

Міністерство освіти і науки України
Національна металургійна академія України
спеціалізована вчена рада ДФ 08.084.003

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГОГОЦІ ОЛЕКСІЙ ГЕОРГІЙОВИЧ

УДК 66.096.5-932.2

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПЕЧЕЙ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ
КИПЛЯЧИМ ШАРОМ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВУГЛЕЦЕВИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 144 – Теплоенергетика
Галузь знань - 14 Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ О.Г. Гогоці

Науковий керівник – Губинський Михайло Володимирович, доктор технічних наук, професор

Дніпро - 2021

АНОТАЦІЯ

Гогоці О.Г. Удосконалення режимних і конструктивних параметрів високотемпературних печей з електротермічним киплячим шаром для термічної обробки вуглецевих матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії по спеціальності 144 - Теплоенергетика. Національна металургійна академія України, спеціалізована вчена рада Д 08.084.05 Дніпро, 2021

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі підвищення ефективності та надійності печей для термічної обробки вуглецевих матеріалів з електротермічним киплячим шаром (ЕКШ) шляхом вдосконалення режимних та конструктивних параметрів їх роботи.

Поставлені задачі вирішені шляхом експериментальних та теоретичних досліджень гідродинаміки та тепломасообміну у печах з ЕКШ. Експериментальні дослідження гідродинаміки проводили на холодній моделі печі з ЕКШ, що дозволило визначити режими, які забезпечують рівномірну обробку матеріалу. Запропоновано методику розрахунку печей з ЕКШ, з використанням якої розроблено та виготовлено пілотну піч продуктивністю 10 кг/год. Проведено її випробування, в результаті якого доведено принципову можливість електротермічного нагріву природного графіту та визначено основні вимоги до конструктивних елементів печі.

Запропоновано двоступеневу схему охолодження готового продукту, що включає прямотрубний холодильник щільного шару з паралельними каналами та перехреснотоківий холодильник з шаховим розташуванням водоохолоджуваних труб. На основі математичного моделювання доведено, що інтенсифікація процесу охолодження готового продукту в прямотрубних холодильниках першого ступеня можлива за рахунок зменшення діаметру

каналів та використання секцій, що забезпечують перемішування матеріалу. Експериментально визначено ерозійний вплив вуглецевих матеріалів на трубчасті теплообмінні поверхні холодильнику готового продукту в залежності від швидкості та тиску.

На основі математичного моделювання охолодження запиленого газу розроблено технологічну схему охолодження і очищення відхідних газів печі з електротермічним киплячим шаром.

Ключові слова: вуглецевий матеріал, високотемпературна електротермічна піч, щільний, киплячий, зважений шар, гідродинамічний режим, тепломасообмін, холодильник.

ABSTRACT

Gogotsi O.G. Improvement of the operating and design parameters of high-temperature furnaces with electrothermal fluidized bed for heat treatment of carbon materials. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation for a scientific degree of Doctor of Philosophy in a specialty 144 - Heat and Power Engineering. National Metallurgical Academy of Ukraine, Specialized Academic Council D 08.084.05 Dnipro, 2021.

The dissertation is aimed at solving of an important scientific and technical problem of enhancing the efficiency and reliability of furnaces for heat treatment of carbon materials with electrothermal fluidized bed (EFB) by improving their operating and design parameters of their operation.

The problems were solved by experimental and theoretical studies of hydrodynamics and heat-and-mass transfer in furnaces with EFB. Experimental studies of hydrodynamics were performed on a “cold” model of a furnace with an EFB, which allowed to determine the modes that ensure uniform processing of material. A method for calculating furnaces with EFB was proposed. On its basis, a pilot furnace of 10 kg / h capacity was developed and fabricated. Its tests were carried out, as a result, the possibility of heating natural graphite was proved and the basic requirements to structural elements of a furnace were determined.

A two-stage cooling of the final product was proposed, which includes a straight-tube cooler of a fixed bed with parallel channels and a cross-flow cooler with a checkerboard arrangement of water-cooled pipes. On the basis of mathematical simulation, it was proved that intensification of the cooling process of the final product in straight-tube coolers of the first stage is possible by reducing the diameter of the channels and application of sections that provide mixing of the material. The erosive impact of carbon materials on tube heat-exchange surfaces of a final product cooler depending on material velocity and pressure was experimentally determined.

On the basis of mathematical simulation of cooling of dust containing gases the technology process flow diagram of cooling and cleaning of exhaust gases of a furnace with EFB was developed.

Keywords: carbon material, high-temperature electrothermal furnace, fixed, fluidized, suspended bed, hydrodynamic mode, heat and mass transfer, cooler.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Федоров, С. С., Губинский, М. В., Барсуков, И. В., Гогоци, А. Г., Форись С. Н. Анализ влияния состава углеродного сырья на угар углерода в электротермических печах кипящего слоя. Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. Дніпро, 2016, №8, С. 304-307.
2. Бродниковский, Н. П., Гогоци, А. Г., Мазур, П. В., Зозуля, Ю. И., Малиновский, Б. Н., Самелюк, А. В., Губинский, М. В., Федоров, С. С. Изнашивание ферритной и аустенитной сталей при воздействии незакрепленных частиц кокса. Электронная микроскопия и прочность материалов: сборник научных трудов. Київ, 2014, №20, С.172-178.
3. Губинский, М. В., Федоров, С. С., Ливитан Н. В., Хейфец Р. Г., Гогоци А.Г. (2012) Выбор аэродинамических режимов работы высокотемпературных печей электротермического кипящего слоя. Metallurgical heat engineering: сборник трудов Национальной металлургической академии Украины, Днепрпетровск, 2012, №4(19), С.55-61.
4. Дослідження сучасних технології рафінування графітової сировини для виробництва анодів літій-іонних акумуляторів / С. С. Федоров, М. В. Губинський, А. В. Сибір, С. М. Форись, О. Г. Гогоці, А. Ю. Усенко Металургійна та гірничорудна промисловість. 2018. № 3. С. 74-84.
5. Федоров С.С., Сибір А.В., Губинський М.В., Губинський С.М., Форись С.М. , Гогоці О.Г., Коваль С.В. Дослідження режимів роботи пілотної електротермічної печі киплячого шару продуктивністю 10 кг/год / Металургійна та гірничорудна промисловість. 2019. № 3-4. С. 48-55.
6. Сибір А.В., Губинський М.В., Федоров С.С., Губинський С.М., Гогоці О.Г. Печі з електротермічним киплячим шаром. Конструктивні особливості. Металургійна та гірничорудна промисловість. 2020. № 2. С. 42-61.

7. Fedorov, S.S., Rohatgi U.S., Barsukov I.V., Gubynskiy M.V., Barsukov M.G., Wells B.S., Livitan M.V., Gogotsi O.G. Ultrahigh-Temperature Continuous Reactors Based on Electrothermal Fluidized Bed Concept. *Journal of Fluids Engineering*. 2015. №138(4), 044502. doi:10.1115/1.4031689.

8. Fedorov S.S., Gubynskiy M.V., Barsukov I.V., Livitan M.V., Gogotsi O.G. and Rohatgi U.S. Modeling the Operation Regimes in Ultra-High Temperature Continuous Reactors. *Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2014, 1c, P. V01CT18A012. doi:10.1115/FEDSM2014-22161.

9. Gubinskiy M.V., Fedorov S.S., Livitan N.V., Gogotsi A.G., Barsukov I.V., Rohathi U.S. Analysis of Energy Efficiency of Furnaces for High Temperature Treatment of Carbon Materials. *Metallurgical and Mining Industry*. 2013. №5(2), C.71-76.

10. Gubynskiy M.V., Barsukov I.V., Gogotsi O.G., Fedorov S.S., Livitan M.V., Rohatgi, U.S. Electrothermal Fluidized Bed Furnace for Thermal Treatment of Recycled Battery Wastes. *Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2013. №1B. V01BT10A036. doi:10.1115/fedsm2013-16630.

11. Gubinskiy M., Fedorov S., Kremniova Ye., Gogotsi O. & Vvedenska, T. Mathematical modeling of electric conductivity of dense and fluidized beds. *Power Engineering and Information Technologies in Technical Objects Contro*. London. 2016. P.173-180.

12. Кутицкая Е.А., Губинский М.В., Федоров С.С., Гогоци А.Г. 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». Екатеринбург. 2015. С 62-65.

13. Електротермічна піч псевдозродженого шару: Пат. на корисну модель 107972 Україна: МПК F27B 15/00; № u201600086; заявл. 04.01.2016; опубл. 24.06.2016, бюл. № 12.

14. Спосіб очищення високотемпературних газів від возгонів: Пат. на корисну модель 1477720 Україна: МПК В01Д 7/02, С22В 7/02; №u2020 06684; заявл. 16.10.2020; опубл. 09.06.2021, бюл. № 23

15. Федоров С.С., Губинский М.В., Барсуков И.В., Гогоци А.Г., Форись С.Н. Анализ влияния состава углеродного сырья на угар углерода при высокотемпературной обработке в электротермических печах кипящего слоя. Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії: колективна монографія, Дніпро, 2017. С. 271-274.

16. Тищенко Т.А., Федоров С.С., Губинский М.В., Безуглый В.А., Гогоци А.Г. Исследование охлаждения тонкодисперсного графита в рекуперативных теплообменниках. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: Proceeding of XVII International Scientific Conference Czestochowa, 2016. С.564-574

17. Губинский М.В., Федоров С.С., Ливитан Н.В., Барсуков И.В., Гогоци А.Г., Бродниковский Н.П. Печи для производства высокочистых углеродных материалов. Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сборник докладов международной научно–практической конференции, Екатеринбург, 2012. С. 79-83.

18. Федоров С.С., Сибір А.В., Губинський М.В., Губинський С.М., Гогоці О.Г., Форись С.М. Дослідження процесу охолодження відхідних газів високотемпературних електротермічних печей киплячого шару, Системні технології. Дніпро. № 6 (131). С.107-122. DOI 10.34185/1562-9945-6-131-2020-10

ЗМІСТ

1	АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЇ ПЕЧЕЙ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ ТЕХОЛГІЧНИХ РЕЖИМІВ	17
1.1	Печі з електротермічним киплячим шаром. Конструктивні особливості	17
1.1.1	Термічна обробка вуглецевих матеріалів	17
1.1.2	Класифікація печей з електротермічним киплячим шаром	19
1.1.3	Геометрія робочого простору високотемпературних печей з ЕКШ	25
1.1.4	Газорозподільні пристрої високотемпературних печей з ЕКШ	29
1.1.5	Організація руху матеріалу у печах з ЕКШ	36
1.1.6	Охолодження готового продукту	36
1.1.7	Очищення та охолодження відхідних газів	39
1.2	Особливості експлуатації печей з ЕПШ для термічної обробки вуглецевих матеріалів та визначення шляхів підвищення ефективності та надійності їх роботи	41
1.2.1	Особливості вибору гідродинамічного режиму роботи печей з ЕКШ	41
1.2.2	Напрями підвищення ефективності та надійності роботи печей з ЕКШ	41
1.2.3	Розробка та перевірка основних конструктивних рішень та режимних параметрів печей з ЕКШ для термічної обробки вуглецевих матеріалів на основі пілотної установки	42

2	ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ГІДРОДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПЕЧЕЙ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ	45
2.1	Методика досліджень гідродинамічних режимів роботи печей з ЕКШ	45
2.2	Результати досліджень гідродинамічного режиму роботи печей з ЕКШ	47
3	РОЗРОБКА ПІЛОТНОЇ ПЕЧІ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ	56
3.1	Розробка печі з ЕКШ продуктивністю 10 кг/год	56
	3.1.1 Вихідні дані для розробки печі з ЕКШ продуктивністю 10 кг/год	56
	3.1.2 Розрахунок печі	57
	3.1.3 Розрахунок матеріального балансу печі	59
	3.1.4 Розрахунок теплового балансу	60
	3.1.5 Результати розробки печі ЕКШ продуктивністю 10кг/год	63
3.2	Виготовлення та випробування пілотної печі з ЕКШ продуктивністю 10 кг/год	65
	3.2.1 Розробка та виготовлення печі	65
	3.2.2 Випробування пілотної печі	65
4	РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОГО ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ	70
4.1	Дослідження охолодження готового продукту у холодильнику першої ступені	72
	4.1.1 Математична модель прямотрубного багатосекційного охолоджувача матеріалу	73
	4.1.2 Методика досліджень	76
	4.1.3 Результати розрахункового дослідження охолодження	

	11
матеріалу	77
4.1.4 Розробка рекомендацій щодо вибору розмірів холодильника матеріалу	80
4.2 Дослідження роботи холодильника другої ступені	81
4.2.1 Методика розрахунку холодильника другої ступені	81
4.2.2 Дослідження абразивного зносу теплообмінних поверхонь холодильника	83
4.2.3 Дослідження впливу вуглецю та азоту на надійність роботи теплообмінних поверхонь теплообмінника	88
5 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ПЕЧІ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ	93
5.1 Удосконалення теплової схеми охолодження та очищення відхідних газів печей з ЕКШ	93
5.2 Розробка методики дослідження радіаційного охолоджувача	97
5.2.1. Математичне моделювання процесів охолодження високотемпературного запиленого потоку	97
5.2.2. Верифікація та адаптація математичної моделі	102
5.3 Дослідження впливу режимних та геометричних параметрів на роботу радіаційного охолоджувача	105
ВИСНОВКИ	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	113
ДОДАТКИ	124

ВСТУП

Актуальність роботи.

Одними з поширених сучасних напрямів використання вуглецевих матеріалів у промисловості є його застосування у металургії (виробництво електродної продукції та карбюраторів), атомній енергетиці, та для потреб виготовлення електричних акумуляторів різних типів. Основною вимогою до якості вуглецевих матеріалів є високий вміст вуглецю – більше 99%. Рафінування вуглецевих матеріалів (штучних чи природніх) до відповідного рівня можливо декількома шляхами більшість з яких пов'язана з використанням екологічно небезпечних обробок кислотою та лугом.

Альтернативним способом очищення вуглецевих матеріалів, який може бути відносений до «зелених» технологій, – є їх термічна обробка при температурах близько 3000°C. Реалізація цієї технології у поточному процесі можлива на основі так званих печей з електротермічним киплячим шаром (ЕКШ). Широке використання цих агрегатів на практиці пов'язано з необхідністю підвищення ефективності та надійності їх роботи. Саме це підтверджує актуальність проведених у дисертації досліджень спрямованих на удосконалення режимних та конструктивних параметрів печей з ЕКШ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в Національній металургійній академії України згідно тематичними планами наукових досліджень академії та кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту: «Наукове обґрунтування та розробка ефективних тепло-масообмінних процесів в інноваційних металургійних технологіях» (0217U002973), «Розроблення технології виробництва графіту для літій-іонних акумуляторів» (0118U005464).

Мета роботи: підвищення ефективності та надійності печей для термічної обробки вуглецевих матеріалів з електротермічним киплячим шаром шляхом вдосконалення режимних та конструктивних параметрів їх роботи.

Задачі дослідження:

- розробка класифікації печей з ЕКШ за конструктивними та технологічними параметрами;
- дослідження та розробка гідродинамічних режимів роботи високотемпературних печей з ЕКШ;
- створення та дослідження пілотної установки з ЕКШ продуктивністю 10 кг/год;
- дослідження та розробка ефективних систем охолодження готового продукту печей з ЕКШ;
- дослідження та розробка ефективних систем очищення та охолодження відхідних газів печей з ЕКШ для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів.

Об'єкт дослідження: процеси тепломасообміну і гідродинаміки в печах ЕКШ для термічної обробки вуглецевих матеріалів.

Предмет дослідження: гідродинамічні режими, особливості тепло масообміну у щільному, киплячому та зваженому шарі в елементах та системах печей з ЕКШ.

Методи досліджень. При виконанні досліджень використано наступні методи:

- експериментальні дослідження гідродинамічних режимів печей з ЕКШ на холодній моделі пілотної печі продуктивністю 10 кг/год;
- полупромислові випробування у пілотної печі 10 кг/год;
- теоретичні дослідження процесів охолодження готового продукту у холодильниках з щільним шаром на основі розроблених математичних моделей;
- теоретичне дослідження процесів охолодження та очищення відхідних запиленних газів печей ЕКШ на основі розроблених математичних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів:

- Вперше на основі аналізу конструкцій печей з електротермічним киплячим шаром запропоновано їх класифікацію за конструктивними та технологічними параметрами в тому числі: за температурою термічної обробки, напрямом руху електричного струму через киплячий шар, типу газорозподільчих решіток, організацією поточного процесу;

- Вперше на основі експериментальних досліджень визначено ефективний гідродинамічний режим роботи ЕКШ для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів, який повинен відповідати порозності шару $\varepsilon = 0,55-0,65$ для робочої зони печі;

- Вперше на основі математичного моделювання отримано залежність безрозмірної середньомасової температури вуглецевого матеріалу при охолодженні в прямотрубному холодильнику від режимних і конструктивних параметрів його роботи (швидкості руху матеріалу, діаметру каналів охолодження, кількості секцій безперервного руху та їх висоти). Залежність може бути використана для оптимізації показників роботи холодильника подібного типу;

- Вперше запропоновано систему очищення та охолодження відхідних газів без їх допалення; шляхом математичного моделювання визначено ефективність її роботи на рівні 65-85% в діапазоні параметрів: температура та витрати відхідних газів $t_r = 2500-3000^\circ\text{C}$, $V_r = 50-150 \text{ м}^3/\text{год}$, концентрації пилу $\mu = 400-2000 \text{ г}/\text{м}^3$, діаметру часток пилу $d_{\text{ч}} = 100-300 \text{ мкм}$.

Практичне значення одержаних результатів:

- Розроблено методику розрахунку теплового балансу печі ЕКШ для високотемпературної термічної обробки вуглецевих матеріалів;

- Результати роботи використані при проектуванні пілотної печі ЕКШ продуктивністю 10 кг/год ТОВ «Центр матеріалознавства» м. Київ, що підтверджено актом впровадження;

- Запропоновано методику розрахунку перехресного токового холодильника готового продукту від температури 900-1000°C до 300°C, яку використано при проектуванні холодильника продуктивністю 1000 кг/год;
- Розроблено рекомендації щодо конструкції прямотрубного холодильника готового продукту з щільним шаром;
- Експериментально визначено ерозійний вплив вуглецевих матеріалів на трубчасті теплообмінні поверхні холодильнику готового продукту в залежності від швидкості та тиску;
- Результати роботи використані у навчальному процесі кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту НМетАУ при викладанні курсів «Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки».

Особистий внесок здобувача.

Особистий внесок автора полягає у наступному: розробці класифікації печей з ЕКШ [3, 5,6, 32]; розробці методики проведення та обробці результатів експериментальних досліджень гідродинамічних режимів ЕКШ [58, 59]; безпосередній участі в розробці пілотної печі ЕКШ продуктивністю 10 кг/год, її випробуваннях та узагальненні отриманих результатів [65, 66, 67]; розробці математичних моделей охолодження готового продукту, охолодження та очищення відхідних газів печей ЕКШ, а також проведення розрахунково-теоретичних досліджень на їх основі [54, 76, 88, 91, 96].

Апробація результатів дисертації.

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 конференция «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (УрФУ, Екатеринбург, Россия, 19-21 сентября 2012) IV международная научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных

«Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (Екатеринбург 2015, XVIII міжнародна конференція «Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії – 2017» (НМетАУ, Дніпро, Україна, 10-13 жовтня 2017).

Публікації.

Основні матеріали дисертації представлені у 18-ти друкованих працях, в тому числі: 10-ти статтях у фахових журналах, з яких 4 статі входять до наукометричної бази Scopus,); 2-х патентах України; 6-ти матеріалах 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 123 сторінки загального машинописного тексту та містить 14 таблиць, 51 рисунки, бібліографічний список з 102 джерел і 5 додатків

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЇ ПЕЧЕЙ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ ТЕХОЛГІЧНИХ РЕЖИМІВ

1.1 Печі з електротермічним киплячим шаром. Конструктивні особливості.

1.1.1 Термічна обробка вуглецевих матеріалів

Основними напрямками використання вуглецевих та графітованих матеріалів є виготовлення електродної продукції для отримання алюмінію та електросталі; виготовлення електротехнічної продукції, електричних акумуляторів, відновників (карбюризаторів), елементів конструкцій що використовуються у ядерної енергетиці тощо [1]. Сучасними тенденціями розвитку виробництва вуглецевих матеріалів є підвищення їх якості, в першу чергу, за рахунок підвищення чистоти самих матеріалів, а також зміни їх структури та властивостей (електропровідності, щільності та міцності) [2, 3].

