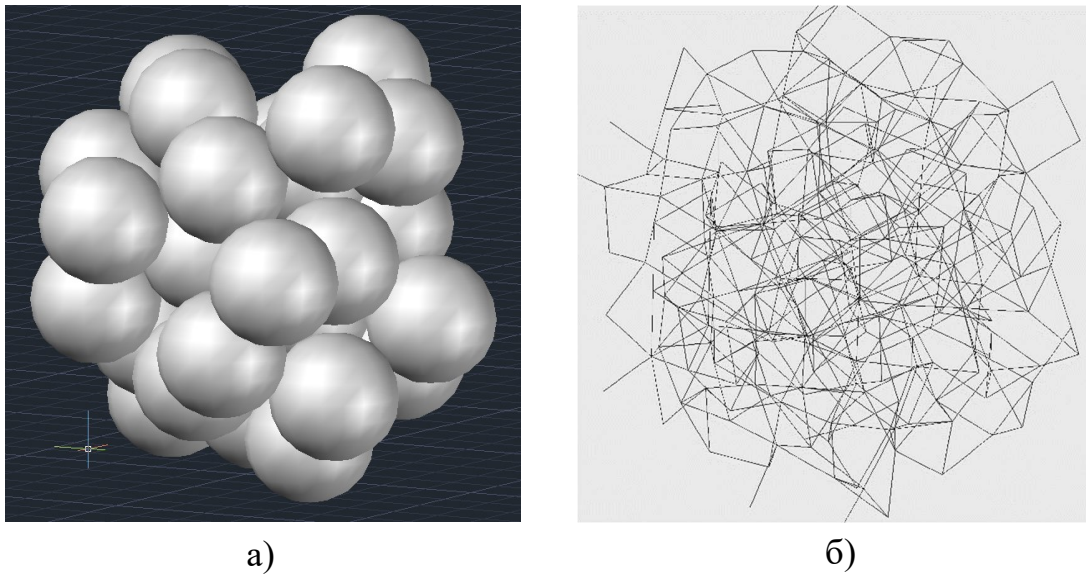


Рисунок 2. Візуалізація неупорядкованого шару куль у полі спрямованої масової сили: а) фрагмент ядра шару; б) каркас ядра шару $6 \times 6 \times 6d$

Експериментальна установка для дослідження ПЕО щільного шару була створена відповідно до ДСТУ 4668: 2011. Джерелом живлення постійного струму слугував лабораторний стабілізатор ТЕС-13. Падіння напруги між зондами визначалося за допомогою мультиметру DT9205A.

Експериментальна установка для визначення електричного опору шару при псевдозрідженні являла скляну циліндричну колонку внутрішнім діаметром $\varnothing 120$ мм з вставкою у вигляді графітової циліндричної обичайки $\varnothing 119/80$ мм (аналогу бічної футеровки печі) і центральним графітовим електродом $\varnothing 30/40$ мм. Висота графітової обичайки (шару) становила 200 мм, глибина занурення електроду в шар – 100 мм. Ділянка вимірювання електричних параметрів включала гальванічне джерело живлення 4,2-4,7 В, баластний опір 1320 Ом, амперметр, цифровий осцилограф DSO-1000 і мультиметр DT-838.

За результатами комплексних досліджень встановлено наступне.

Унаслідок незначної іонізації агенту псевдозрідження (азоту) провідність останнього у фазі газових пазирів по відношенню до емульсійної фази може вважатися нескінченно малою величиною, що дозволило у підсумку розглядати пазури в ЕТПКШ за температур до 3000°C як непровідні включення. Характер впливу об'ємної долі пазирів на загальне зниження електричної провідності шару близький до лінійного. Зокрема, збільшення об'ємної частки пазирів до 0,3 супроводжується зниженням провідності на 41%.

Для однорідної системи, за умов об'ємної долі пазирів $\delta = 0,02-0,05$, що відповідає реальній структурі пазиркового киплячого шару, та малих чисел псевдозрідження $W = 1-2$, відносна провідність шару Λ складає 0,96-0,92. Зміна взаємної орієнтації газових пазирів, а також варіація форми та розміру неоднорідних включень не змінює загальної картини. Для визначення впливу газової фази отримана регресійна залежність відносної провідності шару як функція об'ємної частки пазирів в діапазоні $\delta = 0-0,3$ з коефіцієнтом кореляції $R^2 = 0,99$: $\Lambda = 0,99 - 1,34 \cdot \delta$.

На основі аналізу відомих моделей електричного опору щільного й киплячого шару та їх співставлення з експериментальними даними для електродного графіту та природного графіту марки ГТ-1 рекомендована напівемпірична модель В. А. Кравченка та А. А. Серебреннікова, в якій опір шару представлений як ступенева функція діаметру частинок та тиску (табл. 1). Отримані експериментально показники ступеню при тиску і розміру часток становлять відповідно 0,08 і 0,46-0,65. Зазначені особливості разом із доробком інших дослідників були використані у подальшому в моделі електричної провідності шару.

Таблиця 1

Результати обробки експериментальних даних щодо електричного опору нерухомого шару часток графіту

Матеріал	Тиск в шарі, кПа	Вид залежності $\Omega_{ш}, \text{ Ом} \cdot \text{см}$
Електродний графіт $d_q = 0,05-2 \text{ мм}$	0	$\Omega_{ш} = 39,8 \cdot d^{-0,54}$ $R^2 = 0,88$
Електродний графіт $d_q = 0,05-2 \text{ мм}$	11-50	$\Omega_{ш} = 0,848 \cdot P^{-0,08} \cdot d^{-0,46}$ $R^2 = 0,87$
Тигельний графіт ГТ-1 $d_q = 0,15-0,75 \text{ мм}$	0	$\Omega_{ш} = 31,3 \cdot d^{-0,65}$ $R^2 = 0,85$

З аналізу регулярних і нерегулярних упаковок та відповідно з урахуванням їх інтегральних стереометричних співвідношень, а також закону Ома для паралельних і послідовних ділянок ланцюга показано, що для полідисперсних матеріалів може бути використана залежність ПЕО шару на основі каркасної моделі (1):

$$\Omega_{ш} = K \cdot R_k \cdot d. \quad (1)$$

За своєю сутністю K є коефіцієнтом каркасу шару, який показує наскільки провідність шару у визначеному напрямку відрізняється від класичної кубічної упаковки. Водночас значення геометричного коефіцієнту K визначається просторовою орієнтацією частинок відносно обраного напрямку струму. Залежність коефіцієнту каркасу щільного шару приймає значення 0,91-0,98 для полідисперсних і 0,94 відповідно для монодисперсних упаковок:

З урахуванням температурної залежності ПЕО матеріалу, величина середнього опору контакту між двома частинками щільного шару обчислюється за формулою:

$$R_k = \Omega_m(t) \cdot \frac{C}{K \cdot d_c^{\alpha+1} \cdot p^\beta}. \quad (2)$$

Разом із цим встановлено, що елементарному об'єму, якому притаманні властивості шару, задовольняє тривимірний фрагмент шару розміром $\times 12-15d$.

Відповідно до результатів експериментів, електричний опір шару струмопровідних частинок є опосередкованою характеристикою гідродинамічного режиму (рис. 3). Помітна перебудова структури шару з щільного у стан киплячого відбувається в певному інтервалі чисел псевдозрідження $W = 0,75-1,25$. Водночас в графічній залежності $R_{ш}(W)$ можна виділити три характерні області: 1) $W \leq 0,75$ – нерухомий шар, в якому зростання опору обумовлене зменшенням тиску точкових контактів частинок і розривом деяких з них; 2) $W = 1,25-2$ – розвинений пухирковий режим псевдозрідження, в якому провідність шару є результатом діючої кількості локальних контактів, що утворюють струмопровідний каркас в емульсійній фазі; 3) перехідний режим $W = 0,75-1,25$, що поєднує в собі фізичні особливості двох попередніх режимів – зменшення контактного тиску частинок і кількості наявних контактів.

Залежність коефіцієнту каркасу від доли розімкнених контактів узгоджується з динамікою опору шару при псевдозрідженні (рис. 3). За $W = 0,75$ ПЕО шару зростає приблизно в два рази, а кількість розімкнених контактів складає близько 30%. Подальший розрив контактів відбувається одночасно зі збільшенням витрати газу, але в той же час супроводжується більш інтенсивним зростанням опору. За $W = 1,25$ частка розімкнених контактів досягає 60-70%. Отже, з урахуванням відомого впливу газових пухирів для малих чисел псевдозрідження (в межах 2-8%) та експериментальних даних щодо збільшення ПЕО шару при переході у киплячий стан в 6-15 разів, частка розімкнутих контактів емульсійної фази становить близько 0,5-0,6.

Стосовно явища впливу на ПЕО киплячого шару щільності струму та температури за допомогою каркасної моделі показано, що провідність емульсійної фази киплячого шару визначається з одного боку потужністю тепловиділення в одиничному контакті Q_k ,

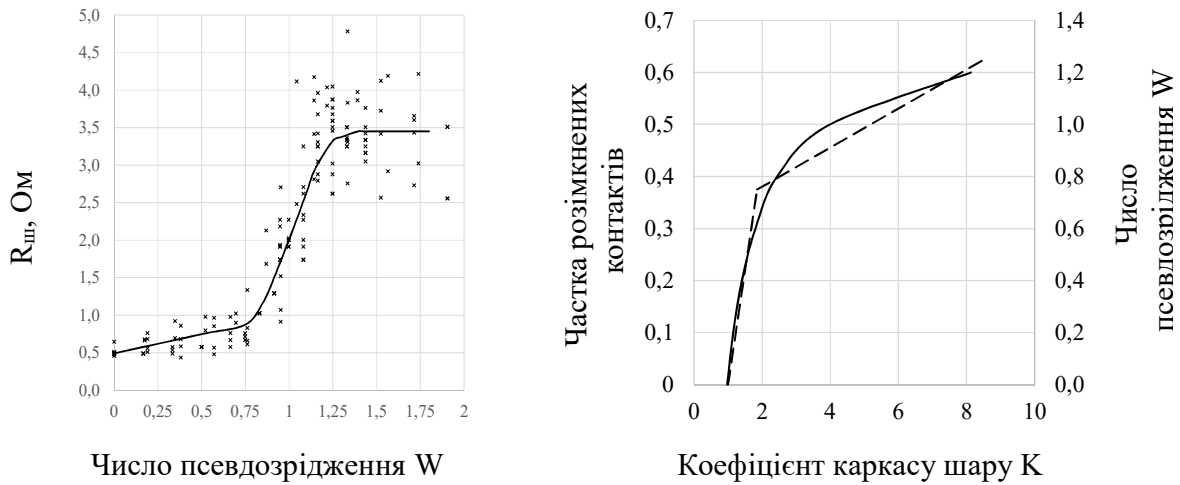


Рисунок 3. Результати фізичного та імітаційного моделювання електричної провідності киплячого шару: а) залежність опору киплячого шару від числа псевдозрідження в експерименті; б) зв'язок коефіцієнту каркасу шару з числом псевдозрідження та часткою розімкнених контактів

x ----- експеримент ————— математична модель

як міри інтенсивності нагріву, а з іншого – температурою шару $T_{ш}$, як міри теплової релаксації (охолодження) контакту. Водночас кількість джоулевої теплоти в точці фізичного дотику двох частинок визначається залежністю:

$$Q_k = \frac{q_y}{(1 - \delta)} \cdot \left(\frac{K \cdot d_q}{L} \right)^3, \quad (3)$$

де $q_y = i_A^2 \cdot \Omega_{ш}$; $(1 - \delta)$ – поправка, що враховує непровідні властивості газових пузирів; $(K \cdot d_q / L)^3$ – ефективна кількість точкових контактів в одиничному об'ємі рівному 1 см^3 .

З використанням експериментальних даних ПЕО високотемпературного електро-термічного шару графіту В. А. Бородулі (Інституту тепло-масообміну ім. А.В. Ликова, ІТМО) була уточнена математична модель провідності з урахуванням температури шару та питомої теплової потужності одиниці об'єму. Отримані розрахункові результати моделі дали хороші результати (рис. 4-5). Похибка розрахункових і експериментальних значень знаходиться у межах 30%.

В третьому розділі наведені результати параметричного дослідження печей ЕТКШ. Вивчено розподіл теплової потужності в об'ємі, умови рівномірного ходу печі і вплив параметрів агрегату на витратні статті теплового балансу. За результатами досліджень створено експериментальну ЕТПКШ продуктивністю 10 кг/год, розроблені і досліджені режими печі для різних умов експлуатації в залежності від температури і продуктивності, а також проведені її тестові випробування.

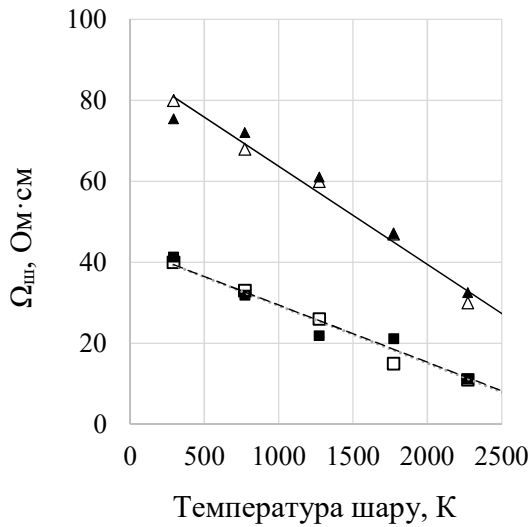


Рисунок 4. Залежність ПЕО киплячого шару графіту від температури ($d_{\text{ч}} = 0,127$ мм)

- - експеримент ІТМО
- - модель (2.33-2.34)
- - $i_A = 0,004$ А / см²
- - - - - $i_A = 1,0$ А / см²

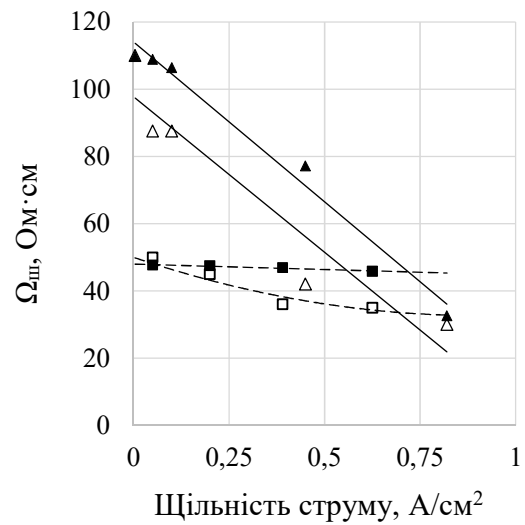


Рисунок 5. Залежність ПЕО киплячого шару графіту від щільності струму ($d_{\text{ч}} = 0,127$ мм)

- △ □ - експеримент ІТМО
- ▲ ■ - математична модель
- - $H_a / (D_a - D_e) = 0,07$ м
- - - - - $H_a / (D_a - D_e) = 0,14$ м

Методика розрахунку розподілу потужності в об'ємі печі включала: рішення задачі розподілу електричних потенціалів, знаходження струмів між елементарними об'ємами та відносної потужності. Основним фактором, що визначає розподіл тепловиділень між характерними зонами печі (рис. 6-7), є співвідношення висоти активної зони до діаметру електроду H_a / D_e . За значень $H_a / D_e \geq 2$ внесок піделектродної ділянки в загальну потужність печі не перевищує 15%. Для печей з розвиненою висотою $H_a / D_e \rightarrow 5$ частка джоулевої теплоти під електродом становить 3,3-8,8%. Такий взаємозв'язок обумовлений розвиненою бічною поверхнею центрального електроду та футеровки, що призводить до зниження електричного опору активної зони. Аналогічним чином впливає відносний внутрішній діаметр печі D_a / D_e , збільшення якого в діапазоні 1,4-2,3 супроводжується зростанням радіального опору міжелектродного проміжку, відповідно більшою величиною струму і потужністю під електродом. Однак у порівнянні з висотою активної зони цей фактор проявляє себе в меншій мірі.

Для стабілізації роботи ЕТПКШ на основі обмеження потужності піделектродної ділянки рекомендовано мати розвинені значення висоти даної зони $H_{\text{пе}}$ та активної зони H_a за якомога меншого співвідношення діаметрів активної зони і електроду D_a / D_e . Водночас для вибору висоти піделектродної ділянки необхідно орієнтуватися на виконання умов співвідношення його висоти до діаметру електроду $H_{\text{пе}} / D_e > 1$.

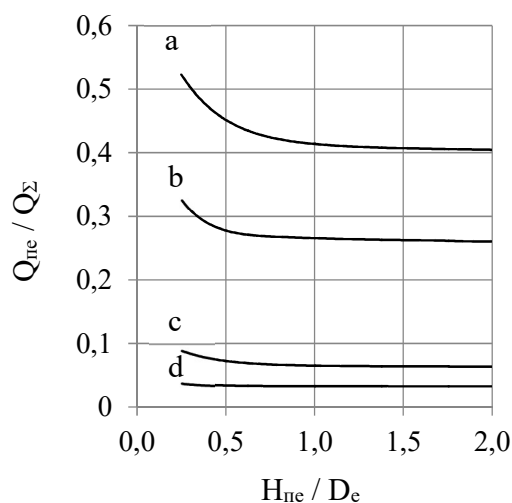


Рисунок 6. Вплив безрозмірної висоти піделектродної ділянки на його відносну теплову потужність ($D_{\text{те}} / D_e > 1,0$): а) $H_a / D_e = 0,5$; $D_a / D_e = 2,3$; б) $H_a / D_e = 0,5$; $D_a / D_e = 1,4$; в) $H_a / D_e = 5,0$; $D_a / D_e = 2,3$; г) $H_a / D_e = 5,0$; $D_a / D_e = 1,4$.

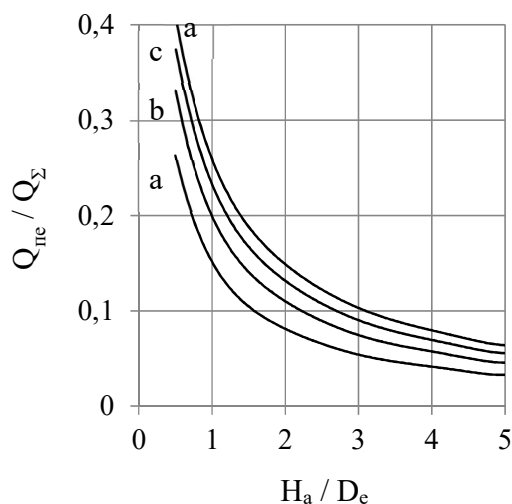


Рисунок 7. Вплив безрозмірної висоти активної зони на відносну потужність ділянки під електродом ($D_{\text{те}} / D_e > 1,0$; $D_a / D_e =$: а - 1,4; б - 1,7; в - 2,0; г - 2,3

Дослідження неоднорідності температурного поля виконані за допомогою одновимірної дифузійної математичної моделі теплообміну в активній зоні нагріву ЕТПКШ. Передбачалося, що визначальним фактором вирівнювання температурного поля у радіальному напрямку є конвективний потік матеріалу. В якості керуючих факторів в параметричному дослідженні розглянуті робоча температура $t_{\text{роб}}$, продуктивність G , середня тривалість термообробки τ^* (час перебування матеріалу в активній зоні), діаметр частинок $d_{\text{ч}}$, висота активної зони нагріву H_a , співвідношення радіусів активної зони і електроду D_a / D_e , число псевдозрідження W , а також втрати теплоти через стінки робочого простору $Q_{\text{втр}}$ в процентному відношенні до потужності ЕТПКШ (табл. 2).