Сировиною для виробництва вуглеграфітових виробів є нафтовий кокс, антрацит і природний графіт. Суть технологічного процесу полягає, як мінімум, у двоступеневому процесі [4]:

- перший – кальцинація сировини (для нафтових коксів та антрацитів) з нагрівом до температури 1100-1300°C, при якому спостерігається видалення сірки, лектих компонентів та зниження електричного опору;
- другий – графітація з нагріванням вихідного матеріалу до температур 2000-3000°C з наступною витримкою, що призводить до перебудови кристалічної структури у нову, притаманну графіту, та видаленню інших

хімічних елементів (домішок) шляхом їх возгону до газової фази.

При виробництві природного графіту основним технологічним процесом є його збагачення до 99,95% за вмістом вуглецю.

Відомі пічні агрегати для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів з використанням зовнішнього нагріву (газового або електричного) [5, 6], які забезпечують термічну обробку сировини за температур 900-1400°C. Це дозволяє використовувати на фінішній (другій) стадії термічної обробки високотемпературний резистивний електронагрів в шарі. На даний час відомі два технологічні процеси високотемпературної обробки вуглецевого матеріалу: в щільному та киплячому шарі.

Процес нагріву в щільному шарі реалізується в електрокальцинаторах шахтного типу [2], в яких попередній розігрів сирого матеріалу до 900°C і подальший резистивний нагрів до температур 2000°C здійснюються в одному агрегаті шляхом пропускання струму між верхнім і нижнім електродами безпосередньо через щільний шар вугілля з розмірами частинок 6-25 мм. Саме такий варіант технології використовується на провідному українському підприємстві з виробництва електродів ПАТ «Укрграфіт».

Процес високотемпературного резистивного нагріву визначається потужністю і розподілом джерел теплоти, тобто розподілом сили струму за радіусом і висотою шару матеріалу, що знаходиться між електродами. Дослідження, проведені в промислових умовах, показали, що в процесі електронагріву спостерігається нерівномірний розподіл джерел теплоти в об'ємі електрокальцинатору [2]. Це викликає перегрів центральних прошарків антрациту, що знаходяться уздовж осі розташування електродів, що, в свою чергу, призводить до збільшення нерівномірності розподілу сили струму за радіусом через відповідні збільшення температур та зменшення питомого електричного опору [2]. В результаті якість готової продукції (термоантрациту), що перебуває на периферії, поблизу футерування електрокальцинатора, не задовольняє технологічним вимогам через

недостатню температуру обробки. Останнє обумовлює необхідність застосовувати повторну обробку матеріалу в кальцинаторах, що значно збільшує енерговитрати до рівня 1360-1380 кВт·г / т готового продукту.

Альтернативою процесу високотемпературної обробки в щільному шарі є використання печей з електротермічним киплячим шаром (ЕКШ) [6-8]. Розвиток наукових основ розробки цих агрегатів та технологічних процесів з ЕКШ припадає на семидесяті роки минулого сторіччя. Водночас, практичне їх використання не було поширеним, оскільки конкурентні технології на основі щільного шару та викопного палива мали на той час свої переваги.

Поступове впровадження ідеї сталого виробництва з використанням відновлювальних джерел енергії знов привернули увагу до електротермічних процесів, які потенційно можуть стати основою «зелених» високотемпературних технологій. Наприклад, для процесів термічної обробки дисперсних матеріалів без зміни їх фазового стану, саме печі ЕКШ мають широкі перспективи застосування. Це підтверджено, насамперед, для високотемпературного рафінування графіту, інтерес до якого значно виріс в останні роки.

1.1.2 Класифікація печей з електротермічним киплячим шаром

Електротермічний киплячий шар (ЕКШ) забезпечує роботу печей при температурах у робочому просторі до 3000°C, водночас тривалість обробки необмежена і дозволяє організацію безперервного виробничого процесу. Основні принципи його реалізації полягають у наявності як мінімум двох електродів; електропровідного матеріалу та джерела струму (рис. 1.1).

Вибір варіанту реалізації ЕКШ та відповідне застосування вогнетривів визначаються рівнем температури процесу. У зв'язку з цим, всі технологічні процеси і конструкції печей можна умовно поділити на: «низькотемпературні» - температура шару 1000-1600°C; та «високотемпературні» - температура шару 1600-3000°C.

У «низькотемпературних» печах можуть бути використані вогнетривкі

матеріали: шамотні, корундові, магнезійні, динасові [9, 10]. Для «високотемпературних» печей – переважно графіт. Саме це обмеження визначає конструкцію печі і організацію технологічного процесу.

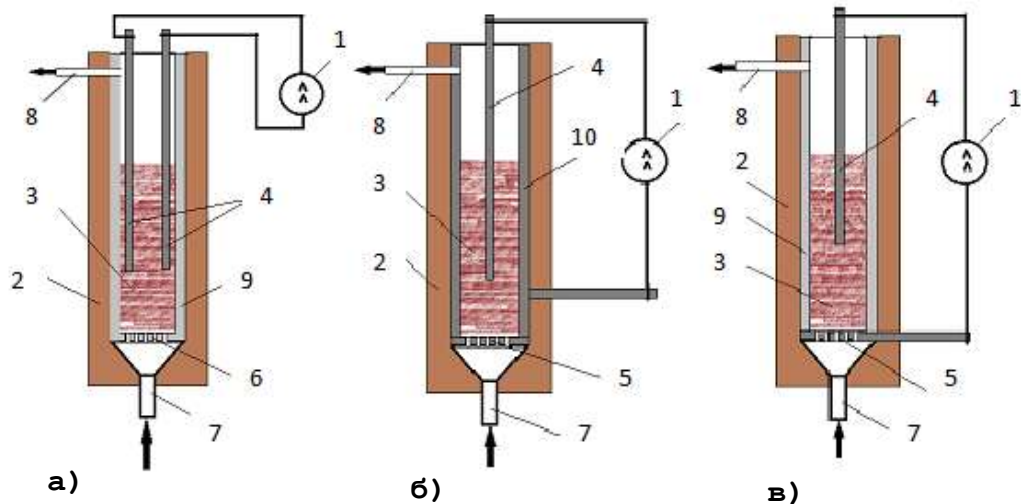


Рисунок 1.1. Варіанти реалізації електротермічного киплячого шару [7]. а) з двома зануреними електродами; б) з одним центральним електродом та електропровідною футеровкою; в) з одним центральним електродом та електропровідною решіткою: 1 - джерело струму; 2 - корпус з тепловою ізоляцією; 3 - киплячий шар; 4 – електрод; 5 - газорозподільна решітка – електрод; 6 - газорозподільна решітка; 7 - підведення інертного газу; 8 - видалення газів з печі; 9 - діелектрична футеровка робочої камери; 10 - електропровідна футеровка робочої камери печі

До «низькотемпературних» процесів в ЕКШ можна віднести: пряме відновлення заліза з використанням твердого вуглецевого матеріалу в якості відновника [11], отримання карбіду титану TiC [12], карбіду кремнію SiC [13,14] і карбіду цирконію [15], парова газифікація коксу [16], термічна обробка металевих виробів [17], отримання хлориду цирконію $ZrCl_4$ [18], отримання водню піролізом вуглеводнів [19], капсулювання кварцового піску піровуглецем [20], прожарювання зеленого нафтового коксу [21].

Всі конструкції печей з «низькотемпературним» ЕКШ можливо розділити за напрямом електричного струму: поперек шару (в горизонтальній площині) і за віссю шару (у вертикальній площині).

На рис. 1.1а, 1.2, 1.3 наведені конструкції печей з двома електродами [21,

22], які занурені в киплячий шар електропровідних частинок, що забезпечує нагрів шару при протіканні струму від одного електрода до іншого в горизонтальній площині. Аналогічна конструкція печі пропонується автором патенту [23]. Як варіант, можлива модифікація схеми на основі багатоелектродної системи [24] (рис. 1.4).

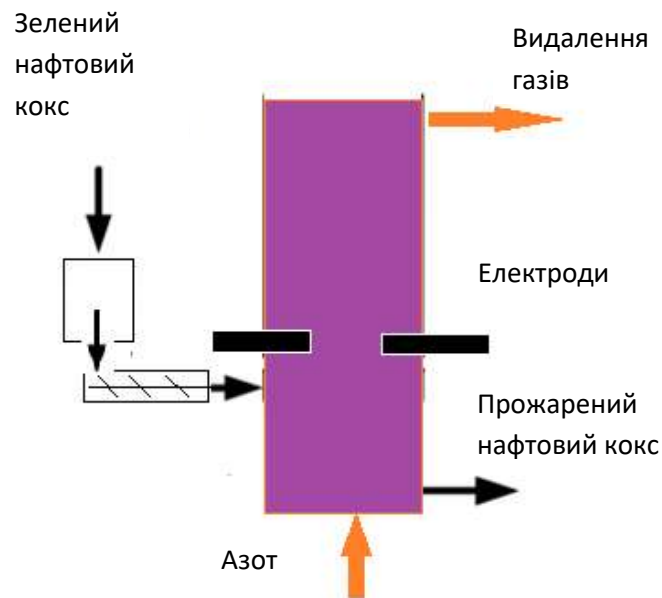


Рисунок 1.2. Піч з ЕКШ для прожарювання нафтового коксу з горизонтальним розташування двох електродів [21]

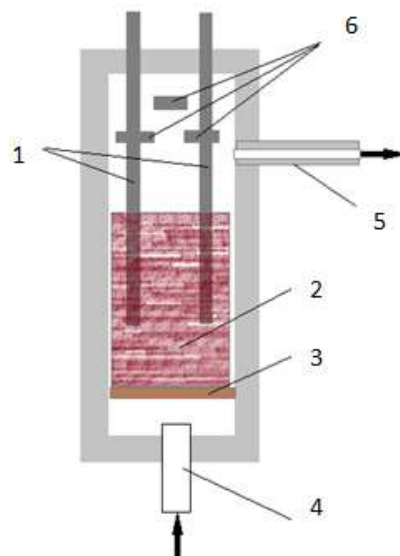


Рисунок 1.3. Піч з електротермічним киплячим шаром для проведення каталітичних реакцій [22]: 1 – електроди; 2 - киплячий шар; 3 - газорозподільна решітка; 4, 5 - підведення і евакуація інертного газу; 6 - теплоізоляційні екрани

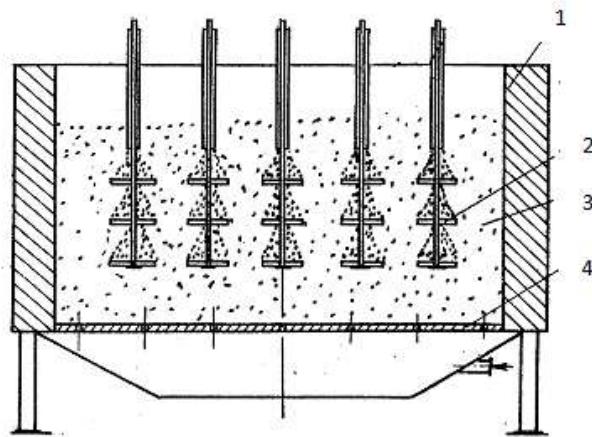


Рисунок 1.4. Багатоелектродна піч з ЕКШ [24]: 1 - футеровка печі; 2 – електроди; 3 - киплячий шар; 4 - газорозподільна решітка

Відомі також інші варіанти конструкції печей ЕКШ з поперечним рухом електричного струму – це печі з циліндричною робочою камерою, огорожа якої також є електродом. Другий, центральний, електрод розташований уздовж вертикальної осі. Струм в таких печах рухається в радіальному напрямку [11, 14, 16, 18, 24]. Приклад такої печі для прямого відновлення оксидів заліза представлений на рис. 1.5 [11].

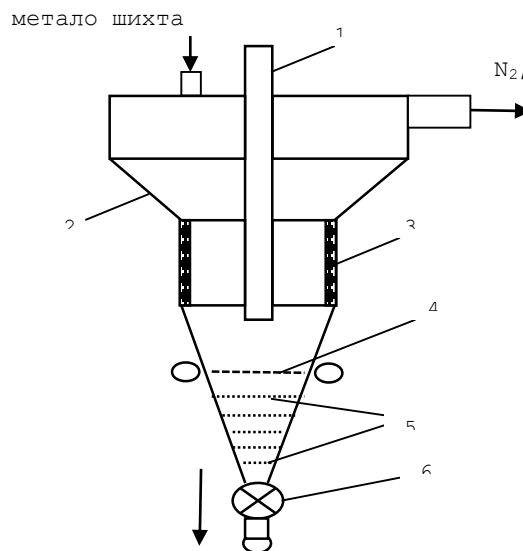


Рисунок 1.5. Піч прямого відновлення оксидів заліза [11]: 1 - центральний електрод; 2 - футерований корпус печі; 3 - бічний електрод; 4 - підведення інертного газу; 5 - підведення реакційного газу; 6 - живильник вивантаження охолодженого матеріалу

Відомі так само конструкції печей ЕКШ з вертикальним рухом струму

[25-28]. В якості електродів використовують верхній електрод, нижня частина якого значно перекиває робочий простір печі і має розвинену форму поверхні (корону), та газорозподільну решітку (рис. 1.6, 1.7).

Інакше виглядає конструкція печі з ґратчастими електродами по висоті киплячого шару та вогнетривкою насадкою між ними [27] (рис. 1.8). Отже, має місце обмежений ЕКШ, в якому електроди підключені до різних фаз. Натомість в конструкції печі [29] (рис. 1.9) реалізується підковоподібний рух струму. Електродами служать окремі елементи газорозподільної решітки, розділені електроізоляційними вставками у вигляді перегородок.

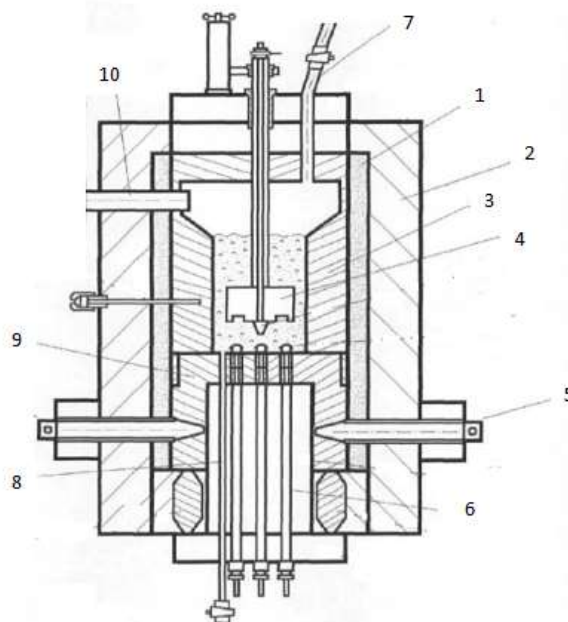


Рисунок 1.6. Піч з електротермічним киплячим шаром для піролізу вуглеводнів [25]: 1 - теплова ізоляція; 2 - корпус печі; 3 - робоча камера з вогнетривкого матеріалу; 4 - верхній електрод, 5 – підведення струму; 6 - підведення вуглеводнів; 7 - подача вуглецевого матеріалу в шар; вивантаження вуглецевого матеріалу з робочої камери; 9 - газорозподільна решітка - нижній електрод; 10 - видалення газу з робочої камери

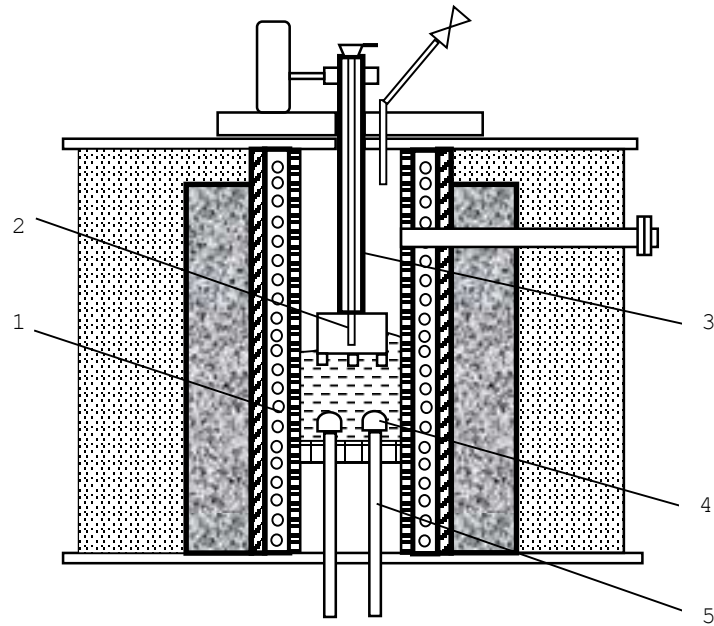


Рисунок 1.7. Піч ЕКШ для капсулювання кварцового піску піровуглецем [26]:
 1 - охоронний зовнішній нагрівач; 2,3 - верхній переміщуваний електрод; 4 - газорозподільна решітка - нижній електрод; 5 - підведення вуглеводневих газів

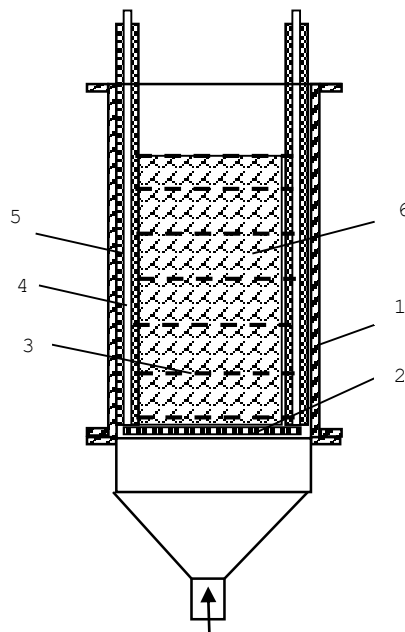


Рисунок 1.8. Піч з обмеженим електротермічним шаром [27]: 1 - корпус; 2 - газорозподільна решітка; 3 - електроди; 4 - струмопровідні стрижні; 5 - електроізоляційні втулки, 6 - вогнетривка насадка

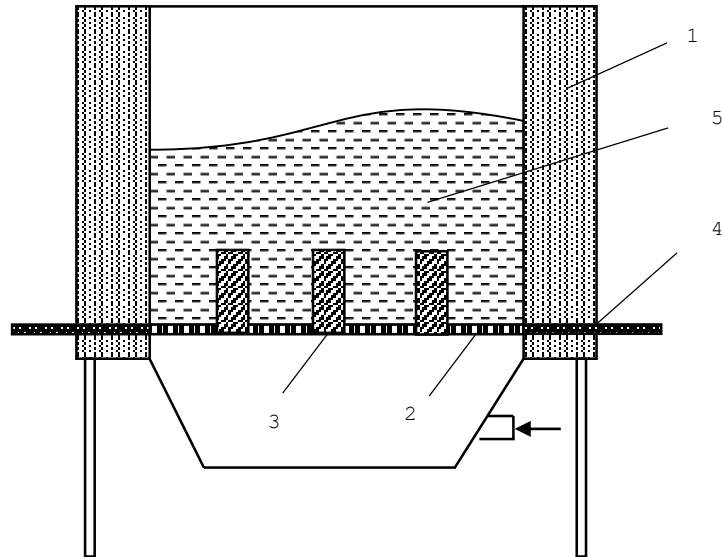


Рисунок 1.9. Піч з електротермічним киплячим шаром [28]: 1 - футеровка печі; 2 - секція газорозподільної решітки - електрод; 3 - вертикальна перегородка з діелектрика; 4 - підведення струму; 5 - киплячий шар

Високотемпературні» печі з ЕКШ мають конструкцію аналогічну до [11, 14, 16, 18, 24]: з центральним електродом і електропровідною робочою камерою, футеровка якої є другим електродом. Робоча камера виконується з графітових матеріалів, а у якості зріджуючого агента використовуються інертні гази: аргон або азот. Такі печі зазвичай працюють в потоковому режимі з постійним завантаженням сировини та вивантаженням обробленого матеріалу [29-32]. Типова конструкція високотемпературної печі представлена на рис. 1.10.

1.1.3 Геометрія робочого простору високотемпературних печей з ЕКШ

При розробці печей з ЕКШ необхідно вирішувати питання вибору конструктивних рішень для наступних елементів: робочої камери, електродів, газорозподільчої решітки, організації видалення готового матеріалу і завантаження сировини, видалення газів та охолодження готового продукту.