Критерієм неоднорідності температурного поля за радіусом печі виступала різниця температур на поверхнях центрального електроду і футеровки Δt , а також її відношення до середньої температури матеріалу в зоні термообробки $\Delta t / t_{\text{роб}}$. З усього масиву отриманих даних тільки малій частині поєднань керуючих параметрів відповідає неоднорідність температурного поля на рівні $\sim 20\%$, що перевищує 50°C . Це наочно видно з результатів розрахунку для певного базового поєднання параметрів: $t_{\text{роб}} = 2500^\circ\text{C}$; $G = 1000 \text{ кг / год}$; $\tau^* = 20 \text{ хв}$; $d_{\text{ч}} = 1 \text{ мм}$; $H_a = 1 \text{ м}$; $D_a / D_e = 2$; $W = 3$; $Q_{\text{втр}} = 5\%$ (рис. 8). Варіація кожного з цих параметрів окремо в заданому інтервалі не призводить до істотної зміни неоднорідності температур за радіусом, максимальне значення якого водночас не перевищує 20°C .

Діапазон дослідження впливу умов перемішування матеріалу
на неоднорідність температурного поля в ЕТПКШ

Параметр	Значення
Робоча температура $t_{роб}$, °С	2000-3000
Продуктивність G , кг / год	500-2000
Середня тривалість термообробки τ^* , хв	5-60
Діаметр частинок $d_{ч}$ мм	0,1-2
Висота активної зони h_a , м	0,4-2,0
Співвідношення діаметрів активної зони та електроду D_a / D_e	1,2-4,4
Число псевдозрідження W	1,5-5,5
Питомі втрати теплоти в робочому просторі $q_{втр}$, %	0-20%

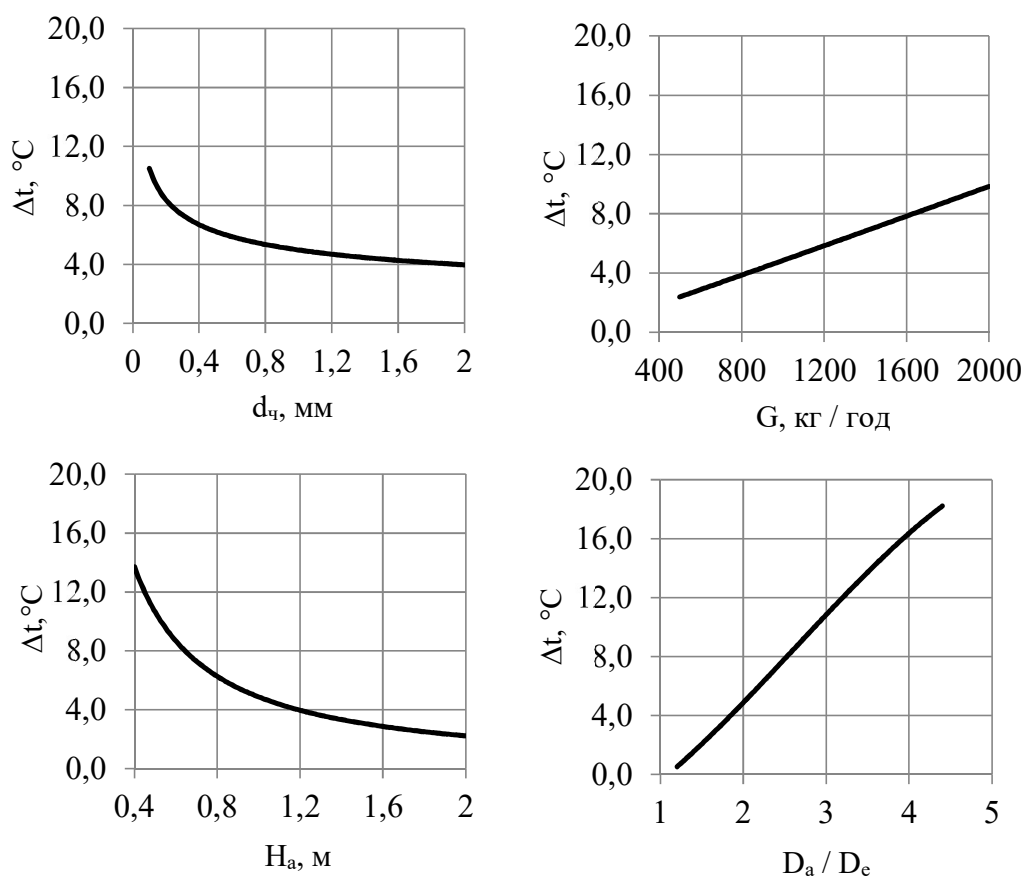


Рисунок 9. Окремі результати параметричного дослідження неоднорідності температурного поля в ЕТПКШ відносно базової точки: $t_{роб} = 2500^\circ\text{C}$; $G = 1000$ кг / год; $\tau^* = 20$ хв; $d_{ч} = 1$ мм; $h_a = 1$ м; $D_a / D_e = 2$; $W = 3$; $q_{втр} = 5\%$

На основі регресійного аналізу результатів чисельного експерименту була отримана залежність (4), що дозволяє виконувати оцінку неоднорідності температурного поля в радіальному напрямку. Коефіцієнт кореляції отриманого виразу склав 0,98:

$$\frac{\Delta t}{t_{\text{роб}}} = 0,023 \cdot \frac{(D_a/D_e)^{0,72}}{Fo^{*0,98} \cdot (1 - q_{\text{втр}})^{1,11}} \quad (4)$$

Стосовно обґрунтування вибору внутрішніх розмірів ЕТПКШ, необхідні електро-термічний, тепловий та гідродинамічний режими роботи ЕТПКШ забезпечуються певним поєднанням розмірів робочого простору печі. У свою чергу, висота H_a і діаметр D_a активної зони повинні відповідати умовам тривалості обробки матеріалу (5) і теплової потужності печі (6):

$$V = \frac{E}{\rho_M \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (1 - \delta)} = \frac{\pi \cdot (D_a^2 - D_e^2)}{4} \cdot H_a, \text{ м}^3; \quad (5)$$

$$N = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{\Omega}{2 \cdot \pi \cdot H_a} \cdot \ln \frac{D_a}{D_e}, \text{ Вт.} \quad (6)$$

На їх основі була досліджена залежність конструкції активної зони в діапазоні параметрів характерних для реальних ЕТПКШ: $U = 20\text{-}220$ В, $\Omega_{\text{кш}} = 0,01\text{-}0,17$ Ом·м, $i_{\text{доп}} = 5\text{-}25$ А / см², $E = 5\text{-}500$ кг і безрозмірного відношення діаметру електроду до об'єму зони $D_e / V^{1/3} = 0,4\text{-}0,9$. Перераховані параметри опосередковано визначають продуктивність G , тривалість обробки τ^* , робочу температуру $t_{\text{роб}}$ і потужність печі N . Отримані результати, узагальнені у вигляді рівняння співвідношення висоти до еквівалентного діаметру киплячого шару $H_a / D_{\text{екв}}$, описані регресійною моделлю (7) з коефіцієнтом кореляції і $R^2 > 0,99$:

$$\frac{H_a}{D_{\text{екв}}} = 0,088 \cdot \left[\frac{N \cdot \Omega}{U^2 \cdot V^{1/3}} \cdot \left(\frac{D_e}{V^{1/3}} \right)^{-0,65} \right]^{1,14} \quad (7)$$

Область можливих варіантів виконання ЕТПКШ обмежена характеристикою джерела електроенергії і графітових електродів. Аналіз теплового балансу показав, що вплив розмірів і режиму експлуатації печі на структуру втрат теплоти носить складний і неоднозначний характер. У зв'язку з цим були визначені критерії, що забезпечують енергетичну ефективність подібних агрегатів, а критерій найменших витрат теплоти від

зовнішнього охолодження по відношенню до певних розмірів активної зони був записаний в безрозмірному вигляді:

$$f = \frac{F_{ст} + F_{ел} \cdot \frac{\lambda_{ел}}{\lambda_{е.ст}}}{V^{2/3}} \rightarrow \min. \quad (8)$$

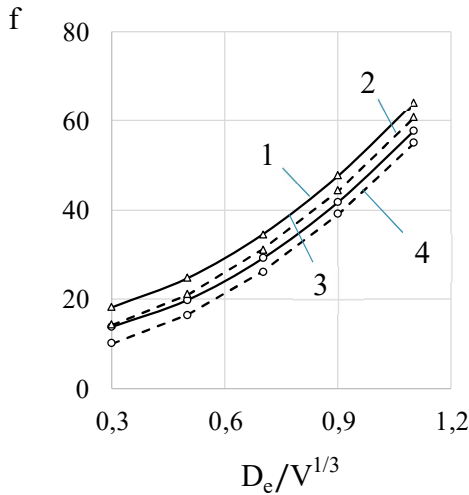


Рисунок 10. Залежність питомої поверхні робочого простору від параметрів ЕТПКШ: 1 - $d_ч = 0,1$ мм; $N \cdot \Omega / (U^2 \cdot V^{1/3}) = 5$; 2 - $d_ч = 0,1$ мм; $N \cdot \Omega / (U^2 \cdot V^{1/3}) = 35$; 3 - $d_ч = 2$ мм; $N \cdot \Omega / (U^2 \cdot V^{1/3}) = 5$; 4 - $d_ч = 0,1$ мм; $N \cdot \Omega / (U^2 \cdot V^{1/3}) = 35$

У підсумку, на основі результатів досліджень розроблено алгоритм конструкторського розрахунку високотемпературної ЕТПКШ. Методика включає визначення ПЕО шару, теплового балансу печі і розмірів робочого простору: діаметру центрального електроду, діаметру печі, висоти активної зони термообробки, ділянки під електродом і надшарового простору.

Запропонована методика була використана для розробки ЕТПКС продуктивністю 10 кг / год. Основні цілі та задачі розробки полягали в перевірці теоретичних і експериментальних результатів досліджень взаємозв'язку геометричних і режимних параметрів, апробація технології електротермічного нагрівання вуглецевих матеріалів, а також методичних рекомендацій щодо визначення ПЕО шару і розрахунку ЕТПКШ. Відповідно були визначені наступні конструктивні розміри печі: внутрішній діаметр робочого простору – 105 мм; діаметр електроду – 60 мм; висота активної зони – 350 мм; висота ділянки під електродом – 200 мм; висота надшарової зони – 500 мм; діаметр активної зони нагріву – 105 мм; зовнішній діаметр графітової футеровки – 305 мм; зовнішній діаметр теплової ізоляції – 705 мм (рис. 11).

Вираз (8) є аналогом коефіцієнту форми тіла, де чисельник можна інтерпретувати як приведену внутрішню поверхню футеровки активної зони і надшарового простору. Результати його мінімізації представлені на рис. 10. У дослідженій області основний вплив на теплові втрати в робочому просторі ЕТПКШ спричиняє саме електрод. Діаметр останнього має бути якомога меншим, водночас додатковим ресурсом управління є збільшення напруги джерела живлення. Остаточний вибір електроду повинен здійснюватися в контексті забезпечення рівномірності ходу печі.

Відносно витрат з відхідними газами показано, що їх найменше значення відповідає дрібним фракціям сировини.



Рисунок 11. Зовнішній вигляд пілотної установки

До складу комплексу входили: піч, бункер вихідної сировини в комплекті зі шнековим живильником; охолоджувач готового продукту поверхневого типу; шнековий живильник готового продукту; система подачі азоту на псевдозрідження і аеродинамічного затвору бункеру готового продукту; система водяного охолодження центрального електрода і холодильника; система допалювання відхідних газів.

За результатами технічних випробувань печі в режимі динамічного нагріву фактичні параметри процесу були близькі за своїми значеннями до розрахункових. Відповідно до умов експерименту розрахункова температура в робочому просторі печі через 5 годин розігріву складала 700°C , що відповідає результатам контрольного вимірювання температури.

Додатково було визначено час розігріву печі в залежності від електричної потужності: за потужності 10-11 кВт час вихід печі на температуру 2000°C становив близько 18 год, за 15 кВт – відповідно 11 год.

Було розроблено методику вибору режимів роботи печей з електротермічним киплячим шаром на основі ВАХ та визначено область їх сталої роботи, а також вимоги до джерела живлення. Методика пройшла апробацію у виборі режимів роботи печі 10 кг/год. ВАХ-ки ЕТПКШ включають в себе 4-ри типи кривих (рис 12):

1) ВАХ-ки електротермічного киплячого шару для заданих значень температури в діапазоні від 0 до 2700°C (чорним кольором), які отримано на основі математичної моделі ПЕО;

2) ВАХ-ки електротермічного киплячого шару для заданої продуктивності печі $G = 0-10$ кг / г (червоним кольором), які отримано на основі рівняння теплового балансу печі;

3) Криві щільності струму на поверхні центрального електрода, на поверхні футеровки і середньої за радіусом печі $i(I)$ зі шкалою значень на допоміжній осі (синім кольором). Даний тип кривих дозволяє визначити умови роботи струпровідних елементів печі;

4) Криві постійної потужності $N = \text{const}$ в діапазоні 5-40 кВт (зеленим кольором).

На основі аналізу ВАХ визначено межа стійкості в роботі печі (рис. 13), яка проходить через екстремуми ізотерм та розділяє діаграму на робочу і аварійну області.

Як впливає з діаграми для частинок заданого розміру, кожній продуктивності відповідає своя гранична температура, яка може бути досягнута в процесі експлуатації. Ця температура знаходиться в точках дотику ліній $U(I, G = \text{const})$ до кривих $U(I, t = \text{const})$.

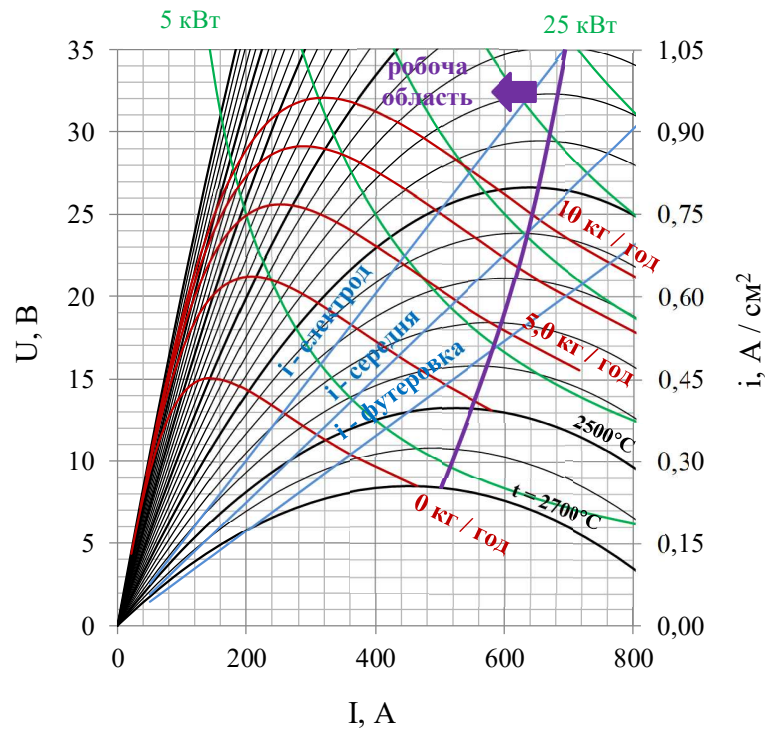


Рисунок 12. Вольт-амперна характеристика електротермічної печі киплячого шару 10 кг / год

В четвертому розділі розроблені заходи щодо підвищення ефективності роботи ЕТПКС на основі управління режимами завантаження / розвантаження матеріалу, технологічного використання теплоти готового продукту, а також вдосконалення схеми підведення псевдозріджуючого агенту в шар.

Запропонована схема управління рухом матеріалу передбачає поділ середнього часу тривалості термообробки τ_0 на окремі операційні цикли в кількості n_τ . Кожен з таких циклів включає реалізацію трьох послідовних етапів: 1) стадію завантаження сировини τ_1 ; 2) стадію витримки τ_2 ; 3) стадію вивантаження готового продукту τ_3 . Водночас середній час термообробки τ_0 залишається без змін, а динаміка порційного виходу матеріалу в періоди вивантаження τ_3 відповідає ідеальній моделі перемішування в однокамерних апаратах.

З аналізу рівнянь теплового балансу зазначених стадій отриманий вираз для максимальної амплітуди коливання ентальпії матеріалу в киплячому шарі як функції відносної тривалості стадій завантаження / розвантаження k і кількості операційних циклів n_τ за період середнього часу термообробки τ_0 . За кількості операційних циклів $n_\tau > 20$ в інтервалі $k = 0,1-0,5$ амплітуда коливання ентальпії матеріалу у печі не перевищує 5% (рис. 13). Водночас зазначений порядок роботи печі забезпечує до 80% гарантованого часу перебування у робочому просторі.

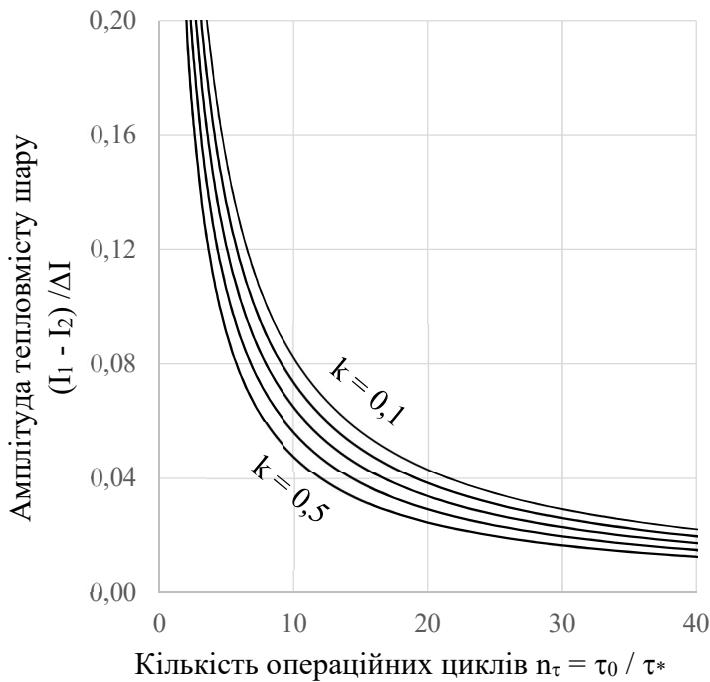


Рисунок 13. Залежність відносної амплітуди коливання тепловмісту шару від кількості операційних циклів за відносного часу завантаження / розвантаження матеріалу: $k = 0,1 \dots 0,5$; $\Delta k = 0,1$.