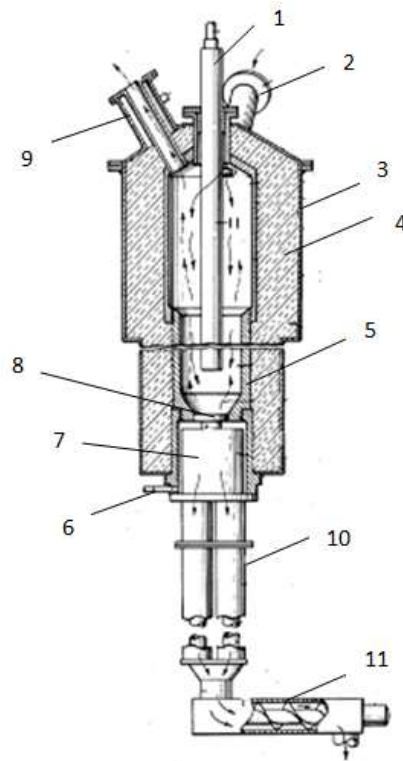


Рисунок 1.10. Високотемпературна піч для обробки вуглецевого матеріалу в ЕКШ [29]: 1 - центральний графітовий електрод, 2 - підведення сирого матеріалу в піч; 3 - корпус печі; 4 - теплова ізоляція, графітовий футерування робочої камери; 6 - підведення інертного газу; 7 - розподільна камера готового матеріалу; 8 - газорозподільна решітка; 9 - видалення відпрацьованих газів; 10 - холодильник готового матеріалу першого ступеня; 11 - шнековий холодильник готового матеріалу другого ступеня.

Умовно робочу камеру (рис. 1.11) можна поділити на декілька елементів, які визначають ефективність роботи печі: робочий простір печі, де розташовується киплячий шар з висотою $H_{\text{раб}}$ і діаметром $D_{\text{раб}}$; надшаровий сепараційні простір висотою $H_{\text{нс}}$ і діаметром $D_{\text{нс}}$; ділянка від електрода діаметром D_e до газорозподільної решітки $H_{\text{ре}}$.

Визначальними розмірами є розміри ЕКШ, в об'ємі якого відбувається тепловиділення: діаметр робочої зони $D_{\text{раб}}$, діаметр електрода D_e , висота робочої зони $H_{\text{раб}}$. Вибір цих параметрів визначається чергою характеристик, які мають бути узгоджені між собою: 1) продуктивність печі; 2) електричний опір киплячого шару, який визначає напругу і силу струму на електродах; 3) допустима щільність струму в електроді; 4) допустима щільність струму на поверхні електрода по висоті робочої зони; 5) рівномірність тепловиділення і

температурного поля в зазорі між центральним електродом і футеровкою печі;
 б) стійкість центрального електроду.

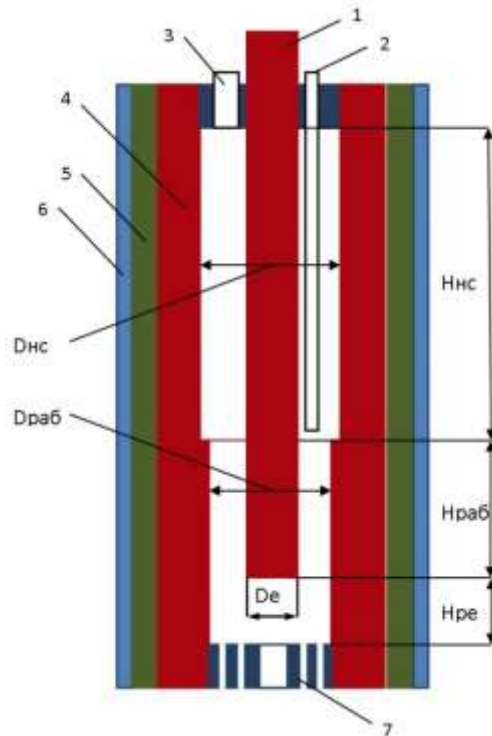


Рисунок.1.11. Схема робочого простору печі з ЕКШ: 1 - центральний електрод; 2 - підведення сировини в киплячий шар; 3 - видалення відпрацьованих газів; 4 - футеровка печі – електрод; 5 - теплова ізоляція; 6 - водоохолоджуваний корпус; 7 - газорозподільна решітка.

На основі математичного моделювання процесів нагрівання вуглецевого матеріалу в ЕКШ [31, 33] висота робочої зони печі рекомендована як 2-5 діаметрів центрального електроду $H_{раб} = (2-5) \times D_e$. В [29] висота робочої зони визначається діаметром робочої зони і рекомендована як $H_{раб} = (0,5-2) \times D_{раб}$.

Для вибору діаметра робочої зони авторами [33] рекомендована залежність зв'язує основні конструктивні та технологічні параметри роботи печі:

$$\frac{H_{раб}}{D_{екв}} = 0,088 \cdot \left[\frac{N \cdot \Omega}{U^2 \cdot V^{1/3}} \cdot \left(\frac{D_e}{V^{1/3}} \right)^{-0,65} \right]^{1,14}, \quad (1.1)$$

де $D_{екв}$ - еквівалентний діаметр робочої зони [33], м; N - електрична потужність

печі, кВт; Ω - питомий електричний опір киплячого шару, Ом·м; U - напруга між центральним і футеровкою, В; V - об'єм киплячого шару робочої зони, м³.

В роботі [34] автори з метою підвищення надійності роботи печі і підвищення стійкості електрода рекомендують співвідношення діаметрів внутрішнього і зовнішнього електродів що становить $D_e / D_{\text{раб}} = 0,55 \dots 0,66$. Саме таке співвідношення відповідає мінімальній напруженості електричного поля на поверхні центрального електрода та зменшує ймовірність утворення іскрових розрядів на його поверхні, характерних для електротермічного киплячого шару. Як відомо, саме іскрові розряди, в яких температура може досягати до 10000°C, призводять до підвищеної ерозії анодів і необхідності їх періодичної заміни. Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок екранування робочої поверхні анода насипним шаром матеріалу киплячого шару (рис. 1.4, 1.12) [26, 35]. Однак останній варіант може бути використаний тільки для «низькотемпературних» печей.

Вибір розмірів надшарового простору $H_{\text{нс}}$ і $D_{\text{нс}}$ визначається можливостями сепарації частинок, які викидаються з киплячого шару і зниження механічного їх виносу з печі. Величина діаметру надшарового простору, як правило, більше діаметру робочого простору печей (рис. 1.5, 1.6, 1.10), що дозволяє знизити швидкість газу і зменшити винесення матеріалу з печі [13, 14, 19, 25, 29, 30, 31]. В [29] рекомендовано висоту надшарового простору вибирати на 50% більшою за висоту киплячого шару ($H_{\text{раб}} + H_{\text{ре}}$). Однак в «низькотемпературних» печах діаметри робочої зони та надшарового простору можуть збігатися (рис.1.7, 1.8, 1.9) [13, 22, 23, 26]. Висота надшарового простору повинна мінімізувати винесення матеріалу і за рекомендаціями [36] має становити не менше 1 м для частинок діаметром 100-200 мкм.

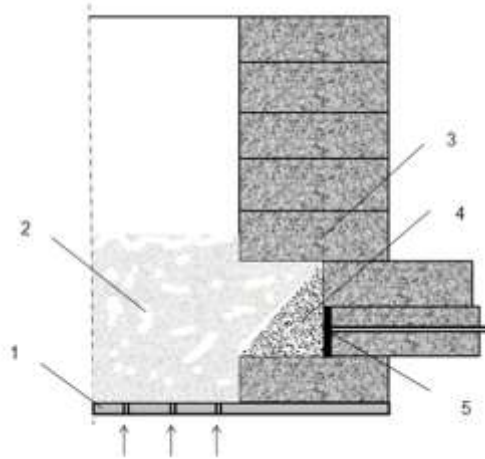


Рисунок 1.12 Схема екранування анода матеріалом киплячого шару: 1 - газорозподільча решітка; 2 - електротермічний киплячий шар; 3 - футеровка печі з діелектричного матеріалу; 4 - захисний шар матеріалу; 5 - електрод

Одним з важливих розмірів робочого простору печі є відстань від газорозподільної решітки до початку робочої зони печі (рис. 1.10). Величина цієї відстані повинна забезпечувати основне тепловиділення в радіальному зазорі між електродами і мінімізувати витік струму на решітку, що дозволяє управляти процесом за рахунок зміни глибини занурення центрального електрода. Автори [31] рекомендують величину H_{pe} не менше одного діаметру центрального електрода, що гарантує виділення не менше 90% теплової енергії в зазорі між футеровкою та центральним електродом.

1.1.4 Газорозподільні пристрої високотемпературних печей з ЕКШ

Конструкція газорозподільної решітки має забезпечувати рівномірний розподіл інертного газу у робочому просторі печі, інтенсивне перемішування матеріалу. Головна мета – забезпечення рівномірного температурного поля та відсутність застійних зон, в яких можливе скупчення необробленого матеріалу. Крім цього, решітка, як правило, має канал для вивантаження обробленого матеріалу з робочої камери. У практиці використовуються два види решіток плоскі з рівномірним [13, 19, 20, 22, 24-27] (рис. 1.3, 1.4, 1.6-1.9) і нерівномірним [29] (рис. 1.10) розподілом отворів для проходу газу, а також конусні решітки, які, у свою чергу, спрямовують рух матеріалу до отвору вивантаження [11, 14, 28, 30]. Решітки можуть бути провального [22, 23, 27, 29, 31] і непровального

[11, 19, 20, 25,26, 28, 30] типів, в тому числі і ковпачкові (рис. 1.6, 1.7).

Конусна провальна решітка (рис. 1.13) [14] з рівномірним розподілом отворів для підведення газу та центральним розвантажувальним каналом має кут $5-10^\circ$, який забезпечує сходження матеріалу до центрального отвору для вивантаження.

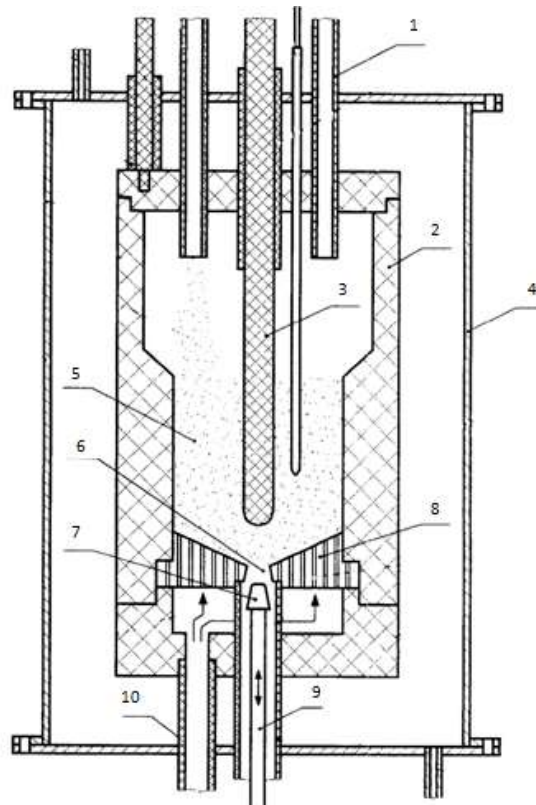


Рисунок 1.13. Схема печі з електротермічним киплячим шаром для отримання карбіду кремнію [14]: 1 - підведення сировини; 2 - графітова футеровка; 3 - центральний електрод; 4 - корпус печі; 5 - електротермічний киплячий шар; 6 - розвантажувальний отвір; 7, 9 - конусна штанга для регулювання розвантаження готового матеріалу; 8 - газорозподільча решітка; 10 - підведення інертного газу.

Дизайн непровальної решітки авторів [28] являє собою ступінчасту конструкцію з графітових кілець (рис. 1.14), між якими організовано підведення газу в шар, при цьому кільця електрично розв'язані між собою. Це дозволяє керувати напругою, яка подається на них, і таким чином управляти розподілом джерел теплоти в вертикальному киплячому шарі. При цьому

можлива організація подачі газу тангенціально (рис. 1.15), що забезпечує обертальний рух шару і забезпечує поліпшення перемішування матеріалу.

Заслуговує на увагу технічне рішення з використання конусних решіток з нерівномірним розподілом отворів по висоті [11, 29] (рис. 1.5, 1.16). Підведення газу здійснюється в верхньої частини конусної решітки через один ряд сопел. В [29] центральний кут конусної решітки рекомендується вибирати в діапазоні $40-60^\circ$, а висота розташування сопел має становити $0,50-0,75$ висоти конуса. Таке рішення забезпечує роботу киплячого шару із заданою циркуляцією матеріалу в робочій камері аналогічно роботі апаратів з фонтануючим шаром: підйом матеріалу у центрального електрода і його сходження у бічної футеровки. Відповідна схема забезпечує повну обробку всього матеріалу і гарантоване його перемішування.

Аналогічно до конструкції [28] автори печі [29] передбачили можливість тангенціального введення газових струменів в робочий простір печі з метою забезпечення вихрового руху шару (рис. 17). При цьому сопла утворюють кут до дотичній рівний $\beta = 10-20^\circ$, а сумарна площа сопел становить $0,15-0,50$ площі перерізу робочої зони печі з діаметром $D_{\text{роб}}$.

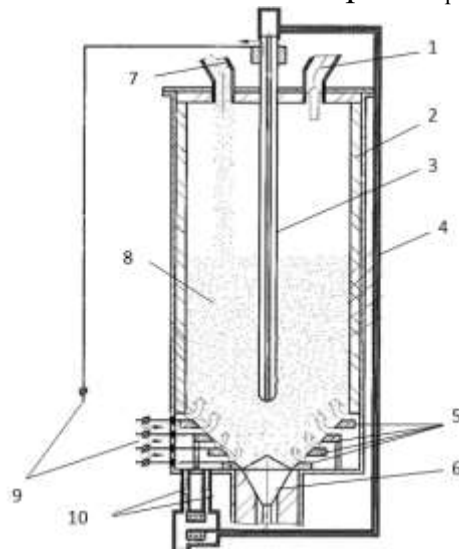


Рисунок 1.14 Піч з електротермічним киплячим шаром [28]: 1 - патрубок видалення відпрацьованих газів; 2 - футерований корпус печі; 3 - центральний електрод; 4 - підведення газу до центрального електрода; 5 - графітові кільця, що утворюють непровальну решітку; 6 - канал для видалення обробленого матеріалу; 7 - патрубок завантаження сировини; 8 - електротермічний киплячий шар; 9 - підведення електроенергії; 10 - подача інертного газу

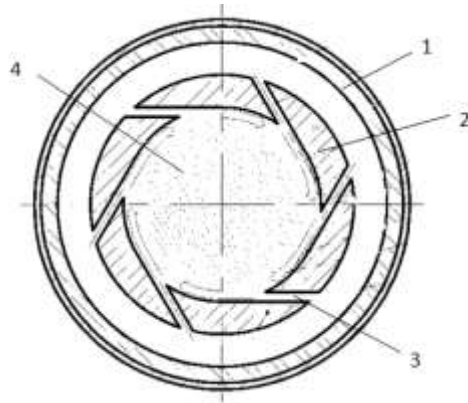


Рисунок 1. 15 Схема газорозподільної решітки з тангенціальним підведенням інертного газу [28]: 1 - футерований корпус; 2 - графітове кільце; 3 - тангенціальний канал для підведення інертного газу; 4 - електротермічний киплячий шар

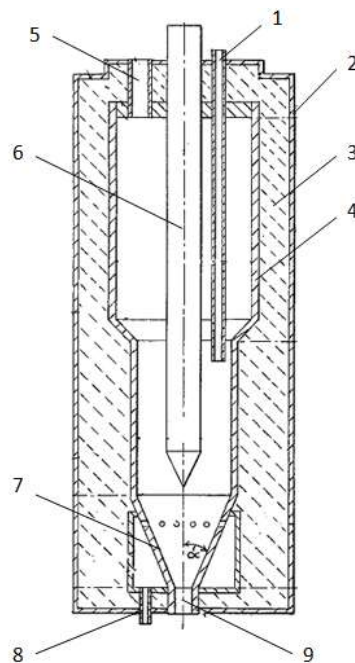


Рисунок 1.16 Піч з ЕКШ для обробки вуглецевого матеріалу [29]: 1 - патрубок для завантаження сировини; 2 - корпус печі; 3 - теплова ізоляція; 4 - графітова футеровка – електрод; 5 - патрубок відводу відпрацьованих газів; 6 - центральний електрод; 7 - конусна газорозподільна решітка; 8 - підведення інертного газу; 9 - патрубок вивантаження готової продукції.

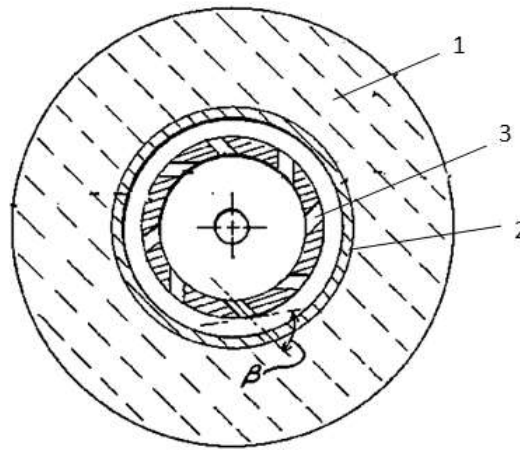


Рисунок 1.17 Схема тангенціального підведення газу через конусну решітку [29]: 1 - теплова ізоляція; 2 - газорозподільча камера; 3 - конусна газорозподільча решітка з соплами для подачі інертного газу

Цікавим є технічне рішення [33] щодо подачі інертного газу в киплячий шар, характерне для фурменної продувки розплавів в металургійних агрегатах (рис. 18). Розподільча решітка поєднана з центральним електродом, через який подається інертний газ і розподіляється в шарі через сопла у нижній частині електрода. Такий варіант спрощує конструкцію нижньої частини печі і дозволяє організувати циркуляційний рух матеріалу в робочій зоні аналогічно до [25], а так само дозволяє виключити операцію заміни решітки при виході її з ладу, яка вимагає повного охолодження печі. Крім цього інертний газ охолоджує електрод і нагрівається перед подачею в шар.

Аналогічне рішення використано і в роботі [30] (рис.19), де запропоновано розігрівати реагент в каналах центрального електрода і одночасно підвищити його стійкість. Відмінність від [32] полягає в тому, що розігрітий газ подають у робочий простір через кільцеву газорозподільну решітку.

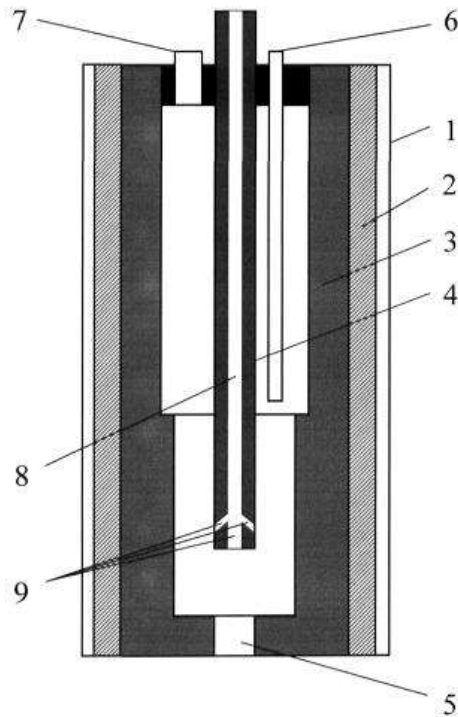


Рисунок 1.18. Електротермічна піч з киплячим шаром для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів [32]: 1 - корпус печі; 2 - теплова ізоляція; 3 - графітова футеровка; 4 - центральний електрод; 5 - випускна труба для обробленого матеріалу; 6 - труба для завантаження сировини; 7 - газохід для видалення газів, що відходять; 8 - вертикальний канал для подачі інертного газу; 9 - сопла для подачі інертного газу в шар

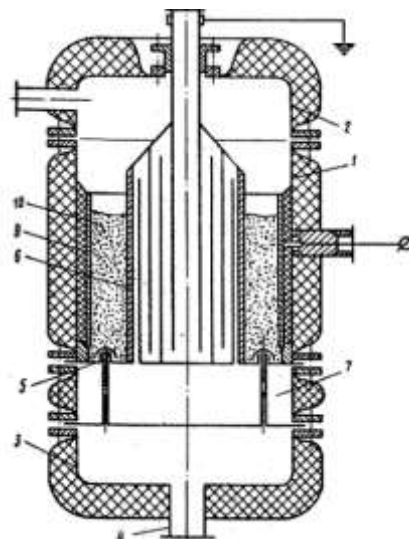


Рисунок 1.19 Схема реактора синтезу з ЕКШ [34]: 1 - корпус; 2 - кришка; 3 - днище; 4 - патрубок подачі легкого компонента; 5 - газорозподільча решітка; 6 - центральний електрод; 7 - під решітчастий простір; 8 - патрубок для подачі важколеткого компонента; 9 - зовнішній електрод; 10 - реакційний простір

Попередній розігрів інертного газу перед подачею в ЕКШ дозволяє вирішити кілька завдань одночасно: зменшити витрату інертного газу, знизити теплові втрати, пов'язані з його нагріванням і забезпечити підтримку рівномірної швидкості газу по висоті печі, що забезпечує підтримку певного гідравлічного режиму киплячого шару. Особливо це важливо для високотемпературних печей. Подібне рішення авторів [29] полягає в організації подачі інертного газу через кільцевий канал, в якому відбувається попереднє нагрівання газу (рис. 1.20).