на основі застосування каскадної схеми з секційних апаратів киплячого шару як для охолодження готового продукту так і підігріву сировини з використанням проміжного теплоносія у вигляді інертного газу. За результатами чисельного дослідження такої системи встановлено, що доцільно використовувати утилізатор за схемою з числом камер не менше трьох. Водночас економія енерговитрат підвищується з 31,6% до 37,5% для схеми із компонування секційних апаратів 4:4.

У п'ятому розділі представлені результати розробки технології термічної обробки вуглецевої сировини на базі ЕТПКШ для умов American Energy Technologies Co. (Чикаго, США) в рамках науково-дослідних проектів: P482 «Recycling of spent batteries from electric drive vehicles» (2012-2014 pp), P645 «Modelling thermostatic control of storage batteries at low temperatures» (2014-2017 pp),) за участю Національної металургійної академії України, ТОВ «Центр матеріалознавства» (м. Київ, Україна), ДП «Конструкторське бюро «Південне» (Дніпро, Україна) і ТОВ «УкрНДІЕлектротерм» (м. Запоріжжя, Україна) під патронатом Українського Науково-Технологічного Центру (НТЦУ: м. Київ, Україна), Брукхевенської національної лабораторії (Нью-Йорк, США) та за підтримці Департаменту енергетики США. Результатом цих проектів є як сама технологія, так й виготовлене основне (рис. 14) і допоміжне обладнання комплексу переробки.

З метою спрощення класичної конструкції ЕТПКШ із подовою подачею азоту запропоноване альтернативне рішення: підведення газу через центральний електрод. Це виключає необхідність заміни газорозподільчої решітки та збільшує надійність роботи електротермічного агрегату. Ефективність такої схеми була досліджена на фізичній моделі. Для шару з відносною висотою $H_a / D_{\text{екв}} = 3 - 6$ за зміни схеми подачі газу амплітуда опору при застосуванні центральної подачі газу через електрод знижується приблизно на 36% - 60% відповідно, що повинно бути враховано у виборі розмірів робочого простору печі

Розроблена технологічна схема утилізації теплоти готового продукту

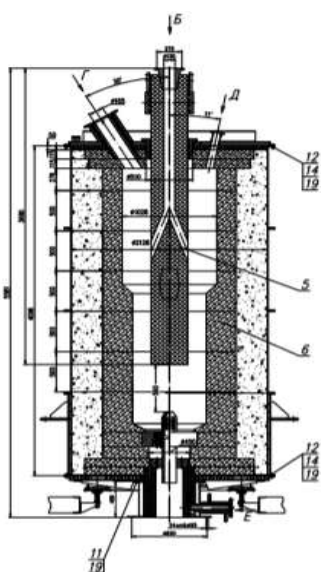


Рисунок 14. Конструкція ЕТПКС продуктивністю 1 т / год

Річна проектна продуктивність лінії за готовим продуктом становить 7000-8000 тис. т. До складу принципової схеми цеху термічної очищення вуглецевого матеріалу входять: склад сировини; ділянка подрібнення; ділянка сушки; електротермічна ділянка; система охолодження готового продукту; склад готового продукту; система допалювання пічних газів; система газоочищення; система димовидалення; система подачі азоту. Запропоновані технічні рішення дозволяють здійснювати як рециклінг вуглецевого матеріалу, так і термічне очищення ПГ і нафтових коксів.

Основні технічні характеристики і тепловий баланс ЕТПКС наведені в табл. 5-6. Піч має продуктивність до 1 т / год. Розрахункова середня електрична потужність складає 1,8-2,3 МВт. До 90% споживанням енергії пов'язано з нагріванням матеріалу до температури 2500-3000°C.

Таблиця 5

Основні характеристики ЕТПКС продуктивністю 1 т / год

Параметр	Значення
Робоча температура	2700°C
Висота активної зони	1000-1500 мм
Висота ділянки під електродом	600 мм
Діаметр робочого простору	800 мм
Потужність печі	1,8-2,3 МВт
Витрата азоту ($d_n = 0,2$ мм)	0,8 м ³ /год

Розрахунковий градієнт температур в киплячому шарі між центральним електродом і футеровкою не перевищує 10°C. Футеровка печі виконана у водоохолоджуваному корпусі і має двошарове виконання, теплова ізоляція виконана з технічного вуглецю. Система водяного охолодження елементів печі (елементи корпусу, нижня і верхня кришка печі) працює в температурному діапазоні 35-40°C.

Система охолодження готового продукту виконана тріступеневою: вертикальний холодильний щільного шару (2700-900°C), перехрестнотоківий теплообмінник з поперечними водоохолоджуваними трубами з корозійностійкої сталі (900-300°C), шнековий водоохолоджувальний теплообмінник < 300°C. До складу допоміжного обладнання цеху входять сушарка для сушіння і прогрівання матеріалу, допалювач відхідних газів

з теплообмінником, циклон та скруббер для очищення газів.

Таблиця 6

Тепловий баланс печі 1 т / г для природного графіту, $d_{\text{ч}} = 250$ мкм

Прибуткові статті			Видаткові статті		
Найменування	кВт	%	Найменування	кВт	%
Фізична теплота сировини	12,2	0,69	Фізична теплота готового продукту	1563,6	89,3
Фізична теплота азоту	0,01	0,00	Фізична теплота димових газів	2,4	0,2
Електроенергія	1738,4	99,31	Фізична теплота унесення пилу	78,2	4,5
			Водяне охолодження	106,6	6,1
Разом	1750,7	100,00		1750,7	100,00

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Λ – відносна провідність киплячого шару; δ – об’ємна доля газових бульбашок; $d_{\text{ч}}$ – діаметр частинки, м; W – число псевдозрідження; D_{e} – діаметр електроду, м; D_{a} – діаметр активної зони печі, м; H_{a} – висота активної зони печі, м; $H_{\text{пе}}$ – висота ділянки під електродом, м; $H_{\text{шп}}$ – висота надшарового простору, м; N – електрична потужність печі, Вт; U – напруга печі, В; I – струм печі, А; Ω – питомий електричний опір киплячого шару, Ом·м; $\Omega_{\text{ш}}$ – питомий електричний опір щільного / емульсійної фази киплячого шару, Ом·м; V – об’єм активної зони печі, м³; P_1 – безрозмірна потужність печі; P_2 – безрозмірний діаметр електроду; P – тиск у шарі, Па; R^2 – коефіцієнт кореляції регресійної моделі; $R_{\text{к}}$ – повний електричний опір контакту, Ом; K – коефіцієнт каркасу шару; L – лінійний розмір фрагменту шару, м; N – координаційне число елемента шару; C – емпіричний коефіцієнт залежності опору контакту; $Q_{\text{к}}$ – потужність тепловиділень в контакті, Вт; $T_{\text{ш}}$ – температура шару, К; q_{y} – тепловиділення в одиничному об’ємі киплячого шару (теплова потужність електротермічної печі, віднесена до об’єму робочого простору), Вт/см³; i_{A} – щільність струму у киплячому шару, А/см²; $t_{\text{роб}}$ – середня температура у робочому просторі печі; $Q_{\text{втр}}$ – втрати теплоти через стінки робочого простору; $q_{\text{втр}}$ – питомі втрати теплоти в робочому просторі %; G – продуктивність печі, кг/с (кг/г, т/г); $D_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр робочого простору печі, м; $F_{\text{ст}}$ – площа внутрішньої поверхні робочого простору печі, м²; $F_{\text{ел}}$ – площа поперечного перерізу електроду, м²; $\lambda_{\text{ел}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу центрального електроду, Вт/м·К; $\lambda_{\text{е.ст}}$ – коефіцієнт ефективної теплопровідності теплової ізоляції печі, Вт/м·К; f – приведена поверхня футеровки та електроду по відношенню до робочого об’єму печі, м⁻¹; k – доля часу завантаження / розвантаження матеріалу в операційному циклі по відношенню до середньої тривалості

перебування у шарі; $n_{\tau} = \tau_0 / \tau^*$ – кількість операційних циклів за період, який дорівнює середній тривалості перебування матеріалу у шарі; τ_0 – середня тривалість перебування матеріалу у шарі, с; τ^* – тривалість операційного циклу, с; ЕТПКШ – електротермічна піч (електротермічні печі) киплячого шару; ПЕО – питомий електричний опір; ВАХ – вольт-амперна характеристика.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу загального стану світового ринку вуглецевих матеріалів встановлено, що серед відомих технологій очищення батарейних марок графіту найбільш привабливим є спосіб обробки вуглецевої сировини у високотемпературних ЕТПКШ, який дозволяє у комплексі вирішувати технічні задачі термічного очищення матеріалу від сторонніх хімічних домішок та його графітації.

2. На основі математичного моделювання встановлено, що в якості вихідної сировини для отримання батарейного графіту у ЕТПКШ можуть бути застосовані природний графіт Заваллівського родовища, а також антрацити та «зелені» нафтові кокси. Зазначені матеріали повинні обов'язково проходити стадію сушіння та, за необхідності, попередню кальцинацію. Температура термічної обробки має бути на рівні $> 2800^{\circ}\text{C}$.

3. На основі експериментальних і розрахунково-теоретичних досліджень, із застосуванням двофазної теорії псевдозрідження, уточнено загальне фізичне уявлення явища електричної провідності неоднорідного киплячого шару електропровідних частинок в атмосфері інертного газу при температурах 273-3500К і тиску $P \sim 0,1$ МПа. Показано, що явище провідності киплячого шару обумовлено електроконтактною взаємодією частинок його емульсійної фази за непровідних властивостей газових пузирів. Провідність шару водночас слід розглядати, як результат деякого середнього (діючого) числа фізичних контактів частинок, які відчують незначні динамічні навантаження.