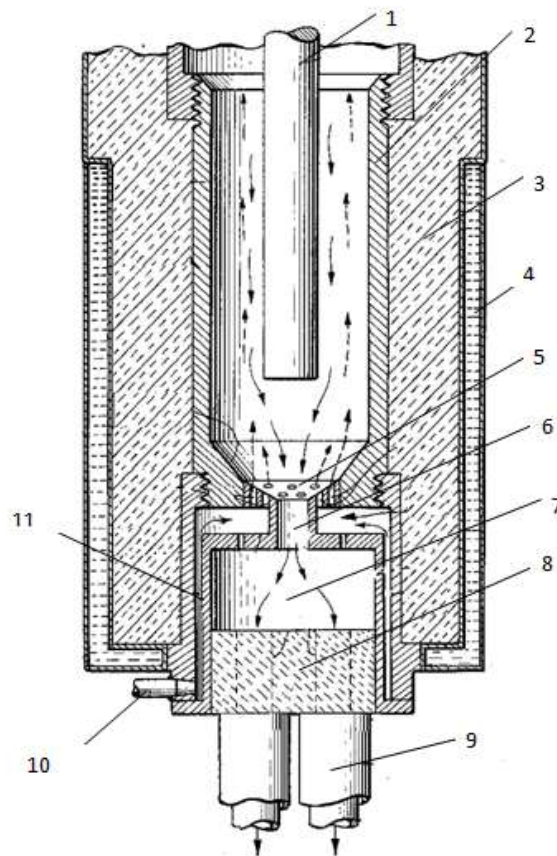


Рисунок 1.20 Високотемпературна піч для обробки вуглецевого матеріалу в ЕКШ [29]: 1 - центральний графітовий електрод; 2 - графітова футерування робочої камери; 3 - теплова ізоляція; 4 - водоохолоджуваний корпус печі; 5 - газорозподільна решітка; 6 - канал для вивантаження готового продукту; 7 - розподільна камера готового матеріалу; 9 - холодильник готового матеріалу першої ступені; 10 - підведення інертного газу; 11 - кільцевий канал для подачі інертного газу

1.1.5 Організація руху матеріалу у печах з ЕКШ

Більшість з розглянутих конструкцій печей – агрегати безперервної дії, в яких реалізований потоковий процес обробки матеріалу [11, 13, 14, 20, 21, 25-32, 36], що вимагає постійного завантаження сировини і вивантаження готового продукту. Подача сировини в піч традиційно здійснюється через окремий канал у верхній кришці. Водночас матеріал потрапляє в робочий простір під дією сили тяжіння [11, 13, 14, 25, 26, 28, 29] (рис.1.5, 1.6, 1.7, 1.10, 1.12, 1.11, 1.13, 1.15), а у верхній частині організовано відведення відпрацьованих газів.

Отже, частки і газ рухаються в протитоці, що може викликати винесення необроблених частинок матеріалу разом з газами. Для усунення цього недоліку авторами [29, 31, 36] запропонована подача сировини через трубу безпосередньо в киплячий шар або на його поверхню (рис.1.16, 1.18). В роботі [24] (рис. 1.4) подачу сировини в киплячий шар здійснюють через електроди, що суттєво спрощує печі.

У більшості конструкцій печей безперервної дії вивантаження здійснюється через канал у газорозподільчій решітці, в якому він рухається в щільному шарі за рахунок сили тяжіння.

1.1.6 Охолодження готового продукту

Після вивантаження обробленого матеріалу з робочої камери печі він спрямовується в холодильник, при цьому утворюється щільний шар матеріалу, який виконує функцію гідравлічного затвору та перешкоджає руху газів з робочого простору через холодильник (рис. 1.20).

В [29] передбачена розподільна камера, в якій відбувається усереднення матеріалу, розподіл його між холодильниками, а так само витримка при високих температурах, що забезпечує обробку частинок які транзитом пройшли через киплячий шар. Рух матеріалу в холодильнику визначається або живильниками (рис. 1.10) або затворами різних типів [13] (рис. 1.21).

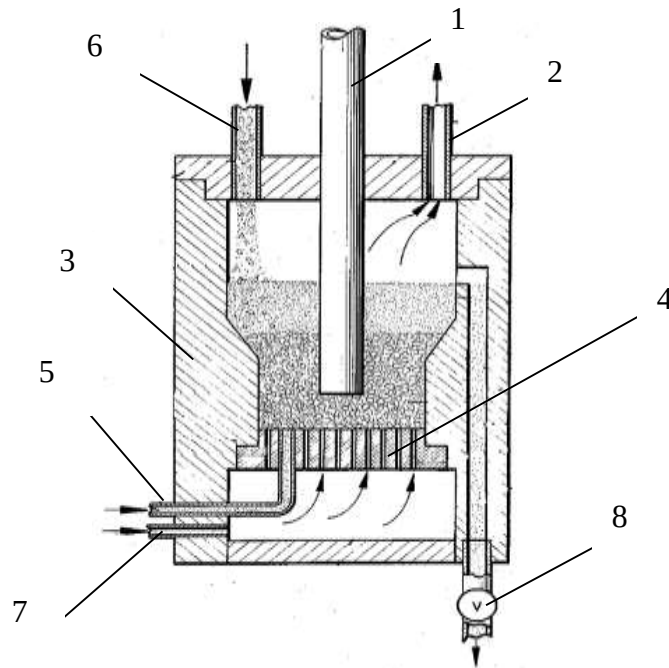


Рисунок 1.21 Електротермічна піч для виробництва карбідів [13]: 1 - центральний електрод; 2 - патрубок для видалення відпрацьованих газів; 3 - футеровка печі; 4 - газорозподільна решітка; 5, 6 - подача сировини; 7 - подача інертного газу; 8 - затвор розвантаження готової продукції

Вимоги до охолодження готового продукту з печі визначаються видом самого продукту та температурою його обробки. Наразі охолодження вуглецевих матеріалів передбачає охолодження до температури 250-300°C, що унеможливило його займання при контакті з повітрям. Крім того важливим фактором, який забезпечує якість отриманої продукції, є потрапляння матеріалу холодильника у готовий продукт при абразивному впливі часток вуглецю при контакті з охолоджуючими поверхнями. Особливо це стосується отримання високо чистого графіту для літій-іонних акумуляторів.

Отже, при безперервній роботі печі, холодильник повинен забезпечити охолодження готового продукту у щільному рухомому шарі, що забезпечує герметичність робочого простору печі або мати першу ступень охолодження з використанням саме рухомого щільного шару.

Відомі конструкції таких теплообмінників для охолодження сипучого матеріалу [29,37-40], які мають різні форми теплообмінних каналів (труби,

пластини). Як правило, кількість каналів перевищує один, що вимагає рівномірного розподілу матеріалу між каналами, який залежить від умов його підведення та вивантаження.

Особливістю таких холодильників за відсутності перемішування матеріалу є те, що основним визначальним процесом, відповідальним за ефективність, є теплопровідність у щільному шарі. Це обумовлює збільшення довжини холодильника та відповідно капітальних витрат на його виготовлення. Тому часто використовують дво- чи багато ступеневі холодильники, які на останніх стадіях використовують можливість перемішування матеріалу, тим самим інтенсифікуючи теплообмін. Поширеним є застосування поперекового обтікання теплообмінних елементів що встановлені у шаховому порядку [42-48] (рис. 1.22).

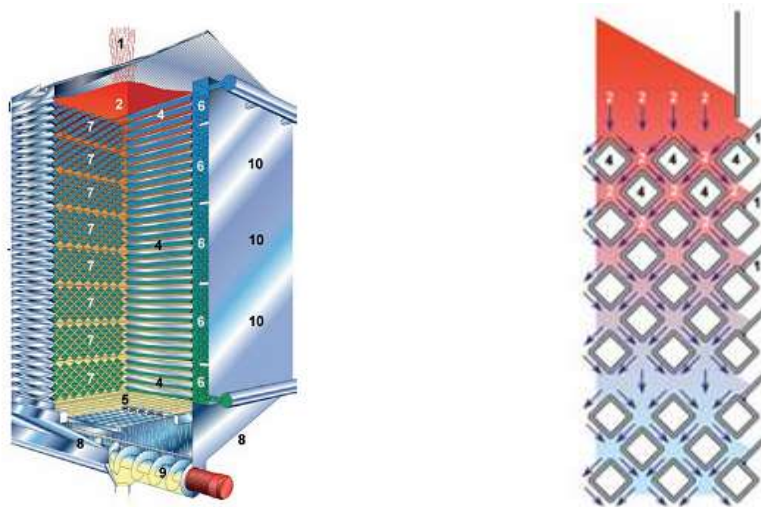


Рисунок 1.22 Схема рекуперативного холодильника фірми Grenzebach BSH GmbH [46]

Альтернативою проточним теплообмінникам, де рух матеріалу відбувається за рахунок сили тяжіння, є холодильники барабанного типу та шнекові. Слід відзначити, що здійснення таких процесів при безпосередньому контакті оброблюваного матеріалу з охолоджуючим середовищем, наприклад, у традиційних холодильниках барабанного типу [49] ускладнено в зв'язку зі

значним винесенням матеріалу. Шнекові конвеєри з водяним охолодженням - це теплообмінники непрямої дії, в яких теплообмін відбувається на поверхні корпусу, валу, лопатей. Вони використовуються для транспортування матеріалів, які необхідно охолоджувати від температури 1000°C або вище до температур, як правило, < 200°C. Це може бути транспортування котельних шлаків, охолодження продукту після термічної обробки (наприклад, коксу або вапняку) [50-53]. Шнекові холодильники можуть бути використані як фінішні холодильники [29].

1.1.7 Очищення та охолодження відхідних газів.

Одним з важливих елементів високотемпературної печі ЕКШ для обробки вуглецевих матеріалів є система охолодження та очищення відхідних газів, яка забезпечує екологічні показники процесу. Водночас ця система може значно підвищити капітальні та експлуатаційні витрати.

Відхідні гази від печей ЕКШ повинні мати високу температуру, що гарантує евакуацію хімічних речовин та виключає їх конденсацію у робочому просторі печі. Крім возгонів та пилу, в залежності від складу сировини, вони можуть включати водень, що обумовлює необхідність їх допалення. Особливу увагу приділяють викидам оксидів сірки, що утворюються при допалюванні у випадку використання сировини з великим її вмістом (наприклад, нафтових коксів).

Враховуючи ці особливості відомі системи охолодження та очищення відхідних газів включають [21]: допалювач атмосферного типу, що одночасно виконує функцію розбавлення продуктів згоряння атмосферним повітрям з метою зниження їх температури; двоступеневу систему очистки від пилу (водоохолоджуваний циклон та високотемпературні фільтри); скруббер для очищення відхідних газів від оксидів сірки. Така система обумовлює значне підвищення об'єму відхідних газів та ускладнює використання їх теплового потенціалу. Вирішення останнього ґрунтується на використанні котла утилізатора, який дозволяє отримати теплову енергію у вигляді пари [21] чи

гарячої води [54]. Принципова схема очищення та утилізації теплоти з використанням котла утилізатора наведена у додатку А.

В табл. 1.1 наведено данні щодо характеристики відхідних газів при термічній обробці зеленого нафтового коксу з врахуванням допалення відхідних газів [21], та їх розбавлення повітрям до температури 800°C.

Таблиця 1.1 Характеристика відхідних газів на виході з печі ЕПШ при термічній обробці нафтового коксу при температурі 1500°C [21]

Склад відхідних газів, % по масі							Питомі витрати відхідних газів, кг/кг сировини	Питомі витрати продукти згоряння, кг/кг сировини	Питомі витрати розбавлених продуктів згоряння кг/кг сировини
N2	A	C	CH4	CO	H2	S2			
39.8	0.08	35.5	0.09	3.14	9.53	11.8	0.149	1.162	2.205

Отже, витрати при допалюванні відхідних газів призводять до підвищення витрат майже у 8 разів, при цьому кількість продуктів згоряння, що отримуються за рахунок спалення твердих часток вуглецю винесених з киплячого шару складає 65% від загальних витрат. Розбавлення продуктів згоряння додатково приводить до збільшення витрат відхідних газів майже у 15 разів у порівнянні з витратами газу від допалення. Відповідно зростають капітальні та експлуатаційні витрати системи охолодження та очищення відхідних газів. Крім того, підвищується необхідність використання додаткового теплового потенціалу відхідних газів , що отримується за рахунок спалення горючих продуктів, що входять у склад відхідних газів. Це в свою чергу теж приводить до підвищення капітальних та експлуатаційних витрат.

1.2 Особливості експлуатації печей з ЕКШ для термічної обробки вуглецевих матеріалів та визначення шляхів підвищення ефективності та надійності їх роботи

1.2.1 Особливості вибору гідродинамічного режиму роботи печей ЕШП

Особливістю печей з ЕШП є те, що теплова енергія виділяється за рахунок проходження електричного струму через киплячий шар з електропровідними частками. Механізм протікання електричного струму найчастіше пов'язують з двома механізмами [55, 56]: ланцюжки провідності з електропровідних часток та іонною провідністю, що обумовлена іонізацією газу.

Геометричні розміри і конструкція печі для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів обумовлюють нерівномірність тепловиділення у киплячому шарі, яке має компенсуватися інтенсивним перемішуванням часток та забезпечити однорідність температур у робочому просторі печі. Отже, гідродинамічний режим псевдозрідженого шару повинен забезпечити перемішування як у робочій зоні печі $H_{\text{раб}}$ (рис. 1.11) так і в піделектродному просторі. Крім того, цей режим повинен забезпечити необхідні показники опору у електротермічному киплячому шарі. Визначення цих режимів є однією з основних завдань при розробці печей ЕПШ.

1.2.2 Напрями підвищення ефективності та надійності роботи печей з ЕКШ.

Аналіз структури собівартості термічної високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів (рис. 1.23) показує, що основним напрямком підвищення ефективності процесу в ЕКШ є підвищення виходу годного продукту, що забезпечить зниження витрат на сировину. Отже, підвищення якості готового продукту, пов'язане з його охолодженням після обробки і зменшенням його забруднення, є актуальним завданням. Одночасно це

повинно вирішуватися з урахуванням зниження капітальних витрат.

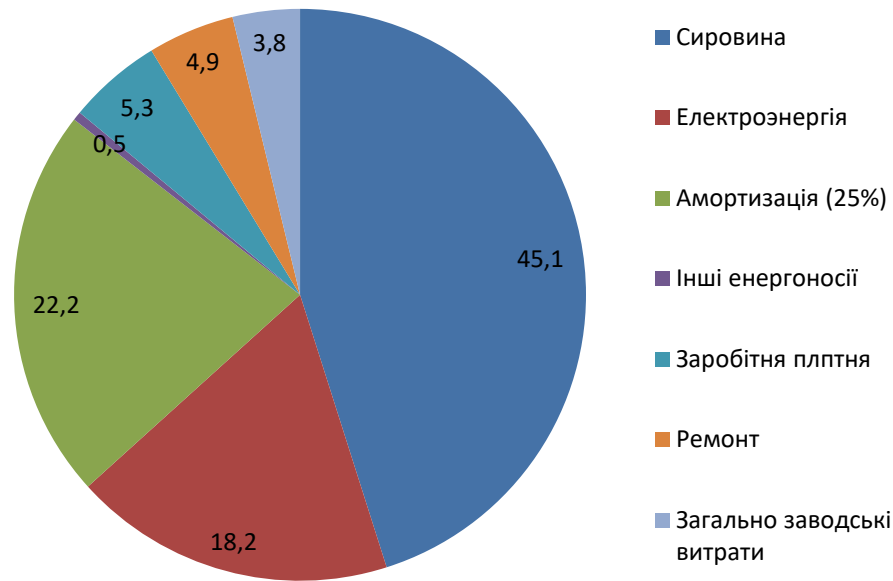


Рисунок 1.23 Типова структура собівартості термічної обробки вуглецевих матеріалів у ЕКШ.

Другим шляхом, який дозволяє зменшити собівартість використання високотемпературних технологій ЕКШ є зменшення витрат на очищення та охолодження відхідних газів. Задача досягається за рахунок наступного: зменшення викидів відхідних газів на основі якісної підготовки сировини; оптимізація системи очищення та охолодження відхідних газів, яка дозволить зменшити витрати та тепловий потенціал відхідних газів.

1.2.3 Розробка та перевірка основних конструктивних рішень та режимних параметрів печей ЕШП для термічної обробки вуглецевих матеріалів на основі пілотної установки.

Наявний досвід створення високотемпературних печей для термічної обробки вуглецевих матеріалів стосується малих лабораторних установок [56, 57, 58]. Єдина промислова піч експлуатується на виробництві Superior Graphite, але даних про її конструкцію та результати експлуатації у літературі відсутні. Тому актуальним є завдання створення та дослідження пілотної установки з піччю ЕПШ продуктивністю 10 кг/год.

Висновки до розділу 1:

1. На основі аналізу конструкцій печей з електротермічним киплячим шаром запропоновано їх класифікацію на низькотемпературні 1000-1600°C та високотемпературні – до 3000°C. Переважна більшість технологічних процесів відноситься саме до низькотемпературних, зокрема, пряме відновлення заліза; отримання карбідів титану, кремнію та цирконію; парова газифікація коксу; термічна обробка металевих виробів; синтез хлориду цирконію; отримання водню піролізом вуглеводнів; капсулювання кварцового піску піровуглецем; прожарювання зеленого нафтового коксу.

Натомість високотемпературні печі можуть застосовуватись здебільшого для вузьких технологічних задач, таких як графітизація та термічне рафінування вуглецевих матеріалів.

За напрямом руху електричного струму печі можуть бути поділені на установки: з горизонтальним рухом (поперек шару) та вертикальним рухом (у вертикальній площині). У високотемпературних печах реалізовано переважно горизонтальний рух струму.

2. Узагальнено рекомендації щодо вибору розмірів робочої камери печей з електротермічним киплячим шаром. В тому числі діаметр і висота робочої зони, розміри надшарового простору, відстань між електродами і газорозподільчою решіткою.

Визначено основні варіанти організації поточного процесу з безперервним завантаженням сировини та вивантаженням обробленого матеріалу. Основною особливістю цих вузлів є можливість подачі сировини безпосередньо у киплячий шар, а система вивантаження повинна вирішувати крім основного завдання функцію гідравлічного затвору та перешкоджає руху газів з робочого простору.

3. Визначено вимоги щодо системи охолодження готового продукту з урахуванням можливостей засмічення чистих вуглецевих матеріалів а процесі руху у холодильниках різних систем.

Проведено аналіз конструктивних та режимних параметрів роботи систем охолодження та очищення відхідних газів з печей ЕШП. Доведено, що витрати відхідних газів при їх допалюванні призводять до підвищення витрат майже у 8 разів, при цьому кількість продуктів згоряння що отримуються за рахунок спалення твердих часток вуглецю винесених з киплячого шару складає 65% від загальних витрат. Розбавлення продуктів згоряння додатково приводить до збільшення витрат відхідних газів майже у 15 разів у порівнянні витратами газу до допалення.