4. Розроблена комплексна напівемпірична математична модель провідності шару дисперсних частинок електропровідного матеріалу, що включає диференціальне рівняння безперервного миттєвого електричного поля в шарі з неоднорідними властивостями для постійного струму, а також систему кінцевих алгебраїчних рівнянь щодо потенціалів частинок. Математична модель ґрунтується на емпіричних залежностях опору контакту як функції ПЕО матеріалу, розміру часток, щільності струму та температури. Постановка задачі враховує геометрію робочого простору і орієнтацію електродів, температуру і тиск в шарі, гідродинамічний і електротермічний режими процесу, електроконтактні властивості дисперсних частинок і гранулометричний склад матеріалу.

5. На основі двофазної моделі псевдозрідженого шару частинок вуглецевих матеріалів встановлено, що за умов рівномірного розподілу газових пузирів та їх об'ємної частки $\delta = 2-5\%$ відносна електрична провідність шару становить $\Lambda = 0,96-0,92$. Зміна розміру і взаємного розташування пузирів відносно одне одного практично не впливають на електричну провідність шару.

На основі чисельного рішення потенційної задачі провідності ізотропних структур отримана регресійна залежність провідності шару від об'ємної частки пузирів $\Lambda = 0,99 - 1,34 \cdot \delta$ з достовірністю апроксимації $R^2 > 0,99$.

6. На основі імітаційного моделювання упаковки встановлено, що для нерухомого щільного шару, що продувається, в умовах діючої спрямованої масової сили, коефіцієнт каркасу K в ядрі реальних класифікованих полідисперсних систем із співвідношенням розміру часток не більше 2,5: 1 приймає значення в інтервалі 0,91-0,98 і не залежить від взаємного напрямку вектору масової сили і електричного струму.

На основі аналізу експериментальних і розрахункових залежностей коефіцієнту каркасу емульсійної фази киплячого шару від частки розімкнених контактів і числа псевдозрідження встановлено, що число розімкнених контактів за числа псевдозрідження $W = 0,75$ становить близько 30%; за $W = 1,25$ – відповідно 60-70%.

7. На основі алгоритму послідовного заповнення одиночними сферичними частинками, розроблена математична модель випадкової упаковки полідисперсного шару в полі діючої масової сили в обмеженому об'ємі. З її використанням встановлено межі існування елементарного об'єму ядра шару що складає $\times 12-15d$.

8. Розроблено експериментальний стенд для дослідження електропровідних властивостей дисперсних систем, що включає комплекс з трьох експериментальних установок для визначення ПЕО: 1) щільного шару, який продувається без зовнішнього механічного навантаження; 2) щільного шару, що продувається під тиском; 3) шару при псевдозрідженні.

За результатами фізичного моделювання процесу псевдозрідження часток тигельного графіту марки ГТ-1 визначено взаємозв'язок між гідродинамічним режимом і питомим електричним опором шару в діапазоні співвідношення висоти до еквівалентного діаметру поперечного перерізу шару електродної зони 1-2,5. Показано, що основна перебудова шару, виражена в різкому збільшенні електричного опору в результаті розриву контактів частинок, протікає в інтервалі чисел псевдозрідження $W = 0,75-1,25$.

9. На основі уточненого фізичного уявлення явища електричної провідності шару і результатів експериментальних та теоретичних досліджень отримана регресійна залежність визначення ПЕО електротермічного киплячого шару часток графіту як функції питомої теплової потужності в одиниці об'єму, температури шару, діаметра частинок, об'ємної частки пузирів і коефіцієнту каркасу шару. Похибка залежності по відношенню до експериментальних даних не перевищує 30%.

10. За результатами чисельного моделювання виділення теплової потужності в робочому просторі ЕТПКС з урахуванням впливу ділянки під електродом в діапазоні параметрів $H_a / D_e = 0,5-5$, $D_a / D_e = 1,4-2,3$, $H_{пе} / D_e = 0,25-2,0$ встановлено, що основним чинником, який визначає розподіл потужності між зонами печі, є висота активної зони. За значень $H_a / D_e \geq 2$ внесок ділянки під електродом в загальну потужність печі не перевищує 15%.

11. На основі математичного моделювання процесу теплообміну в об'ємі ЕТПКС отримана регресійна залежність неоднорідності температурного поля за радіусом печі

$\Delta t / t_{\text{роб}}$ від частки втрат теплоти через футеровку печі $Q_{\text{втр}}$; співвідношення діаметрів активної зони і центрального електроду D_a / D_e ; безрозмірного часу перебування матеріалу в активній зоні нагріву $Fo^* = a_{\text{еф}} \cdot \tau / D_{\text{екв}}^2$, яка дозволяє виконувати оцінку неоднорідності температурного поля.

12. Проведено параметричні дослідження зв'язків розмірів активної зони печі з її електротермічними режимами, що дозволило отримати критеріальну залежність що встановлює зв'язок між гідравлічними і електротермічними параметрами роботи ЕТПКС, як функції співвідношення висоти H_a до еквівалентного діаметру $D_{\text{екв}}$ активної зони від безрозмірних потужності печі $P_1 = N \cdot \Omega / U^2 \cdot V^{1/3}$ і діаметру електроду $P_2 = D_{\text{ел}} / V^{1/3}$.

На основі отриманих залежностей і аналізу теплового балансу розроблена методика розрахунку розмірів робочого простору ЕТПКС, яка дозволяє визначати внутрішні розміри для заданих значень продуктивності, тривалості обробки, напруги на електродах, питомого електричного опору киплячого шару і робочої температури.

13. У рамках міжнародного партнерського проекту P482 «Recycling of spent batteries from electric drive vehicles» (2012-2014 pp) розроблено конструкцію експериментальної ЕТПКС продуктивністю 10 кг / год, потужністю 15 кВт. Відповідно до розробленої методики були визначені наступні конструктивні розміри печі: внутрішній діаметр робочого простору – 105 мм; діаметр електроду – 60 мм; висота активної зони – 350 мм; висота ділянки під електродом – 200 мм; висота надшарової зони 500; зовнішній діаметр графітової футеровки – 305 мм;. Проведено тестові випробування печі які показали відповідність математичної моделі визначення ПЕО електротермічного киплячого шару.

14. Запропонована методика визначення режимів роботи ЕТПКС основана на системі ВАХ: ВАХ-ки електротермічного киплячого шару для заданих значень температури в діапазоні від 0 до 2700°C; ВАХ-ки електротермічного киплячого шару для продуктивності печі $G_{\text{мін}} = 0-10$ кг / год с; криві щільності струму на поверхні електроду, футеровки і середньої за радіусом печі і (I); криві постійної потужності $N = \text{const}$ в діапазоні 5-40 кВт.

На основі аналізу ВАХ визначена область сталої роботи ЕТПКС, що виключає ймовірність короткого замикання і різкого падіння потужності. За результатами аналізу ВАХ-к експериментальної печі розроблені режими розігріву, зміни температури і продуктивності, а також сталої роботи печі.

15. Для підвищення якості термообробки вуглецевого матеріалу в ЕТПКС запропонований режим дискретно-безперервного завантаження / розвантаження сировини, в якому середній період термообробки τ_0 поділяється на окремі операційні цикли. Кожен з таких циклів включає реалізацію трьох послідовних етапів: 1) стадію завантаження сировини τ_1 ; 2) стадію витримки τ_2 ; 3) стадію вивантаження готового продукту τ_3 . Водночас середній час термообробки τ_0 залишається без змін, динаміка дискретного виходу матеріалу відповідає ідеальній моделі перемішування киплячого шару, а стабільність

роботи печі забезпечується ємністю печі і певною частотою операційних циклів n за період τ_0 .

16. З метою підвищення надійності ЕТПКС і спрощення конструкції ділянки газорозподільної решітки запропонована конструкція агрегату на основі подачі псевдозріджуючого агента через центральний електрод з розподільними соплами в його нижній торцевій частині. Порівняльні результати експериментального дослідження показали, що для шару з відносною висотою $H_a / D_{\text{екв}} = 3$ і $H_a / D_{\text{екв}} = 6$ при зміні схеми подачі газу амплітуда опору при застосуванні центральної подачі газу через електрод знижується на 36% і 60 % відповідно, що потрібно враховувати у виборі розмірів робочого простору.

17. Розроблена технологічна схема утилізації теплоти готового продукту з застосуванням каскадної схеми з секційних апаратів киплячого шару як для охолодження готового продукту так і підігріву сировини з використанням проміжного теплоносія у вигляді інертного газу. За результатами чисельного дослідження такої системи встановлено, що доцільно використовувати утилізатор за схемою з числом камер не менш 3:3. Водночас економія енерговитрат підвищується з 31,6% до 37,5% для схеми 4:4.

18. Результати та рекомендації дисертаційної роботи впроваджено:

- при створенні промислової ділянки очищення графіту продуктивністю 1т / год в рамках міжнародного проекту GIPP BNL372 / STCU P482 Project «Recycling of spent batteries from electric drive vehicles», що включає високотемпературної електротермічної печі псевдозрідженого шару потужністю 2,3 МВт, три-ступеневу систему охолодження готового продукту після термічної обробки (вертикальний прямо трубний теплообмінник з щільним шаром; перехресноточний теплообмінник з поперечними водоохолоджуваними трубами, водоохолоджуваний шнековий живильник), системи очищення відхідних газів, сушарки, системи водяного охолодження;

- ТОВ «УкрНПЕлектротерм» для: розробки робочої конструкторської документації високотемпературної електротермічної печі киплячого шару продуктивністю 1000 кг/год для термічного очищення і графітації дисперсних вуглецевих матеріалів(природного графіту, коксу бурого вугілля, нафтового коксу) при температурах до 3000°C; розробки робочої конструкторської документації пілотної печі електротермічного киплячого шару продуктивністю 30 кг/год потужністю 150 кВт для обробки природного лускатого графіту при температурах до 3000°C; розробки технічної пропозиції щодо конструкторської розробки технологічного комплексу термічної переробки лускатого графіту продуктивністю 100 кг /год.