4. На основі аналізу конструктивних особливосте печей з ЕШП для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів і структури собівартості такої обробки були сформульовані завдання дослідження, а саме:

- розробка класифікації печей з електротермічним киплячим шаром за конструктивним та технологічним параметрам;
- дослідження та розробка гідродинамічних режимів роботи високотемпературних печей ЕПШ;
- створення та дослідження пілотної установки з піччю ЕПШ продуктивністю 10 кг/год;
- дослідження та розробка ефективних систем охолодження готового продукту печей ЕШП;
- дослідження та розробка ефективних систем очищення та охолодження відхідних газів від печей з ЕКШ для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ГІДРОДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПЕЧЕЙ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ

2.1 Методика досліджень гідродинамічних режимів роботи печей з електротермічним киплячим шаром

Дослідження гідродинамічних режимів печей з ЕКШ проводилося на холодній моделі (рис.2.1), яка відповідала геометричним розмірам печі продуктивністю 10 кг/год з урахуванням розташування центрального електроду [58, 59].

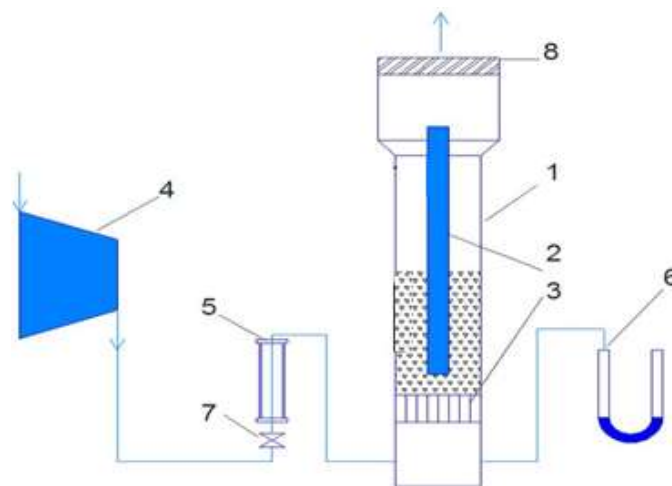


Рисунок 2.1 Схема холодної моделі печі з електротермічним киплячим шаром: 1- робоча камера (Ø105 мм); 2 – модель центрального електроду (Ø50мм); 3 – перфорована газорозподільна решітка; 4 – газодувка; 5 – ротаметр; 6 – вузол вимірювання тиску, 7 – регулюючий вентиль, 8 – фільтр.

Холодна модель печі представляла собою вертикальну скляну трубу 1 внутрішнім діаметром 105 мм і висотою 1000 мм. В нижній частині труби закріплена горизонтальна перфорована газорозподільна решітка 3 (рис. 2.2). Загальна площа отворів у решітці складала менш 2% від площі перетину труби. На відстані 100 мм від решітки розташовувалась труба 2 діаметром Ø50 мм,

яка імітувала центральний електрод. В якості матеріалу для дослідження використано природній графіт марки ГТ-1 Заваллівського родовища та антрацит, характеристики яких наведено у таблиці (табл. 2.1).

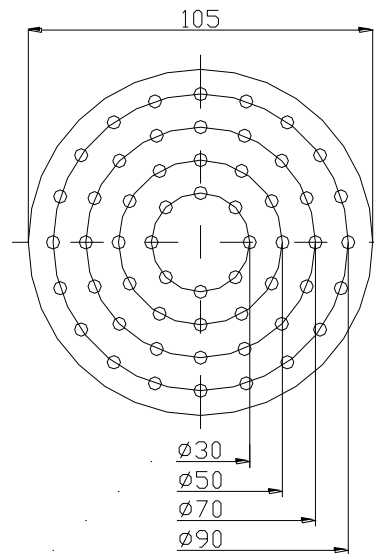


Рисунок. 2.2 Ескіз перфорованої розподільчої решітки (кількість отворів - 56 шт., діаметр - Ø2 мм)

Середній еквівалентний діаметр часток у киплячому шарі розраховано відповідно до залежності [60-62]

$$d_e = \sum_{i=1}^n x_i * d_i, \quad (2.1)$$

де x_i – масова доля часток діаметром d_i .

У розрахунках еквівалентного діаметру враховано коефіцієнти форми відповідно до рекомендацій [60, 62]. В таблиці 2.1 наведено розрахункову швидкість початку псевдозрідження v_{mf} отримана по залежності Уэн та Ю [63]:

$$v_{mf} = (33.71^2 + 0,0408 * Ar)^{0.5} - 33.7 \quad 2.2$$

$$\text{де } Ar = \frac{g * d_{eff}^3 * (\rho_s - \rho_g)}{v_g * \rho_g}$$

Таблиця 2.1 Характеристика гранулометричного стану графіту ГТ-1 та антрацит, що використано при експериментальних дослідженнях

№ Зразка	Вид матеріалу	Розмір фракцій, мм	Еквівалентний діаметр, мм	Швидкість початку псевдозрідження, v_{mf} , м/с
1	антрацит	0,8-2,0	0,93	0,36
2	антрацит	2,0-5,0	3,7	1,1
3	антрацит	4,0-8,0	5,3	1,39
4	графіт ГТ-1	0,1-0,4	0,25	0,045

В ході досліджень вимірювалися такі параметри:

- витрата повітря ротаметрами РМ - 6,3 ГУЗ, РМ – 10 ГУЗ, РМ- 63 ГУЗ з похибкою вимірювання $\pm 2,5\%$;
- тиск під газорозподільною решіткою за допомогою U – подібного манометру з похибкою вимірювання ± 2 мм в. ст.;
- висота киплячого шару та висота нерухомого шару.

Критерієм ефективності аеродинамічного режиму було інтенсивне перемішування матеріалу в киплячому шарі та відсутність щільного шару на решітці, що спостерігалось візуально. Відомі залежності щодо якості псевдозрідження та розрахунків швидкості перемішування [62, 64], ефективних коефіцієнтів дифузії та температуропровідності можуть бути застосовані виключно до апаратів з незмінною формою робочого простору, і, отже, не можуть бути використані у розглянутому варіанті. Тому для оцінки якості псевдозрідження було використано порозність ϵ .

2.2 Результати досліджень гідродинамічного режиму роботи печей з електротермічним киплячим шаром

Узагальнені результати експериментальних досліджень на холодній моделі представлені в таблицях 2.2 – 2.5.

Таблиця 2.2 Результати досліджень гідродинамічних режимів на фракції антрациту 0,8-2 мм

№	Витрата повітря, м ³ /год	Надлишковий тиск під решіткою, мм в. ст.	Висота нерухомої частини шару, мм	Мінімальна висота псевдозрідженого шару, мм	Максимальна висота псевдозрідженого шару, мм	Швидкість у робочій зоні, м/с	Швидкість у піделеєктродній зоні, м/с	Порозність	Примітка
1	0,0	0	375	375	375	0,00	0,00	0,40	нерухомий шар
2	5,2	150	375	375	375	0,21	0,10	0,40	нерухомий шар
3	8,9	245	375	375	375	0,35	0,21	0,40	нерухомий шар
4	11,8	230	390	390	410	0,47	0,26	0,44	рух окремих часток над нерухомим шаром
5	13,8	300	380	380	400	0,54	0,30	0,42	початок псевдозрідження та поступове завмирання
6	15,3	305	300	390	415	0,60	0,31	0,44	повільне ворухіння
7	16,2	310	130	400	450	0,64	0,34	0,47	малі бульбашки, кипіння в електродній частині
8	23,0	250-370	10-20	480	600	0,90	0,46	0,58	великі бульбашки, інтенсивне перемішування
9	29,1	270-400	10-15	500	700	1,14	1,03	0,63	великі бульбашки, інтенсивне перемішування
10	41,1	270-400	10	500	1000	1,62	1,28	0,70	великі бульбашки, інтенсивне перемішування

Таблиця 2.3 Результати досліджень гідродинамічних режимів на фракції антрациту 2-5 мм

№	Витрата повітря, м ³ /г	Надлишок тиск під решіткою, мм в. ст.	Висота нерухомої частини шару, мм	Мінімальна висота псевдозрідженого шару, мм	Максимальна висота псевдозрідженого шару, мм	Швидкість у робочій зоні, м/с	Швидкість у піделектродній зоні, м/с	Порозн осіть	Примітка
1	10.5	310	380	-	-	0.41	0.34	0,42	нерухомий шар
2	12.6	390	380	-	-	0.50	0.40	0,42	нерухомий шар
3	24	370	460	460	460	0.94	1.03	0,50	ворушіння на поверхні
4	27	380-390	110	500	520	1.06	1.16	0,55	початок псевдозрідження
6	30	400-500	10-50	500	750	1.18	1.41	0,64	несиметричність нерухомої частини, інтенсивне перемішування в електродній зоні
7	32	400-550	0	550	900	1.26	1.64	0,69	інтенсивне перемішування

Таблиця 2.4 Результати досліджень гідродинамічних режимів на фракції антрациту 4-8 мм

№	Витрата повітря, м ³ /г	Надлишок тиск під решіткою, мм в. ст.	Висота нерухомої частини шару, мм	Мінімальна висота псевдозрідженого шару, мм	Максимальна висота псевдозрідженого шару, мм	Швидкість у робочій зоні, м/с	Швидкість у піделектродній зоні, м/с	Порозність	Примітка
1	0,0	0	375	-	-	0,00	0.00	0,42	нерухомий шар
2	33,0	260	385	-	-	1,30	1.06	0,42	рух окремих часток над нерухомим шаром
3	41,0	310	130-150	400	420	1,61	1.32	0,45	повільне ворухіння часток
4	43,5	320	90	420	470	1,71	1.40	0,49	кипіння в електродній зоні, сходження матеріалу по периферії
5	44,5	310-390	30	400	600	1,75	1.43	0,55	інтенсивне перемішування
6	56,0	320-420	20	400	750	2,20	1.80	0,61	інтенсивне перемішування

Таблиця 2.5 Результати досліджень гідродинамічних режимів на фракції природного графіту ГТ-1 0,2-0,3мм

№	Витрата повітря, м ³ /г	Надлишковий тиск під решіткою, мм в. ст.	Висота нерухомої частини шару, мм	Швидкість у робочій зоні, м/с	Швидкість у піделектродній зоні, м/с	Порозність	Примітка
1	0,0	0	195	0,00	0,00	0,4	нерухомий шар
2	1,12	67	210	0,04	0,036	0,42	нерухомий шар, фонтануюче кипіння верхнього шару
3	1,39	70	210	0,05	0,045	0,44	нерухомий шар, фонтануюче кипіння верхнього шару висота фонтанів 170мм
4	2,38	75	50	0,08	0,076	0,59	Кипіння в верхній частини шару
5	3,19	80	20	0,11	0,102	0,63	Кипіння в електродній частині
6	3,5	85	10	0,12	0,112	0,65	Інтенсивне перемішування
7	5,55	92	0	0,20	0,178	0,68	Інтенсивне перемішування
8	6,74	95	0	0,24	0,216	0,71	Інтенсивне перемішування

Відмінною ознакою псевдозрідження антрациту є утворення бульбашкового режиму кипіння. В залежності від співвідношення розміру фракцій матеріалу та швидкості газу порядок діаметру бульбашок дорівнює розміру відстані між електродами. На всіх видах матеріалів можна виділити наступні характерні газодинамічні режими:

- а) щільний шар матеріалу;
- б) нерухомий шар - частки матеріалу нерухомі, але спостерігається незначне розушцілення, збільшення висоти нерухомого шару на 5-10%;
- в) перехідний режим – починають кипіти так звані «легкі» (дрібні) фракції. Весь шар матеріалу поділяється на дві виражені частини: нерухома, яка складається з крупних часток та розміщується на розподільчій решітці; рухома, яка складається з більш дрібних часток та знаходиться у бульбашковому режимі кипіння.

г) режим малоінтенсивного кипіння. В цьому режимі «кипить» матеріал уздовж центрального «електроду». Матеріал у піделектродній зоні (на відстані від решітки до електроду – 100 мм) практично нерухомий. При цьому кипіння можна охарактеризувати як в'яле. Матеріал в нижній частині «електроду» повільно сходить униз по периферійних стінках печі.

д) режим інтенсивного кипіння. Висота псевдозрідженого шару в 1,5-2 рази більше відносно нерухомого. У циркуляції задіяний практично весь матеріал. Амплітуда кипіння шару складає близько 25-40%. Частота пульсації верхньої межі шару 1-2 Гц. Такий режим характеризується інтенсивним перемішуванням. Витрата повітря та гідравлічний опір шару нестабільний. Режим є ефективним з точки зору рівномірного розподілу температур в об'ємі робочої зони. Але необхідно зауважити, що з частотою 1-2 Гц може змінюватись електричний опір в робочій зоні. Тобто електрична потужність печі та величина струму будуть змінюватися з цією ж частотою.

Ці режими якісно представлені на рис. 2.3; а на рис. 2.4 – аеродинамічна характеристика киплячого шару антрациту діаметром 0,8-2 мм, на якій відображені характерні режими існування шару.

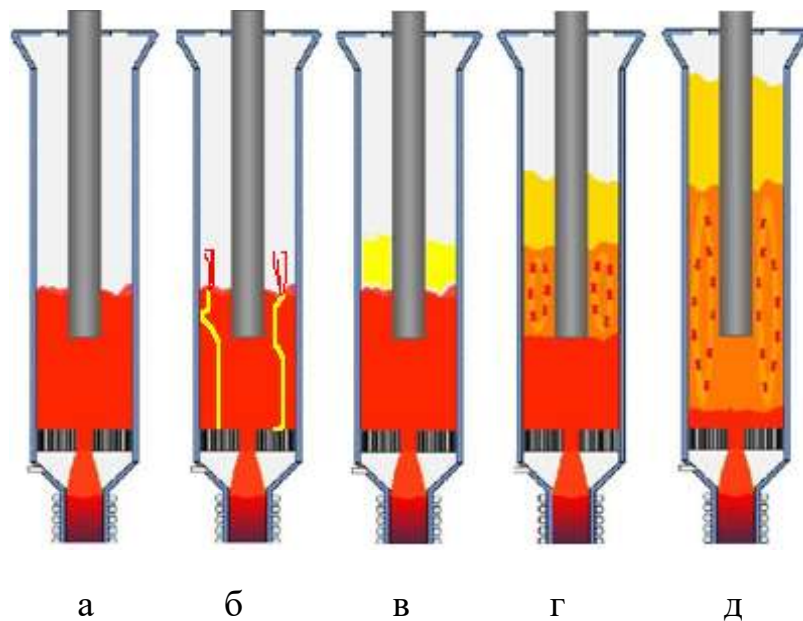


Рисунок .2.3 Аеродинамічні режими киплячого шару печі з ЕКШ

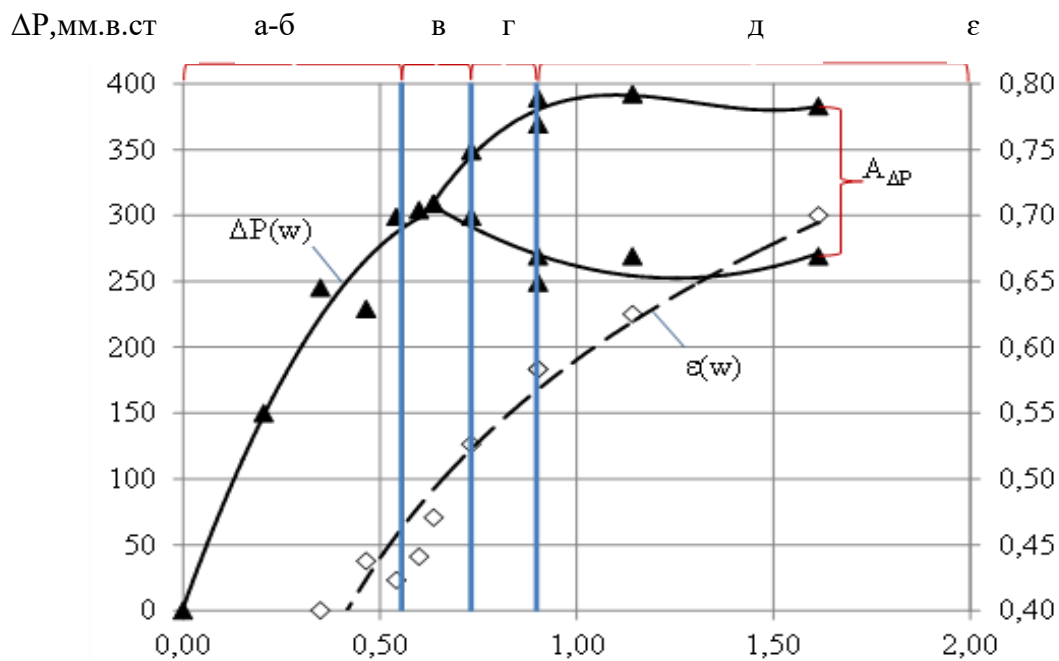


Рисунок 2.4 Аеродинамічна характеристика киплячого шару антрацитом 0,8-2,0 мм

- ▲ - $\Delta P(w)$ аеродинамічний опір шару в залежності від швидкості газу,
 ◇ - $\epsilon(w)$ середня порозність шару в залежності від швидкості газу,
 $A_{\Delta P}$ – амплітуда коливань аеродинамічного опору шару, мм в.ст.

Аналіз отриманих результатів дослідження показав, що режим роботи киплячого шару, який відповідає умовам рівномірності температурного поля та рівномірності обробки всього матеріалу, характеризується середньою порозністю шару $\varepsilon = 0,55-0,65$. Враховуючи збільшення висоти шару та його порозності при зростанні швидкості газу, визначення необхідної швидкості можливо при використанні залежності $\varepsilon = f(v, d_e, \nu) = f(Re)$, яка за рекомендаціями [61] має вигляд:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[\frac{(Re + 0.02 * Re^2)}{(Re_{mf} + 0.02 * Re_{mf})} \right]^{0.21} \quad 2.3$$

В таблиці 2.6 наведено порівняння розрахункових та експериментальних значень порозності для дослідженого діапазону параметрів в режимі інтенсивного кипіння.

Таблиця 2.6 Порівняння розрахункових та експериментальних даних пробності киплячого шару в режимі інтенсивного кипіння

Матеріал шару	Розрахункова порозність	Експериментальна порозність		Відносна різниця між розрахунком і експериментом, %	
		min	max	min	max
Антрацит 0,8-2 мм	0,66	0.54	0.77	-21.0	14.2
Антрацит 2 – 5 мм	0,69	0,58	0,69	-18,9	0,0
Антрацит 4-8 мм	0,50	0,44	0,62	-14,3	19,3
Графіт ГТ-1 0,2-0,3 мм	0,54	0,68		19	

Таким чином, доведено можливість використання залежності (2.3) для вибору швидкості газу у печах з електротермічним киплячим шаром з похибкою що не перевершує 20 %.

Висновки розділу 2.

На основі експериментальних досліджень аеродинамічних режимів роботи печей з ЕКШ на холодній моделі отримано наступні результати:

1. Відмінною ознакою псевдозрідження антрациту розміром фракцій 0,8 -2 мм, 2-5 мм, 4-8 мм та природного графіту ГТ-1 0,2-0,3 мм є утворення пазиркового режиму кипіння. Поршневий режим може спостерігатися на вологому злежаному матеріалі із дуже незначною ймовірністю.

2. Визначено 5 характерних режимів роботи киплячого шару антрациту та природного графіту: щільний шар, нерухомий шар, перехідний режим, молоінтенсивний режим та інтенсивний режим роботи. Інтенсивний режим забезпечує інтенсивне перемішування матеріалу у робочій камері та забезпечує рівномірність температурного поля при нагріванні електричним струмом.

Для інтенсивного режиму характерно підвищення висоти псевдозрідженого шару в 1,5-2 рази більше відносно нерухомого. У циркуляції задіяний практично весь матеріал. Амплітуда кипіння шару складає близько 25-40%. Частота пульсації верхньої межі шару 1-2 Гц.

3. Для реалізації інтенсивного режиму киплячого шару необхідно підвищення середньої порозності шару до 0,55-0,65. Для розрахунку необхідної швидкості газу для забезпечення цієї умови можливо використовувати залежність $\varepsilon = f(Re)$ рекомендовану [61], яка дозволяє отримати результати з похибкою не більш 20%.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПІЛОТНОЇ ПЕЧІ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Розробка, виготовлення та випробування пілотної печі з електротермічним киплячим шаром проводилося в рамках виконання міжнародного партнерського проекту BNL-T2-0372-UA «Recycling of spent batteries from electric drive vehicles» (2012-2014 pp) відповідно до програми Департаменту Енергетики США GIPP. В проекті з української сторони були задіяні Національна металургійна академія України, ТОВ «Центр матеріалознавства» (м. Київ) і ДП «Конструкторське бюро «Південне» (м. Дніпро), з американської – Брукхевінська Національна Лабораторія (м. Нью-Йорк, США). Проект виконано за підтримки міжурядової дипломатичної організації «Український Науково-Технологічний Центр» .

3.1 Розробка печі з ЕКШ продуктивністю 10 кг/год

3.1.1 Вихідні дані для розробки печі з ЕКШ продуктивністю 10 кг/год

При розробці печі враховувалися наступні вихідні данні:

- продуктивність – 10 кг /год готового продукту,
- температура обробки - 2500- 2700°C,
- інертний газ – азот,
- струм – постійний,
- сировина – природний графіт марки ГТ-1 з початковою зольністю не вище 2-2,5%.

3.1.2 Розрахунок печі.

Розрахунок печі (рис. 3.1) складався з двох частин: аеродинамічний розрахунок киплячого шару та тепловий розрахунок печі, які виконувалися послідовно [66, 67].

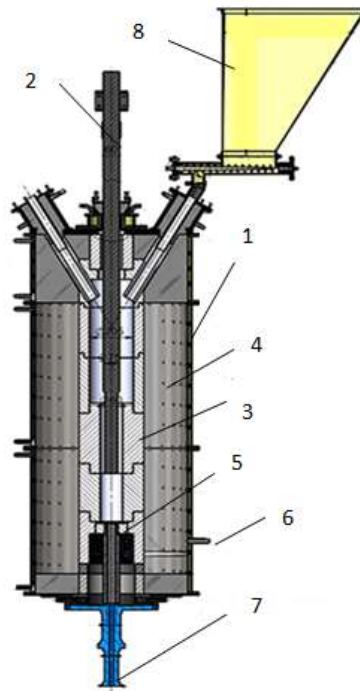


Рисунок 3.1 Схема пілотної печі з ЕКШ для термічної обробки вуглецевих матеріалів: 1 - водоохолоджуванний корпус печі; 2 - центральний електрод; 3 - графітова футерівка (периферійний електрод); 4 - тепла ізоляція; 5 - газорозподільча решітка; 6 - підведення інертного газу; 7 - холодильник готового продукту, 8 - бункер сировини.

У розрахунках були прийняті наступні припущення:

- рівномірний розподіл матеріальних потоків у горизонтальному перерізі печі;

- питомий електричний опір киплячого шару вуглецевого матеріалу відповідає параметрам роботи відомих аналогів і буде уточнений при випробуваннях печі продуктивністю 10 кг/год;

- найбільша нерівномірність температурного поля та джерел теплоти при проходженні струму в печі має місце за радіусом агрегату та пов'язана із змінною щільністю електричного струму в цьому напрямку.

Послідовність розрахунків була наступна:

- розрахунок швидкості та витрати азоту для утворення киплячого шару з урахуванням виходу летких речовин та теплообміну у робочому просторі печі, визначення гідравлічного опору киплячого шару;

- розрахунок матеріального балансу печі з електротермічним киплячим шаром;

- розрахунок теплового балансу печі.

Розрахунок витрат азоту проведено відповідно до рекомендацій розділу 2 дисертації, а саме вибору швидкості газу, яка забезпечує підвищення порозності шару до 0,55 – залежність (2.3). Водночас в процесі розігріву печі витрати газу значно зменшуються, що пов'язано з ростом температури газу та підвищенням його в'язкості (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 Результати розрахунку витрат азоту у пілотній печі

Температура печі, °C	20	1000	2000	2700
Витрати азоту м³/год при н.у.	5,05	0,45	0,18	0,12

Гідравлічний опір псевдозріженого шару визначався по залежності [62]:

$$\Delta P = g \cdot (\rho_m - \rho_{N_2}) \cdot (1 - \varepsilon_{кр}) \cdot H_0 \quad (3.1)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$\varepsilon_{кр}$ – порозність шару при швидкості газу що дорівнює першій критичній швидкості переходу від щільного шару до киплячого ($\approx 0,45$),

H_0 – висота шару в момент початку псевдозрідження, м;

ρ_m, ρ_{N_2} – густина матеріалу та газу, кг/м³.

Величина аеродинамічного опору киплячого шару склала 200 мм. в.ст.

3.1.3 Розрахунок матеріального балансу печі.

До розрахунку матеріального балансу печі прийнята наступна схема:

1) вхідні матеріальні потоки, кг/с: витрата сировини M_c ; витрата азоту M_{N2}

2) вихідні матеріальні потоки, кг/с: готовий продукт M_{zn} ; випарена волога M_{H2O} ; летючі M_l ; унесений пил M_{yn} ; транзитний азот M_{N2}

Рівняння матеріального балансу печі:

$$M_c + M_{N2} = M_{zn} + M_{N2} + M_{yn} + M_l + M_{H2O}, \text{ кг/с} \quad (3.2)$$

Прибуткові статті:

Масова витрата азоту залежить від швидкості v_{N2} (нмЗ/с):

$$M_{N2} = v_{N2} \cdot \rho_{N2} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{раб}^2 - D_e^2)}{4}, \text{ кг/с} \quad (3.3)$$

де ρ_{N2} густина азоту, кг/м³.

Швидкість азоту у свою чергу визначається відповідно до умов існування киплячого шару при робочій температурі (табл. 3.1).

Витрата сировини на піч:

$$M_c = \frac{M_{zn}}{1 - 0,01 \cdot (W_{yn} + W_{H2O} + W_l \cdot (1 - 0,01 \cdot W_{H2O}))}, \text{ кг/с} \quad (3.4)$$

де W_{yn} - доля унесення пилу, %; W_{H2O} - вологість сировини %; W_l - доля летючих, %;

Видаткові статті:

Унесення пилу:

$$M_{yH} = 0,01 \cdot M_c \cdot W_{yH}, \text{ кг/с} \quad (3.5)$$

Вихід летких:

$$M_L = 0,01 \cdot M_c \cdot W_L \cdot (1 - 0,01 \cdot W_{H_2O}), \text{ кг/с} \quad (3.6)$$

Вихід води:

$$M_{H_2O} = 0,01 \cdot M_c \cdot W_{H_2O}, \text{ кг/с} \quad (3.7)$$

3.1.4 Розрахунок теплового балансу.

Тепловий баланс печі враховує «матеріальні» потоки, виділення теплоти у результаті протікання електричного струму та втрати теплоти від зовнішнього водяного охолодження через футеровку печі.

Рівняння теплового балансу печі має наступний вигляд:

$$Q_c + Q_{N_2} + Q_e = Q_{zn}^{tp} + Q_{N_2}^{tp} + Q_{yH}^{tp} + Q_L^{tp} + Q_{H_2O}^{tp} + Q_{ox}, \text{ Вт} \quad (3.8)$$

де Q_c - фізична теплота сировини, Вт;

Q_{N_2} - фізична теплота азоту, Вт;

Q_e - виділення електричної енергії, Вт;

Q_{zn}^{tp} - фізична теплота готового продукту, Вт;

$Q_{N_2}^{tp}$ - фізична теплота транзитного азоту, Вт;

Q_{yH}^{tp} - фізична теплота пилу, що виноситься, Вт;

Q_L^{tp} - фізична теплота летючих складових, Вт;

$Q_{H_2O}^{tp}$ - фізична теплота випареної води, Вт;

Q_{ox} - втрати теплоти від охолодження Вт.

Прибуткові статті

- фізична теплота сировини

$$Q_c = (M_c - M_{H_2O})c_c \cdot t_c + M_{H_2O}c_{H_2O} \cdot t_c, \text{ Вт} \quad (3.9)$$

де c_c, c_{H_2O} - питома теплоємність сировини та води, Дж/кг·К,

t_c - температура сировини, °С.

- фізична теплота азоту

$$Q_{N_2} = M_{n_2} \cdot c_{n_2} \cdot t_{N_2}^0, \text{ Вт} \quad (3.10)$$

де $c_{N_2} \cdot t_{N_2}^0$ - питома теплоємність та температура азоту, Дж/кг·К, °С.

- теплота електричного струму [66]

$$Q_e = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{\sigma \cdot \ln \frac{D_{\text{раб}}}{D_e}}{2 \cdot \pi \cdot H_{\text{раб}}}, \text{ Вт} \quad (3.11)$$

Робочий струм I визначається методом наближень за прийнятою температурою процесу t_p .

Видаткові статті:

- фізична теплота готового продукту:

$$Q_{zn}^{tp} = M_{zn} \cdot c_{zn} \cdot t_p, \text{ Вт} \quad (3.12)$$

де c_{zn}, t_p - питома теплоємність та температура готового продукту, Дж/кг·К, °С.

- фізична теплота транзитного азоту

$$Q_{N2}^{tp} = M_{N2} \cdot c_{N2} \cdot t_p, \text{ Вт} \quad (3.13)$$

- фізична теплота пилу, що виноситься з печі

$$Q_{yn}^{tp} = M_{yn} \cdot c_{zn} \cdot t_p, \text{ Вт} \quad (3.14)$$

- фізична теплота летючих складових

$$Q_l^{tp} = M_{lc_l} \cdot t_p, \text{ Вт} \quad (3.15)$$

де c_l - питома теплоємність летючих, Дж/кгК, °С.

- фізична теплота пари з урахуванням витрат на випарювання

$$Q_{H2O}^{tp} = M_{H2O} \cdot c_{H2O} \cdot t_p + M_{H2O} \cdot q_{вин}, \text{ Вт} \quad (3.16)$$

де $q_{вин}$ – витрати теплоти на випаровування вологи, Дж/кг

- втрати теплоти від зовнішнього охолодження

$$Q_{ох} = k \times \frac{(t_p - t_{\epsilon}^{cp}) \cdot \pi \cdot H_{раб}}{\frac{1}{\alpha_m \cdot D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{граф}} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{саж}} \cdot \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{ст}} \cdot \ln \frac{D_4}{D_3} + \frac{1}{\alpha_{\epsilon} \cdot D_4}} \quad (3.17)$$

де $D_1 = D_{раб}$ – внутрішній діаметр печі (вуглецевих блоків), м;

$D_2 = D_{раб} + 2 \cdot \delta_{граф}$ – зовнішній діаметр графітової футеровки, м;

$D_3 = D_{раб} + 2 \cdot \delta_{граф} + 2 \cdot \delta_{ізол}$ – діаметр стику прошарку між тепловою ізоляцією та внутрішньою сталевую стінкою кожуху, м;

$D_4 = D_{раб} + 2 \cdot \delta_{граф} + 2 \cdot \delta_{ізол} + 2 \cdot \delta_{ст}$ – діаметр внутрішньої сталевій стінки кожуху з боку води, м;

- α_m – коефіцієнт тепловіддачі від киплячого шару до бічної графітової стінки, Вт/(м²·К);
- α_g – коефіцієнт тепловіддачі від сталевोї стінки до охолоджувальної води, Вт/(м²·К);
- $\lambda_{граф}$ – коефіцієнт теплопровідності графітового блоку, Вт/(м·К);
- $\lambda_{ізол}$ – коефіцієнт теплопровідності теплової ізоляції, Вт/(м·К);
- $\lambda_{ст}$ – коефіцієнт теплопровідності сталевої стінки, Вт/(м²·К).

3.1.5 Результати розробки печі ЕКШ продуктивністю 10 кг/год

Результати розрахунків матеріального і теплового балансу пілотної печі ЕКШ продуктивністю 10 кг/год наведено у таблицях 3.2, 3.3.

Таблиця 3.2 Технічні характеристики пілотної печі ЕКШ для термічної обробки вуглецевих матеріалів продуктивністю 10 кг /год

Показник	Одиниці виміру	Значення
1. Продуктивність	кг/г	10
2. Електрична потужність	кВт	30
3. Вид струму	-	Постійний
4. Величина струму	А	400-600
5. Величина напруги	В	30-70
6. Діаметр робочої зони	мм	350
7. Товщина графітової футеровки в робочій зоні	мм	100
8. Товщина слою теплової ізоляції	мм	200
9. Питомий електричний опір киплячого шару	Ом·м	0,04 – 0,35
10. Температура нагріву матеріалу	°С	2500 -2700

11. Темпеатура в стінці печі - внутрішня поверхня графітової футеровки, - стик графітова футеровка – сажа, - стик сажа – корпус печі - стик корпус печі охолоджуюча вода	°C	2700 2580 40 39
12. Витрата води на охолодження	м ³ /год	1,5-2,5 м ³ /год
13. Витрата азоту: - робочий режим - режим пуску	м ³ /год	0,12 до 5
14. Температура охолоджуючої води	°C	20-40

Таблиця 3.3 Тепловий баланс печі ЕКШ продуктивністю 10 кг/год

Прибуткові статті			Видаткові статті		
Найменування	кВт	%	Найменування	кВт	%
Фізична теплота сировини	0.12	0.43	Фізична теплота готового продукту	15.62	55.49
Фізична теплота азоту	0.00	0.00	Фізична теплота відхідних газів	0.06	0.20
Електроенергія	28.05	99.57	Фізична теплота унесення пилу	0.78	2.77
			Водяне охолодження	11.69	41.54
Разом	28.17	100.00		28.17	100

3.2 Виготовлення та випробування пілотної печі з ЕКШ продуктивністю 10 кг/год

3.2.1 Розробка та виготовлення печі

На основі проведених досліджень було розроблено технічне завдання на проектування пілотної печі ТОВ «Центр матеріалознавства» (м. Київ). Було розроблено конструкторську документацію та виготовлено пілотну піч (Додаток Б). Основні креслення печі наведені у додатку В. Фото пілотної печі наведено на рисунку 3.2.

3.2.2 Випробування пілотної печі

Натурні випробування пілотної печі продуктивністю 10 кг/год в лабораторії в лабораторії «Центру матеріалознавства» (м. Київ) разом з представниками НМетАУ та КБ «Південне». В рамках випробування виконане нагрівання псевдозрідженого шару графіту марки ГТ-1 в режимі холостого ходу без поточного вивантаження матеріалу. Процес відбувався при наступних умовах:



Рисунок 3.2 Пілотна піч продуктивністю 10 кг/год

- електрична потужність 6-13 кВт;

- напруга 12-36В, струм 200-500А;
- витрата азоту 8-26 л/хв;
- тиск азоту під розподільчою решіткою 260-400 мм в.ст.

В процесі нагріву спостерігалися коливання електричних параметрів, що обумовлено зміною електричного опору киплячого шару при проходженні пазирів, а також коливаннями центрального електроду, який потребує додаткового закріплення. Це стало причиною зменшення витрат азоту, бо збільшення подачі азоту приводило до короткого замикання і аварійного відключення електричного живлення печі.

Контроль температури печі виконувався двома датчиками температури типу ТХА, які були заглиблені у теплову ізоляцію на 70 мм відповідно на рівні активної зони (t_1) та верхньої частини печі (t_2).

Температурний режим процесу розігріву печі в експерименті представлений у таблиці 3.4:

Таблиця 3.4 Температурний режим розігріву печі

Час, год	Електрична потужність, кВт	Температура в тепловій ізоляції	
		t_1 , °C	t_2 , °C
1	6	20	21
2	9	30	37
3	13	42	64
4	10	51	93
5	11	56	104

По закінченню експерименту графіт був вивантажений із робочого простору. Матеріал мав температуру – 700-900°C . Шляхом математичного моделювання була виконана оцінка температури в робочому просторі печі.

Математична постановка задачі включала диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності в двошаровій циліндричній стінці:

$$\rho \cdot c(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \left(\lambda(t) \cdot r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (3.18)$$

- при наступних умовах однозначності:

початкових умовах:

$$t(r)|_{\tau=0} = 20^{\circ}\text{C}, r \in [R_1; R_3] \quad (3.19)$$

граничних умовах:

- на внутрішній стінці футеровки

$$\lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \frac{N(\tau)}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot H}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.20)$$

- на зовнішній стінці теплової ізоляції зі сторони водо охолоджуваного кожуху:

$$\lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R_3} = \alpha \cdot (t(r = R_3, \tau) - t_{\text{в}}), \text{ Вт/м}^2 \quad (3.21)$$

- в місці контакту футеровки та теплової ізоляції

$$\lambda_{\text{ф}}(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \lambda_{\text{из}}(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R_2} \quad (3.22)$$

Система рівнянь була вирішена методом кінцевих різниць. Розрахунковий крок за радіусом становив 1 мм; за часом – 60 с. Розроблений алгоритм був реалізований в пакеті Visual Basic.

Результати розрахунків [65-67] представлені на рисунку 3.3, 3.4.

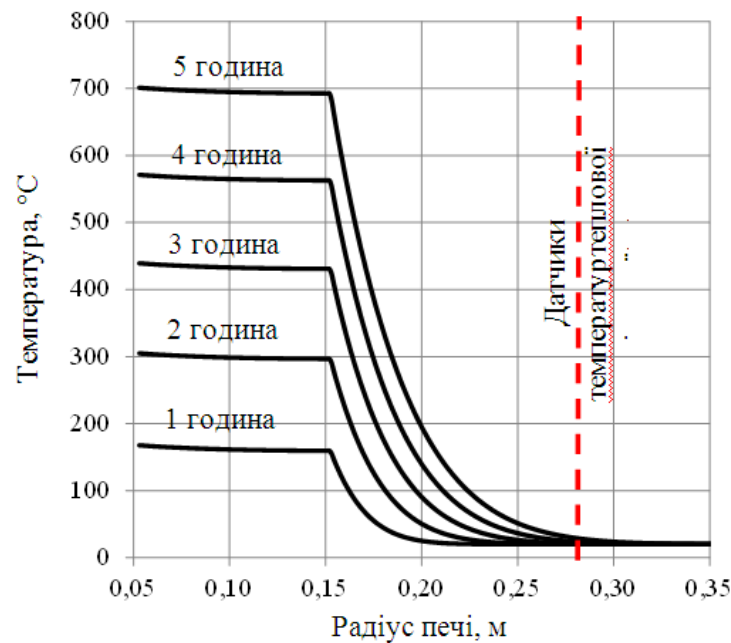


Рисунок 3.3 Розподіл температур у футеровці та тепловій ізоляції печі

Відповідно до умов експерименту розрахункова температура у робочому просторі через 5 годин становила близько 700°C , що збігається з результатами контрольного вимірювання. Відповідно температура теплової ізоляції на глибині встановлення термопар становила 50°C . При збільшенні потужності печі до 15 кВт температура робочого простору підвищувалася до 900°C (рис. 3.4), а температура теплової ізоляції на глибині встановлення термопар становила біля 100°C .

На основі моделі були уточнені розрахунки часу нагрівання матеріалу в залежності від електричної потужності печі. При потужності 10-11 кВт час виходу печі на робочу температуру 2000°C становить порядку 18 годин, при 15 кВт – відповідно 11 годин.

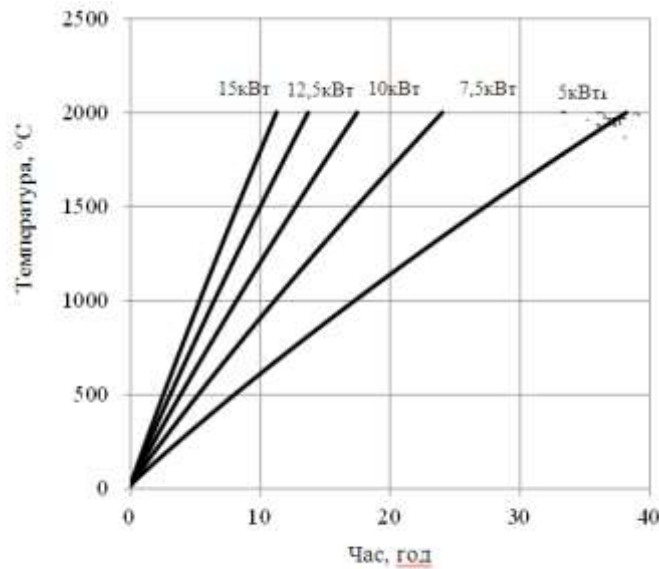


Рисунок 3.4 Динаміка розігріву печі в залежності від електричної потужності

Висновки розділу:

1. На основі проведених досліджень розроблено методику розрахунку печей з електротермічним киплячим шаром для термічної обробки вуглецевих матеріалів, що включає розрахунки аеродинамічного режиму роботи, матеріального та теплового балансів.
2. Визначено основні технічні показники печі, потужність, витрати інертного газу, води охолодження та основні конструктивні розміри пілотної печі продуктивністю печі 10 кг/ год.
3. Виготовлено пілотну піч та проведено її випробування, які показали принципову можливість нагріву матеріалу у електротермічному киплячому шарі. Втім визначено основні недоліки конструкції, необхідність точної центрування електроду та його закріплення, що повинно враховувати динамічні загрузки у киплячому шарі.
4. Доведено можливість ведення температури процесу по даним непрямого заміру температур у тепловій ізоляції печі.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОГО ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ

Аналіз відомих конструкцій холодильників дисперсного матеріалу (розділ 1) дозволив визначити принципові схеми системи охолодження готового продукту, що включають двоступеневе охолодження:

- перша ступінь - холодильник рекуперативного неконтактного типу (рис. 4.1), де рух продукту відбувається у щільному шарі, а водоохолоджуваний канал футерується графітовою вставкою. Це вирішує питання засмічення готового продукту при абразивному зносі. Температура готового продукту 3000-900°C.
- друга ступінь – холодильник рекуперативного типу з теплообмінною поверхнею у вигляді водоохолоджуваних труб, які розташовані у шаховому порядку (рис. 4.2). Температура готового продукту 900-300°C.