- для розробки технічної пропозиції створення технологічного комплексу високотемпературної термічної очистки та графітації природних графітів за температур до 3000°C на базі електротермічної печі киплячого шару (ЕТПКС) загальною потужністю до 8,0 тис. т на рік на ТОВ «Заваллівський Графіт». Термін окупності впровадження проекту не перевищує 2 роки.

ПЕРЕЛІК РОБІТ ОПУБЛІКОВАНИХ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

- у вітчизняних фахових виданнях:

1. Федоров, С. С., Губинский, М. В., Барсуков, И. В., Гогоци, А. Г., Форись С. Н. (2016). Анализ влияния состава углеродного сырья на угар углерода в электротермических печах кипящего слоя. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць*, 8, 304-307. Дисертант сформулював проблему та узагальнив результати щодо впливу складу вуглецевої сировини та пічної атмосфери на якісні показники готового продукту за термічної обробки у високотемпературних агрегатах.

2. Федоров, С. С. (2015). Анализ влияния плотности тока и температуры на удельное электрическое сопротивление кипящего слоя. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць*, 7, 135-141. Дисертантом отримані та узагальнені результати теоретичних досліджень про вплив щільності струму та температури на питомий електричний опір псевдозрідженого шару.

3. Федоров, С. С., Безуглый, В. А., Губинский, М. В., Кремнева, В. Е. (2015). Исследование удельного электрического сопротивления углеродсодержащих материалов в плотном и кипящем слое. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 6, 116-121. Дисертантом розроблена експериментальна установка, методи проведення експериментів, прийнято безпосередню участь у дослідженнях, узагальнено наукові результати щодо питомого електричного опору шару.

4. Федоров, С. С., Губинский, М. В., Тищенко Т. А, Barsukov, I. (2015). Особенности процессов нагрева углеродсодержащего сырья в электротермических печах кипящего слоя. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 3, 103-107. Дисертантом розроблено математичну модель, виконано розрахунково-теоретичні дослідження та узагальнено результати щодо теплообміну у шарових апаратах.

5. Бродниковский, Н. П., Гогоци, А. Г., Мазур, П. В., Зозуля, Ю. И., Малиновский, Б. Н., Самелюк, А. В., Губинский, М. В., Федоров, С. С. (2014). Изнашивание ферритной и аустенитной сталей при воздействии незакрепленных частиц кокса. *Электронная микроскопия и прочность материалов: сборник научных трудов*, 20, 172-178. Дисертантом сформульовано загальну постановку проблеми негативного впливу явища зношення сталі на якість очищеного графіту в охолоджувачі готового продукту.

6. Федоров, С. С., Губинский, М. В., Форись, С. Н. (2014). Выбор размеров рабочего пространства электротермических печей кипящего слоя для переработки углеродных материалов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 4, 87-90. Дисертантом сформульовано задачу, виконано теоретичні дослідження та узагальнено результатів щодо взаємозв'язку геометричних та режимних параметрів високотемпературних электротермічних печей псевдозрідженого шару, а також розроблено методіку вибору розмірів їх робочого простору.

7. Федоров, С. С. (2013) Анализ эффективности применения высокотемпературных секционных утилизаторов теплоты с кипящим слоем. Результаты исследований. Часть I. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 3, 125-128. Дисертантом

розроблено загальну концепцію застосування секційних утилізаторів теплоти готового продукту за технологічною схемою.

8. Федоров, С. С. (2013). Анализ эффективности применения высокотемпературных секционных утилизаторов теплоты с кипящим слоем. Результаты исследований. Часть II. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 4, 107-109. Дисерта́нтом досліджено та узагальнено результати щодо застосування секційних утилізаторів теплоти готового продукту за технологічною схемою.

9. Федоров, С. С., Губинский, М. В., Форись С. М., Дворецкий Д. С. (2013). Анализ процессов перемешивания углеродного материала в электротермических печах кипящего слоя. *Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины*, 5(20), 78-91. Дисерта́нтом розроблено математичну модель, проведено розрахунково-теоретичні дослідження та узагальнено результати масообміну у шарових апаратах.

10. Губинский, М. В., Федоров, С. С., Ливитан Н. В., Хейфец Р. Г. (2012). Выбор аэродинамических режимов работы высокотемпературных печей электротермического кипящего слоя. *Металлургическая теплотехника: сборник трудов Национальной металлургической академии Украины*, 4(19), 55-61. Дисерта́нтом розроблено експериментальну установку, методика проведення експериментів, прийнято безпосередню участь у дослідженнях, узагальнено наукові результати щодо гідравлічного опору кипящего шару.

11. Федоров, С. С., Форись, С. Н., Хейфец, Р. Г., Губинский, М. В., Усенко, А. Ю., Ковпак, А. Г., Агаджанян, А. В. (2010). Исследование процессов смесеобразования в шахтных известково-обжиговых печах. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: Збірник наукових праць*, 2, 184-197. Дисерта́нтом прийнято участь у дослідженнях процесів сумішоутворення у шарових агрегатах.

12. Форись, С. Н., Федоров, С. С., Губинский, М. В. (2008). Математическое моделирование шахтных известково-обжиговых печей. *Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*, 2, 98-104. Дисерта́нтом прийнято участь у розробці математичної постановки задачі тепломасообміну у шарових агрегатах.

13. Форись, С. Н., Федоров, С. С., Федоров, О. Г. (2008). Исследование влияния турбулентной диффузии газа на работу шахтных известково-обжиговых печей. *Інтегровані технології та енергозбереження: цо́квартальний науково-практичний журнал*, 2, 146-150. Дисерта́нтом прийнято участь у дослідженнях впливу дифузії газу на роботу шарових високотемпературних агрегатів.

- у фахових виданнях, які входять до бази SCOPUS:

14. Fedorov, S. S., Gubinskii, M. V., Foris, S. N. (2016). Mathematical Simulation of the Structural Properties of Packed and Fluidized Beds. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89(3), 627-635. doi: 10.1007/s10891-016-1420-x. Дисерта́нтом розроблена математична модель, проведені розрахунково-теоретичні дослідження та узагальнено результати про структурні властивості дисперсних упаковок.

15. Fedorov, S. S., Rohatgi, U. S., Barsukov, I. V., Gubynskiy, M. V., Barsukov, M. G.,

Wells, B. S., Livitan, M. V., Gogotsi, O. G. (2015). Ultrahigh-Temperature Continuous Reactors Based on Electrothermal Fluidized Bed Concept. *Journal of Fluids Engineering*, 138(4), 044502. doi:10.1115/1.4031689. Дисертантом розроблено концепцію високотемпературної технології обробки вуглецевої сировини для отримання батарейних марок графіту.

16. Fedorov, S. S., Gubinsky, M. V., Foris, S. N. (2015). Research of the influence of the sub electrode section on the work of electro-thermal fluidized bed furnaces. *Metallurgical and Mining Industry*, 9, 1208-1211. Дисертантом розроблено математичну модель, проведено розрахунково-теоретичні дослідження та узагальнено результати про теплообмін в апаратах з електротермічним шаром.

17. Fedorov, S. S., Gubynskiy, M. V., Barsukov, I. V., Livitan, M. V., Gogotsi, O. G. and Rohatgi, U. S. (2014). Modeling the Operation Regimes in Ultra-High Temperature Continuous Reactors. *Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting – 2014*, 1c, pp. V01CT18A012. doi:10.1115/FEDSM2014-22161. Дисертантом проведені дослідження та узагальнені результати щодо раціональних режимів електротермічних печей.

18. Gubinskiy, M. V., Fedorov, S. S., Livitan, N. V., Gogotsi, A. G., Barsukov, I. V., Rohathi, U. (2013). Analysis of Energy Efficiency of Furnaces for High Temperature Treatment of Carbon Materials. *Metallurgical and Mining Industry*, 5(2), 71-76. Дисертантом проведений загальний аналіз енергетичних та технологічних показників роботи високотемпературних пічних агрегатів з щільним та псевдозрідженим шаром.

19. Gubynskiy, M. V., Barsukov, I. V., Gogotsi, O. G., Fedorov, S. S., Livitan, M. V., & Rohatgi, U. (2014). Electrothermal Fluidized Bed Furnace for Thermal Treatment of Recycled Battery Wastes. *Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting – 2013*, 1B, pp. V01BT10A036. doi:10.1115/fedsm2013-16630. Дисертантом розроблено конструкцію високотемпературної електротермічної печі із киплячим шаром.

- у фахових виданнях інших закордонних наукометричних баз:

20. Gubinskyi, M., Fedorov, S., Kremniova, Ye., Gogotsi, O. & Vvedenska, T. (2016). Mathematical modeling of electric conductivity of dense and fluidized beds. *Power Engineering and Information Technologies in Technical Objects Control: 2016 Annual Proceedings*, 173-180. Дисертантом узагальнені результати що фізичного уявлення та моделювання електричної провідності киплячого шару.

21. Кутицкая, Е. А., Губинский, М. В., Федоров, С. С., Гогоци, А. Г. (2015). Повышение эффективности системы очистки отходящих газов высокотемпературной печи для обработки углеродных материалов. *Сборник докладов IV научно-практической конференции «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве»*, 62-65. Дисертантом сформульована загальна проблема утилізації теплоти вихідних газів високотемпературних електротермічних печей псевдозрідженого шару та визначені шляхи її вирішення.

22. Федоров, С. С., Губинский М. В., Форис, С. М. (2014). Анализ влияния газовых пузырей на проводимость электротермического кипящего слоя. *Творческое насле-*

дие В. Е. Грум-Гржимайло: прошлое, современное состояние, будущее: сборник докладов международной научно-практической конференции, 1, 452-459. Дисертантом проведено дослідження та узагальнені результати щодо впливу фази газових пазирів на провідність киплячого шару.

23. Дворецкий Д. С., Федоров С. С., Толстопят О. А. (2014) Исследование движения материала в секционном аппарате кипящего слоя. *Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 150-летию со дня рождения Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло*, 2, 35-38. Дисертантом розроблена експериментальна установка, методика проведення експериментів та прийнято участь у дослідженні руху матеріалу в секційному апараті киплячого шару.

- патенти України:

24. Губинський, М. В., Федоров, С. С., Форись, С. М., Тищенко, Т. О. (2016). Патент України на корисну модель No. UA107971. Київ, Україна: Державна служба інтелектуальної власності України. Дисертантом розроблений спосіб дискретного завантаження / вивантаження матеріалу в електротермічній печі киплячого шару для обробки вуглецевої сировини.

25. Федоров, С. С., Губинський, М. В., Форись, С. М. (2016). Патент України на корисну модель No. UA108964. Київ, Україна: Державна служба інтелектуальної власності України. Дисертантом розроблена конструкція електротермічної печі киплячого шару.

26. Федоров, С. С., Губинський, М. В., Форись, С. М., Гогоці, О. Г. (2016). Патент України на корисну модель No. UA107972. Київ, Україна: Державна служба інтелектуальної власності України. Дисертантом розроблена конструкція електротермічної печі киплячого шару із подачею газу у центральній електрод.

27. Федоров, С. С., Губинський, М. В., Форись, С. М., Ливитан, М. В., Шарабура, Т. А. (2016). Патент України на корисну модель No. UA100018. Київ, Україна: Державна служба інтелектуальної власності України. Дисертантом розроблена конструкція електротермічної печі киплячого шару з секційними утилізаторами теплоти.

- тези доповідей:

28. Федоров, С. С., Губинський, М. В., Барсуков, И. В., Гогоці, А. Г., Форись С. Н. (2017). Анализ влияния состава углеродного сырья на угар углерода при высокотемпературной обработке в электротермических печах кипящего слоя. *Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії: колективна монографія*, 271-274. Дисертант підготував доповідь про результати щодо впливу складу вуглецевої сировини та пічної атмосфери на якісні показники готового продукту за термічної обробки у високотемпературних агрегатах.

29. Тищенко, Т. А., Федоров, С. С., Губинський, М. В., Безуглий, В. А., Гогоці, А. Г. (2016). Исследование охлаждения тонкодисперсного графита в рекуперативных теплообменниках. *Proceeding of XVII International Scientific Conference «New Technologies*

and Achievements in Metallurgy and Material Engineering and Production Engineering», Cześćochowa, May 19-20, 2016. Дисертантом розроблена математична модель, проведення розрахунково-теоретичні дослідження та узагальнені результати щодо теплової роботи холодильників готового продукту електротермічних печей.

30. Федоров, С. С. (2014). Математическое моделирование электрической проводимости кипящего слоя. *Праці XVII Міжнародної конференції «Теплотехніка та енергетика в металургії», Дніпропетровськ, 7-9 жовтня, 2014, С. 180-181. Дисертант підготував доповідь про результати математичного моделювання електричної провідності електротермічного киплячого шару.*

31. Дерман, В. С., Федоров, С. С., Дворецкий, Д. С., Толстопят, О. А. (2013). Повышение эффективности работы высокотемпературных печей на основе рекуперации тепла готового продукта. *Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ 2013) «Теплотехника и информатика в образовании, науке и технике», Екатеринбург 28-29 марта, 2013, 44-45. Дисертант підготував доповідь щодо ефективності використання секційних утилізаторів теплоти готового продукту в секційних печах.*

32. Губинский, М. В., Федоров, С. С., Ливитан, Н. В., Барсуков, И. В., Гогоци, А. Г., Бродниковский, Н. П. (2012). Печи для производства высокочистых углеродных материалов. *Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сборник докладов международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 18-21 сентября, 2012, 79-83. Дисертант виконав аналіз енергетичних та технологічних показників роботи високотемпературних пічних агрегатів для виробництва вуглецевих матеріалів.*

33. Губинский, В. И., Губинский, М. В., Еремин, О. А., Федоров, С. С., Шевченко, Г. Л., Воробьева, Л. А. (2009). Развитие теории и опыт исследования тепломассообменных процессов в аппаратах с плотным слоем. *Труды международной научно-практической конференции «Творческое наследие Б.И. Китаева», Екатеринбург, 11-14 февраля, 2009, 125-128. Дисертант підготував доповідь щодо розвитку теорії високотемпературних печей.*

АНОТАЦІЯ

Федоров С.С. Розвиток наукових основ створення високотемпературних агрегатів з електротермічним киплячим шаром для очищення вуглецевих матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» (144 – Теплоенергетика). – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2018.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми розвитку наукових основ створення високотемпературних печей з електротермічним кип-

лячим шаром для обробки вуглецевої сировини при температурах 2000-3000°C та отримання графіту із вмістом вуглецю не менш 99,95%.

Поставлені завдання вирішені шляхом поєднання методів аналітичного та емпіричного аналізу. Експериментальні дослідження електричної провідності дисперсних вуглецевих матеріалів у щільному та псевдозрідженому шарі проведені за допомогою розроблених експериментальних установок з використанням потенціометричного методу вимірювання електричних величин із подальшою перевіркою робочих гіпотез на створеній фізичній моделі електротермічної печі. Розрахунково-теоретичні дослідження виконані 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 високотемпературними електротермічних печах на основі двофазної теорії псевдозрідження, процесів тепломасообміну в теплообмінних апаратах із псевдозрідженим та рухомим щільним шаром.

Проведені дослідження електричної провідності електротермічного шару з урахуванням структури шару, контактної взаємодії часток матеріалу, температури та питомого теплового навантаження одиниці об'єму, а також теплової роботи високотемпературних електротермічних печей киплячого шару. Перевірені та уточнені сучасні гіпотези щодо уявлення явища електричної провідності та розроблена на їх основі методика розрахунку питомого електричного опору псевдозрідженого шару. У підсумку визначені та науково обґрунтовані передумови надійної експлуатації, особливості нагрівання вихідної сировини, закономірності розподілу теплової потужності й неоднорідності температурного поля та створено методику розрахунку робочого простору цих агрегатів;

Розроблені нові ефективні конструкції високотемпературних електротермічних печей киплячого шару. Науково обґрунтовані раціональні режими їх експлуатації, які забезпечують необхідні робочі температури та створено на їх основі технологічний комплекс з термічної обробки вуглецевої сировини при температурах 2000-3000°C для отримання батарейних марок графіту із вмістом вуглецю не менш 99,95%.

Розроблені теоретичні засади щодо підвищення теплової ефективності технологічних комплексу з термічної обробки вуглецевої сировини за технологією високотемпературного електротермічного шару шляхом управління режимами руху матеріалу та вдосконалення технічних рішень щодо підведення у шар матеріалу псевдозріджуючого агенту в основному агрегаті, а також використання фізичної теплоти готового продукту за технологічною схемою.

Ключові слова: вуглецева сировина, графіт, електротермічна піч, киплячий шар, термічна обробка, графітація, питомий електричний опір, тепломасообмін, тепла потужність, енергетична ефективність.

ABSTRACT

Fedorov S. S. Development of the Scientific Basis for Design of High-Temperature Furnaces based on Electro-Thermal Fluidized Bed for Carbon Materials Processing – Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.14.06 – Technical Thermal Physics and Industrial Heat and Power Engineering (144 – Heat and Power Engineering), National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2018.

The present thesis is devoted to resolving of the substantial scientific and applied problem – development of the scientific basis for design of high-temperature furnaces based on electro-thermal fluidized bed concept for carbon materials processing at temperatures of 2000-3000°C and graphite production of more than 99,95% purity.

Set tasks were resolved by combining methods of the theoretical and experimental analysis. Experimental research of the electric conductivity of particulate carbon materials in packed and fluidized bed was conducted via developed laboratory installations using the potentiometric measurement method and further verification of working hypotheses with a physical model of an electro-thermal furnace. Computational and theoretical research were conducted on the basis of mathematical models of: structural properties of random particles systems; electrical conductivity of heterogeneous structures along with a frame model of conductivity for an elementary volume; heat transfer in high-temperature electro-thermal furnaces based on double phase fluidization theory; heat and mass transfer in heat exchangers with fluidized and moving packed bed.

Conducted research includes electrical conductivity of electro-thermal bed with respect to bed's structures, contact interaction between material particles, working temperature and specific heat output per unit volume as well as a thermal work of high-temperature electro-thermal furnaces with fluidized bed. Verified and refined modern hypotheses comprise the concept of the phenomenon of the electrical conductivity as well as the development on their basis calculating method for electrical resistivity of the fluidized bed. In the issue, the determined results are: scientifically substantiated preconditions of reliable operation, particularities of stock heating, patterns of power distribution and inhomogeneity of the temperature field as well as a calculation method of workspace dimensions for these furnaces.

New efficient designs of for electro-thermal fluidized bed furnaces were developed. Their rational operation modes, that ensure required working temperatures, were substantiated. As a result, an industrial plant concept for carbon materials thermal processing at 2000-3000°C for production of battery grade graphite of more than 99,95% purity higher was developed.

Thesis's outcomes include theoretical basis of enhancing thermal efficiency of an industrial plant for thermal processing of carbon materials based on the electro-thermal fluidized bed technology by controlled modes of material moving and improved technical solutions for fluidizing agent inlets as well as utilizing of processed product waste heat for heating raw material.

Keywords: carbon raw material, graphite, electro-thermal furnace, fluidized bed, graphitization, electrical resistivity, heat transfer, heat power, energy efficiency.