300°C – це верхня межа температури що унеможливорює займання / або тління матеріалу при прямому контакті з відкритим повітрям, та гарантує поступове зменшення температур продукту до рівня зовнішнього середовища.

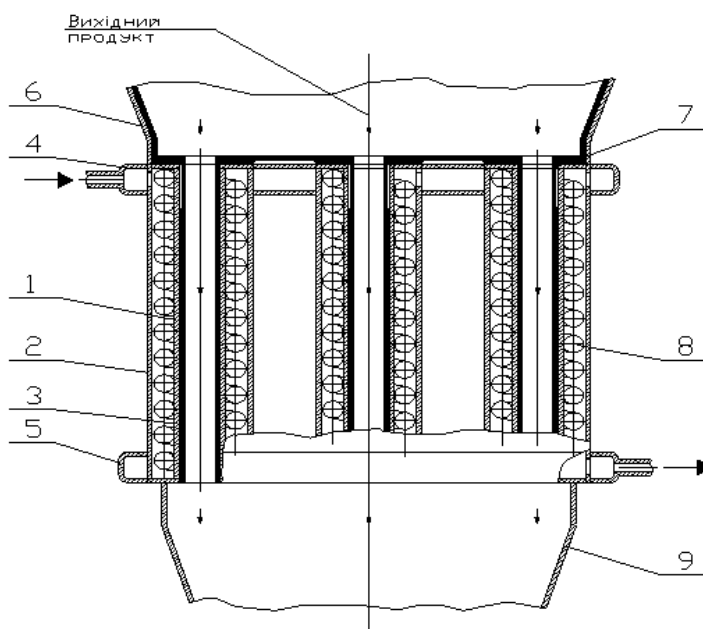
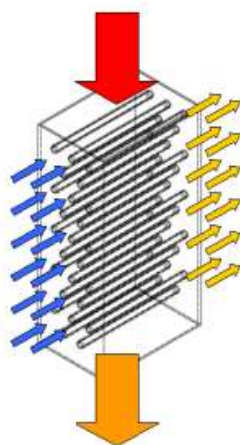


Рисунок 4.1 Схема холодильника першої ступені: 1 – труба;
2 – оболонка; 3 – графітовий вкладиш; 4 – верхня трубна
дошка-колектор; 5 – нижня трубна дошка-колектор; 6 – піч; 7 – графітова
теплоізоляція; 8 – пруток; 9 – вихідний патрубок

Готовий продукт $t = 900^{\circ}\text{C}$



Готовий продукт $t = 300^{\circ}\text{C}$

Рисунок 4.2 Схема холодильника другої ступені [68]

4.1 Дослідження охолодження готового продукту у холодильнику першої ступені

Головною проблемою забезпечення динамічного охолодження дисперсного продукту після електротермічної печі киплячого шару є виражені теплоізоляційні властивості щільного шару дисперсного графіту, оскільки коефіцієнт теплопровідності істотно зменшується по мірі охолодження. Отже прошарки матеріалу, які контактують з поверхнями теплообміну, швидко перетворюються на ділянки підвищеного термічного опору та гальмують процес [69-71].

Традиційні прямотрубні системи охолодження передбачають рух гарячого продукту під дією сил тяжіння уздовж вертикальних водоохолоджуваних каналів футерованих графітовими вставками [49], отже відзначаються низькою ефективністю через зазначену проблему. Це може бути вирішено за рахунок використання мульті-трубної системи з кількістю каналів більше одного з відповідним зменшенням розміру (діаметру) каналів. Аналогічне рішення використовується і у пластинчатому теплообміннику [37, 72]. Однак в цьому випадку виникає проблема рівномірного розподілу продукту між каналами, що значно впливає на ефективність роботи всього холодильника.

Одною з головних вимог рівномірного розподілу витрат готового продукту є симетричність розташування каналів [69]. Тому в подальшому буде розглянуто варіанти багатосекційного холодильника першої ступені, що складається з 1-4 каналів для руху матеріалу.

Наступним конструктивним рішенням інтенсифікації теплообміну у холодильниках даних типів є організація перемішування матеріалу що приводить до підвищення різниці температур між матеріалом та охолоджуючою водою. Такий підхід запропоновано у відомих конструкціях холодильників [37, 69, 71].

З огляду на вказані особливості, науково-практичний інтерес становить більш детальне дослідження холодильника, який містить організоване

перемішування продукту при переході між секціями (рис . 4.3). Матеріал поступово охолоджується уздовж 1-й секції. Зовнішні прошарки, що контактують із стінками, збільшують свій термічний опір по мірі охолодження, проте організовані між вертикальними секціями роздільники потоку дисперсного середовища забезпечують перемішування основного ядра. Це підвищує температурний потенціал теплообміну.

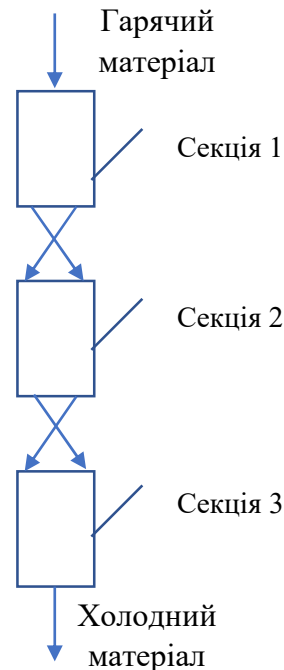


Рисунок 4.3 – Принципова схема триступеневого охолоджувача з перемішуванням між секціями

Отже, нижче наведено результати теоретичних досліджень першої ступені охолодження 3000°C / 900°C у вигляді багатосекційної прямотрубною системи з проміжним перемішуванням матеріалу.

4.1.1 Математична модель прямотрубного багатосекційного охолоджувача матеріалу

Відповідно до встановлених вимог та зазначених технічних особливостей елемент такого багатосекційного охолоджувача являє собою пряму ділянку графітової труби, яка розташована у сталевому водоохолоджуваному кожуху.

Сходження матеріалу відбувається рівномірно, що забезпечується певним співвідношення лінійних розмірів [69]. Теплообмін у середині матеріалу та на межі «шар-стінка» відбувається за змішаною схемою: кондуктивне перенесення теплоти одночасно з тепловим випромінюванням у вільному об'ємі.

Для зазначених вище фізичних умов математична постановка задачі охолодження дисперсного середовища вуглецевмісного продукту від температури 2500-3000°C включає наступну систему рівнянь: 1) диференційне рівняння теплопровідності у циліндричних координатах (4.1) на основі ефективного коефіцієнту теплопровідності; 2) граничні умови на межі шар-графітова стінка / графітова футеровка - сталева стінка (4.2); 3) граничні умови на межі сталева стінка – теплоносієм (4.3); 4) рівняння ефективного коефіцієнту теплопровідності у шарі (4.4); 5) рівняння коефіцієнту теплопровідності у графітовій стінці (4.5); 6) зв'язок просторової координати матеріалу із продуктивністю та діаметром каналу (4.6):

$$\rho c(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial t}{\partial r} \left(\lambda(t) \cdot r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) \right] \quad (4.1)$$

$$-\lambda_{1(2)}(t) \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda_{2(3)}(t) \frac{\partial t}{\partial n} \quad (4.2)$$

$$-\lambda_3(t) \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t_p - t_3) \quad (4.3)$$

$$\lambda_1 = \left(1 - \frac{(1 - \varepsilon)}{C - B} \right) A \quad (4.4)$$

$$A = 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot d \cdot \frac{2}{3} \cdot (t + 273)^3 + \lambda_r$$

$$B = \frac{1 - (1 - 3)}{3}$$

$$C = \frac{1}{1 - \frac{\lambda_m}{A}}$$

$$M \cdot \rho_n = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H / \tau \quad (4.5)$$

де

t – поточна температура шару матеріалу та у середні стінок, °C;

τ – координата за часом, с;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·K;

r – поточна координата за радіусом трубного елемента, м;

1, 2, 3 – індекси відповідно для шару, графітової та сталевий стінок;

p – індекс параметрів для охолоджуючої рідини;

α – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від сталевий стінки до води, Вт/м²·K;

A, B, C – проміжні коефіцієнти у розрахунку ефективної теплопровідності шару дисперсного матеріалу [73];

m, g – індекси параметрів для матеріалу та газу;

M – масова витрата матеріалу в охолоджувачі, кг/с;

H – повна висота (довжина) теплообмінника, м;

D – діаметр трубного елемента – каналу для проходження матеріалу, м;

d – еквівалентний діаметр часток матеріалу, м;

ε – порізнить шару;

ρ_n – насипна щільність матеріалу, кг/м³;

c – теплоємність матеріалу, Дж/кг °C;

Слід зазначити, що у моделюванні подібних фізичних процесів, особливу увагу необхідно приділяти саме методикам визначення ефективного коефіцієнту теплопровідності шару, який враховує теплопровідність матеріалу, газу та радіаційну складову. Саме цей фактор є головним чинником, що визначає точність отриманих рішень. З огляду на це, вибір виразу (4.4) ґрунтувався на відповідних аналізах теплофізичних процесів у дисперсних системах, виконаних авторами [73-76].

Приведена система рівнянь (4.1-4.5) вирішувалась методом кінцевих різниць. Для цього елемент охолоджувача розбивався уздовж радіусу з певним шагом кроком, розмір якого визначався за критерієм збіжності розрахунків. При цьому було використана неявна схема розрахунку зі змінними теплофізичними коефіцієнтами як функціями температури [77-79]. Таким чином вирішувалась класична задача нестационарної теплопровідності у циліндричній стінці. Імітація процесу сходження матеріалу та відповідних змін у часі враховувалась шляхом прив'язки кроку за часом до вертикальної координати відповідно до рівняння (4.5). Схема перемішування матеріалу між секціями прийнята ідеальною.

4.1.2 Методика досліджень

Параметричне дослідження охолодження матеріалу у холодильнику проведено у діапазоні наступному параметрів: продуктивність апарату $G = 100-1000$ кг/год; кількість паралельних труб для сходження матеріалу $n_{тр} = 1-4$; внутрішній діаметр труб $D_{вн} = 0,1-0,2$ м; загальна кількість секцій холодильника уздовж висоти, між якими відбувається перемішування матеріалу, $n_{сек} = 1-10$ шт; відносна висота кожної секції у калібрах діаметру $H_{сек} = 3-7 \times D_{вн}$. Самі ці параметри опосередковано впливають на загальну поверхню теплообміну (кількість матеріалу у теплообмінному апараті) та час охолодження.

Отже для п'яти зазначених факторів у відповідних діапазонах проводилися розрахунки охолодження матеріалу не менш ніж у трьох точках. Водночас для кількості секцій дослідження проводилося у кожній дискретній точці.

З огляду на чималий масив розрахункових даних, який включав профілі температур матеріалу по висоті та радіусу теплообмінника було прийняте рішення обмежитися саме середньою по масі температурою готового продукту на виході з апарату у горизонтальному перерізі t_{cp} по відношенню до початкової температури на виході з електротермічної печі t_0 , оскільки саме цей параметр є цільовим показником процесу охолодження:

$$\theta_{cp} = t_{cp} / t_0 = \frac{\sum m_i \cdot c_i \cdot t_i}{\sum m_i \cdot c_i} / t_0. \quad (4.6)$$

де m_i – маса i -го прошарку матеріалу у горизонтальному перерізі.

4.1.3 Результати розрахункового дослідження охолодження матеріалу

Загалом було проведено 1080 розрахунків нестационарного охолодження матеріалу, окремі результати яких для наочності представлені у таблиці 4.1, рисунках 4.4, 4.5 . Як видно рішення задачі охоплює чималий діапазон значень температури охолодження 0,02-0,94, тому отримані результати можуть бути застосовані для широкого класу задач охолодження графітового матеріалу.

Таблиця 4.1 Показники охолодження графітового продукту для окремих геометричних та режимних параметрів

Відносна температура охолодження $\theta_{\text{ср}}$	Продуктивність G , кг/год	Кількість паралельних труб $n_{\text{тр}}$	Діаметр труб $D_{\text{вн}}$, м	Висота секції $H_{\text{сек}}, \times D_{\text{вн}}$	Загальна кількість секцій, $n_{\text{сек}}$
0.02	100	3	0.15	7	10
0.20	550	3	0.2	5	8
0.41	1000	1	0.15	7	9
0.60	550	1	0.15	7	3
0.78	100	1	0.1	3	1
0.94	1000	1	0.1	3	1

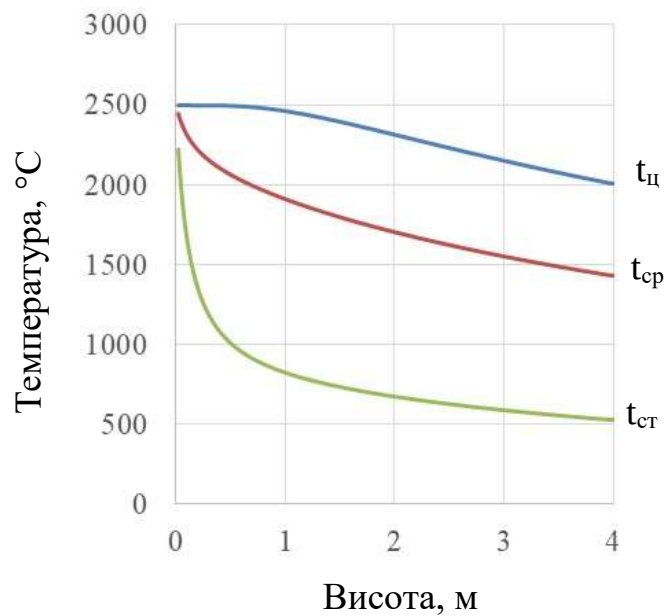


Рисунок 4.4. – Динаміка охолодження графіту у класичному однотрубному холодильнику: $G = 250$ кг/год; $D_{\text{вн}} = 200$ мм

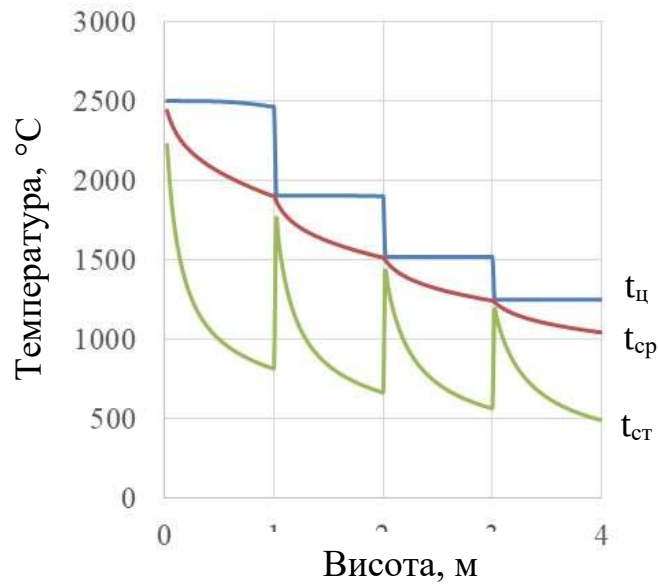


Рисунок 4.5. – Динаміка охолодження графіту у класичному однострубному холодильнику з чотирма секціями: $G = 250$ кг/год; $D_{\text{вн}} = 200$ мм

З метою зменшення кількості визначальних факторів продуктивність G та кількість паралельних труб $n_{\text{тр}}$ були об'єднанні через швидкість сходження матеріалу w відповідно до залежності:

$$w = \frac{G}{\rho_{\text{н}}} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2} \cdot \frac{1}{n_{\text{тр}}} \cdot \frac{100}{60}, \text{ см/хв} \quad (4.7)$$

Для отриманого масиву даних був проведений регресійний аналіз. Зроблена гіпотеза передбачала, що залежність $\theta_{\text{ср}}$ є функцією поліному 2-ї степені наступного виду:

$$\theta_{\text{ср}} = \sum x_i + \sum \sum x_i \cdot x_j. \quad (4.8)$$

де x_i, x_j – режимні та конструктивні параметри охолоджувача.

У підсумку, після визначення коефіцієнтів рівняння регресії, оцінки їхньої статистичної значущості остаточно було прийняте рівняння з коефіцієнтом кореляції $R^2 = 0,93$ наступного виду:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{ср}} = & 0.8646 + 3.146 \cdot 10^{-3} \cdot w - 5.993 \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{сек}} - \\ & - 0.1232 \cdot n_{\text{сек}} - 1.815 \cdot 10^{-5} \cdot w^2 + 3.209 \cdot 10^{-3} \cdot H_{\text{сек}}^2 + \\ & + 6.368 \cdot 10^{-3} \cdot n_{\text{сек}}^2 + 2.549 \cdot 10^{-2} \cdot w \cdot D_{\text{вн}} + \\ & + 4.684 \cdot 10^{-5} \cdot w \cdot n_{\text{сек}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

4.1.4 Розробка рекомендацій щодо вибору розмірів холодильника матеріалу

Вибір геометричних параметрів холодильника матеріалу має ґрунтуватися на вихідних даних, зокрема продуктивності печі та температури матеріалу на вході. Решта параметрів, такі як висота секції, кількість секцій, внутрішній діаметр, мають визначатися з огляду на наявні технічні обмеження. Наприклад, наявного простору для встановлення холодильника, рівномірності розподілу та охолодження матеріалу. Два останні показники пов'язані із кількістю труб та є взаємно протилежними.

Отже доцільним є виконання розрахунку базових розмірів холодильника за наступним алгоритмом:

- 1) визначення вихідних параметрів (продуктивність та температура охолодження)
- 2) визначення максимальної висоти апарату;

- 3) встановлення обмежень щодо діапазону допустимих параметрів (п. 4.1.2)
- 4) послідовний розрахунок – оптимізація розмірів холодильника на основі залежності (4.9) послідовно для кількості труб $n_{тр} = 1, 2, 3, 4$ шт. При цьому, визначатимуться діаметр труб, висота та кількість секцій. Перевагу слід віддавати рішенню з меншою кількістю труб.

В якості прикладу, вирішено задачу розрахунку розмірів холодильника для наступних умов: продуктивність - $G = 1000$ кг/год, початкова температура $t_0 = 2500^\circ\text{C}$, кінцева температура $t_k = 900^\circ\text{C}$, загальна висота теплообмінника - $H = 4$ м. Згідно отриманих результатів зазначені параметри охолодження забезпечуються теплообмінником наступних параметрів: кількість труб для сходження матеріалу – 4; діаметр труб – 0,17 м; висота однієї секції 0,57 м; кількість секцій – 7.

4.2 Дослідження роботи холодильника другої ступені

4.2.1 Методика розрахунку холодильника другої ступені

Холодильник другої ступені призначений для охолодження готового продукту від 900°C до 300°C відрізняється збільшенням поверхні теплообміну та інтенсивним перемішуванням матеріалу. Такий холодильник можливо віднести до перехреснотокowego типу рекуператору. При цьому методика розрахунку такого теплообмінника повністю відповідає відомим розробкам рекомендованим у [80-83]. Розрахунок теплообмінника базується на рівняннях теплового балансу рекуператора та рівнянні теплопередачі. Це дозволяє при заданих температурах теплоносіїв визначити величину теплообмінної поверхні. Однак при розрахунках потрібно визначати коефіцієнти тепловіддачі від теплоносіїв до теплообмінної поверхні. Коефіцієнт тепловіддачі до охолоджуючої води визначається по відомих критеріальних залежностях $Nu = f(Re, Pr)$, багаторазово перевірених на

практиці [84,85]. Визначення коефіцієнта тепловіддачі від дисперсної речовини (готового продукту) потребують додаткового уточнення.

Дослідженню теплообміну при поперековому обтіканню трубчастих поверхонь дисперсним теплоносієм присвячено достатню кількість робіт, при цьому останні роки цей напрямок досліджень було інтенсифіковано за рахунок використання аналогічних теплообмінників у системах для використання сонячної енергії для вироблення електрики [70, 68, 43].

Основними факторами які визначають коефіцієнт тепловіддачі є [69, 86] гранулометричний склад часток шару d_e , теплофізичні властивості шару ефективна теплопровідність шару λ_{ef} , насипна густина $\rho_{нас}$, питома теплоємність $c_{мат}$, геометричні характеристики трубої системи (діаметр труб $D_{тр}$, поздовжній і поперечний крок шахового розташування труб S_1, S_2), швидкість руху шару V_{bed} . Проведені експериментальні дослідження [69,86] та моделювання [87] показали що величина коефіцієнтів тепловіддачі дорівнює 30-250 Вт/м² К. Для розрахунків нами рекомендовано використання критеріальної залежності [86], яка отримано експериментально при охолодженні саме штучного графіту:

$$Nu_{шар} = 0,187 * Pe_{шар}^{0,31} * \left(\frac{D_{тр}}{d_e}\right)^{0,9} * \left(\frac{S_1}{d_e}\right)^{-0,59} \quad (4.10)$$

$$\text{де } Nu_{шар} = \frac{\alpha_{шар} d_e}{\lambda_{ef}}; \quad Pe_{шар} = \frac{V_{шар} d_e}{a_{ef}}$$

$\alpha_{шар}$ - коефіцієнт теплоотдачі від рухомого шару , Вт/м²К,

a_{ef} - ефективна температуропровідність шару, м²/с

На основі запропонованої методики розрахунку було розроблено технічне завдання на проектування холодильника другої ступені продуктивністю 1000 кг/год, конструкторська документація та виготовлено холодильник.

Характеристики холодильника наведені у таблиці 4.2. На рисунку 4.6 наведено загальний вид холодильника.

4.2.2 Дослідження абразивного зносу теплообмінних поверхонь холодильника

При розробці холодильника другої ступені одною з важливіших задач було визначення абразивного зносу поверхні теплообміну та засмічення готового продукту [88].

Контактна взаємодія матеріалу з поверхнею теплообміну можливо класифікувати за типом елементарних процесів руйнування в точках механічних контактів, що труться, рекомендованих в роботі [89]: пружне відтискування, пластичне відтиснення, мікрорізання і руйнування. Взаємодії всіх видів, в кінцевому рахунку, приводять до контактних руйнувань. Різання і крихке руйнування відбуваються при одному або декількох впливах.

Таблиця 4.2 Технічні характеристики холодильника другого ступеня продуктивністю 1000кг/год

№	Параметри	Розмірність	Значення
1.	Витрати гарячого теплоносія	кг/год	1000
2.	Початкова температура гарячого теплоносія	°C	900
3.	Кінцева температура гарячого теплоносія	°C	300
4.	Початкова температура холодного теплоносія	°C	30
5.	Кінцева температура холодного теплоносія	°C	35
6.	Середня швидкість гарячого теплоносія	м/ч	3
7.	Тип пучка труб	-	шаховий
8.	Зовнішній діаметр труб	мм	50

9.	Внутрішній діаметр труб	мм	40
10.	Відстань між осями труб в поперечному	мм	100
11.	Відстань між осями труб в повздовжньому	мм	150
12.	Розрахунковий діаметр часток	мм	2
13.	Переріз робочої частини холодильника	м	1x1
14.	Загальна площа теплообмінної поверхні	м ²	12,9
15.	Загальна кількість труб	шт	100

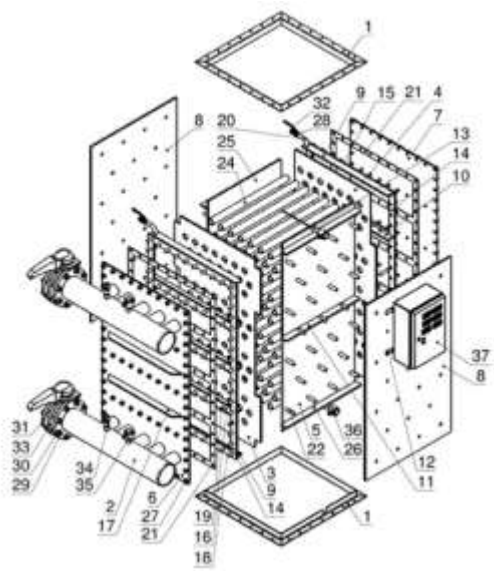


Рисунок 4.6 Загальний вигляд холодильника другого ступеня продуктивністю 1000 кг/год.

Руйнування в результаті розвитку контактних деформацій спостерігається після більшого числа циклів взаємодії. Відділення частинок матеріалу при руйнуванні в місцях контактів, що труться називають зносом. Середня швидкість зношування k являє собою відношення кінцевого збільшення величині зносу (зменшення лінійного розміру Δh , маси Δm або об'єму Δv) до інтервалу часу Δt , за який зміна відбулася, а інтенсивність зношування I визначається як

відношення величини зносу до шляху тертя Δl , на якому спостерігається цей знос:

$$k_h = \frac{\Delta h}{\Delta \tau}, k_m = \frac{\Delta m}{\Delta \tau}, k_v = \frac{\Delta v}{\Delta \tau} \quad (4.11)$$

$$I_h = \frac{\Delta h}{\Delta l}, I_m = \frac{\Delta m}{\Delta l}, I_v = \frac{\Delta v}{\Delta l} \quad (4.12)$$

Зважаючи на складну залежності процесу формування руйнування від властивостей матеріалу (в об'ємі і на поверхні), від шорсткості і від умов тертя (швидкості і навантаження) абразивний знос можливо визначити шляхом модельних випробувань. Саме такий шлях було обрано при дослідженнях, що дозволило з'ясувати залежності абразивного зносу ферритної і аустенітної сталей під впливом потоку частинок коксу.

Знос сталевих деталей частками коксу моделювали випробуваннями на абразивний знос на установці типу НК (нерухоме кільце) конструкції ДержНДІ машинознавства [90]. Зворотній метод випробування на абразивне зношування заснований на терті обертового зразка і кільця, яке розташоване в жолобі, засипаному випробувальним порошковим матеріалом (рис. 4.7). Вісь, на яку передається обертання від приводу, проходить через центр кільця і має два важелі для випробування одночасно двох зразків. Використовували три зусилля притиснення зразків до кільця: 1 – 0,65 кг, 2 - 1,15 кг; 3 - 2,95 кг.

При випробуванні для кожного навантаження жолоб з кільцем засипався новим коксом, який пройшов теплову обробку при 900°C , дроблення і розсівання з виділенням фракції, що пройшла через сито з розміром 1 мм і залишилася на ситі з осередком 0,2 мм. Відстань зразка від осі обертання - 0,15 м, швидкість обертання - 40 об / хв. Швидкість ковзання зразка по кільцю становила при цьому

$0,3 \cdot 3,14 \cdot 40/60 = 0,628$ м / с. Одночасно випробували два зразка: Ст. 3 і AISI 304 (нержавіюча сталь).

Випробування з реєстрацією часу і маси зносу починалися після притирання зразків. Площа контакту склала $F = 226 \text{ мм}^2$.

В процесі випробувань визначали втрату маси Δm , втрату об'єму $\Delta v = \Delta m / \rho$, враховуючи, що щільність сталі AISI 304 становить $\rho = 7,81 \text{ г / см}^3$, а Ст. 3 - $7,86 \text{ г / см}^3$. Лінійний знос визначали як $\Delta h = \Delta v / F$.

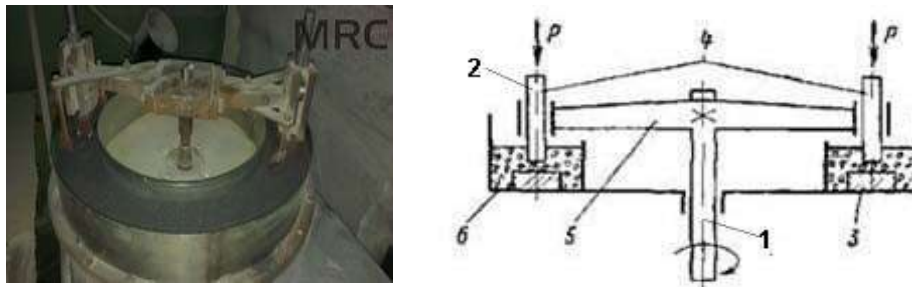


Рисунок 4.7. Загальний вигляд і схема (б) установки для випробувань на абразивний знос марки НК (нерухоме кільце) [89]: 1 - вісь обертання; 2 - порошок коксу; 3 - зразок; 4 - навантаження на зразок; 5 - коромисло; 6 - жолоб.

Після випробування на тертя з максимальним навантаженням проводили фрактографічний аналіз поверхні зразків сталей на растровому електронному мікроскопі Synerprobe-733.

Зміну твердості близько поверхні тертя визначали на поперечному шліфу за допомогою Мікротвердоміра ПМТ-3. Випробування на стиск здійснювали на універсальній машині марки 1231У-10 виробництва НІКІМП.

Графіки залежностей лінійного зносу Ст. 3 і AISI 304 від часу і навантаження при терті по коксу представлені на рис. 4.8. У разі Ст. 3 зменшення лінійного розміру зразка зростає пропорційно часу протягом 20 хв при всіх навантаженнях (рис. 4.8, а). Це означає, що знос відбувається з постійною

швидкістю. Для сталі AISI 304 прямо пропорційна залежність зносу від часу спостерігається тільки при мінімальному навантаженні (рис. 4.8, б). При великих навантаженнях швидкість зносу з часом зменшується.

Отримані дані по зносу (рис.4.8) показали, що основне зростання деформаційного зміцнення фіксується на стадії притирання зразка. У сталі AISI 304 зміцнення зростає зі збільшенням навантаження і часу тертя при ній. Це пояснює зростання стійкості до зношування сталі AISI 304 зі збільшенням часу при великих навантаженнях (рис. 4.8, б).

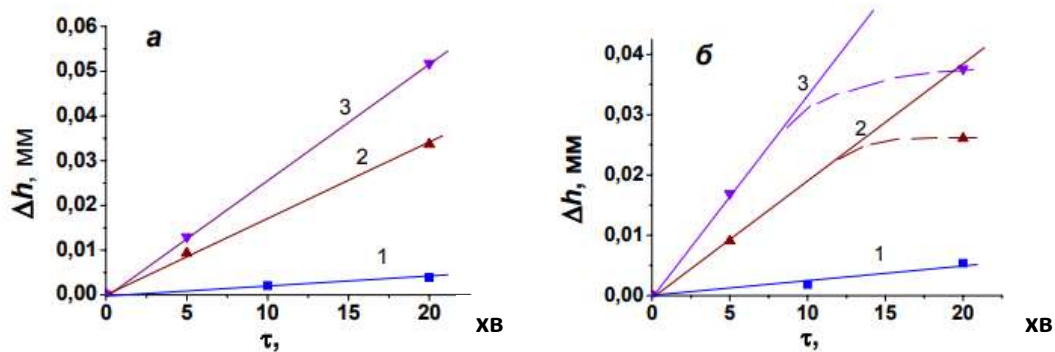


Рисунок 4.8 Залежності лінійного зносу Ст. 3 (а) і AISI 304 (б) від часу тертя і навантаження (кПа): 1 - 30; 2 - 50; 3 - 130.

На рисунку 4.9 представлені залежності швидкості зносу від прикладеного навантаження. При цьому для сталі AISI 304 взята максимальна швидкість зносу, яка має місце на початковій стадії тертя і визначається нахилом прямих ліній на рис. 4.8, б. Швидкість зносу Ст. 3 більше, ніж у сталі AISI 304, при мінімальному навантаженні і менше при більших навантаженнях. При малому навантаженні не проявляється зміцнення нержавіючої сталі, про що свідчить прямо пропорційна залежність зносу від часу при навантаженні 30 кПа. І при цьому навантаженні стійкість до зношування Ст. 3, яка різко зміцнюється на початковому етапі, буде вищою (рис. 4.9).

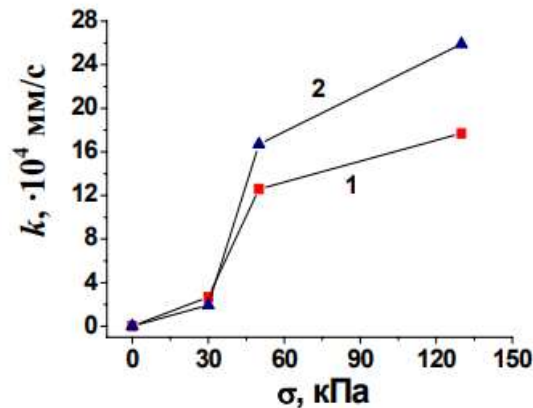


Рисунок 4.9 Залежність швидкості лінійного зносу сталей AISI 304 (1) і Ст. 3 (2) по коксу в залежності від прикладеного навантаження.

Облік зміни швидкості тертя в реальних умовах роботи холодильника можливо проводити на підставі того, що в досить широкому інтервалі швидкості тертя знос залежить тільки від пройденого шляху. Рівняння (4.11 і 4.12) дозволяють врахувати вплив швидкості тертя на знос. З них випливає, що швидкість лінійного зносу в реальних умовах менше отриманої оцінки в стільки разів, у скільки швидкість потоку частинок коксу в печі менше швидкості тертя зразка в експерименті.

4.2.3 Дослідження впливу вуглецю та азоту на надійність роботи теплообмінних поверхонь теплообмінника

Оскільки, труби холодильника контактують з робочим середовищем (кокс та азот), яке на вході в холодильник має температуру 900°C , то на поверхні теплообмінних труб можуть відбуватися хіміко-термічні процеси які впливатимуть на надійність і довговічність конструктивних елементів апарату, тобто цементация та азотування. Висока концентрація створених карбідів та нітридів, можуть призвести до підвищення хрупкості і міжкристалічного розтріскування.

Метою експериментального дослідження була перевірка можливості появи цементації та азотування на поверхні труби теплообмінника зі Сталі 3, поверхня якої є у контакті з коксом та азотом, нагрітими до 900°C . Із внутрі труба охолоджується проточною водою. На рисунку 4.10 наведено схему експериментального стенду на якому проведено дослідження.

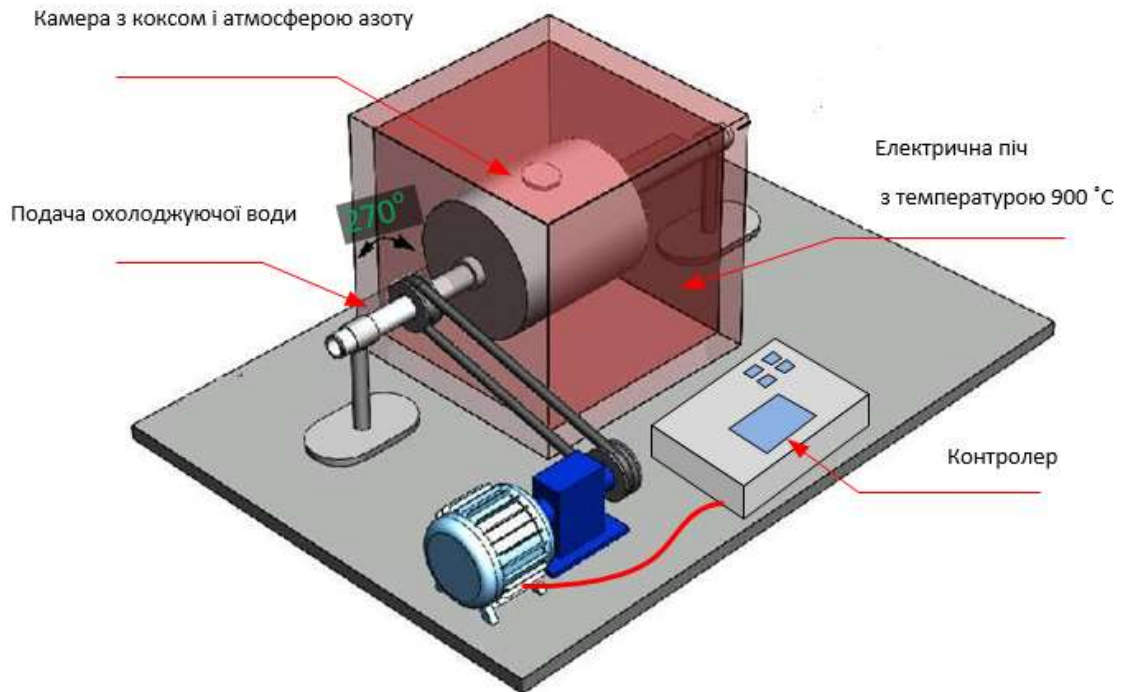


Рисунок 4.10 Схема експериментального стенду для дослідження хіміко-термічних процесів на теплообмінних поверхнях

Стенд представляв циліндричну камеру в яку вварені стержні для забезпечення перемішування коксу з розміром часток 1-15мм. В барабан і подавався азот. Через барабан проходить труба, що з середини охолоджується водопровідною водою. Камера розташована у печі з температурою 900°C . Камера здійснює зворотно-обертові рухи на 270° відносно своєї осі. Тривалість обробки у печі склала 40 годин. На рисунку 4.11 наведено фото стенда при дослідженнях.



Рисунок 4.11 Стенд в процесі роботи

Наявність процесу цементації визначалася за допомогою дослідження зміни мікроструктури та мікротвердості матеріалу біля поверхні труби на поперечному шліфі. Після 40-ка годин роботи труби в описаних вище умовах змін ні в її структурі, ні в твердості її поверхні не спостерігалось (рис. 4.12). Розмір відбитків при вимірюванні мікротвердості не змінюється з приближенням до краю кільця, що не підтверджує наявності твердої фази (рис. 4.12, ряд 3).

За даними проведених досліджень, можна зробити висновок, що зміна структури та механічних властивостей поверхні труб в умовах роботи холодильника не буде мати місце.



Рисунок 4.12 Мікроструктура матеріалу поверхневого шару кільця трубі після витримки 40 годин при нагріві у печі 900 °С.

Висновки розділу

1. Аналіз конструкцій холодильників для дисперсних матеріалів у щільному шарі показав, що для охолодження вуглецевих матеріалів доцільно використовувати двоступеневу схему: перша ступінь – прямотрубний холодильник з паралельними каналами, друга ступінь – перехреснотоківий холодильник з шаховим розташуванням водоохолоджуваних труб.

2. Інтенсифікація процесу охолодження готового продукту в прямотрубних холодильниках можлива шляхом зменшення діаметру каналів та використання секцій, що забезпечують перемішування матеріалу.

3. На основі математичного моделювання отримано залежність безрозмірної середньомасової температури вуглецевого матеріалу при охолодженні в прямо трубному холодильнику від режимних і конструктивних параметрів холодильника (швидкості руху матеріалу, діаметру каналів охолодження, кількості секцій безперервного руху та їх висоти). Залежність може бути використана для оптимізації показників роботи холодильника подібного типу.

4. Запропоновано методику розрахунку перехреснотокowego холодильника готового продукту в інтервалі температур 900-300°C , на основі якої розроблено та виготовлено холодильник продуктивністю 1000 кг/год.

5. На основі експериментальних досліджень абразивного зносу при переміщенні готового вуглецевого продукту встановлено, що при малих тисках Ст. 3 більш стійка до зносу при терті о порошок коксу, ніж нержавіюча сталь AISI 304. При тисках більше 30 кПа стійкість до зношування стали AISI 304 стає вище. Зміни у відносній стійкості до зношування сталей Ст. 3 і AISI 304 пояснюються відмінністю в характері зміцнення при деформації.

Отримані дані дозволили обґрунтувати заміну дорожчий нержавіючої сталі AISI 304 на більш дешеву Ст. 3 і розрахувати абразивний знос холодильника другої ступені. Експериментально підтверджено, що зміна структури та механічних властивостей поверхні труб в умовах роботи холодильника не буде мати місце.

РОЗДІЛ 5

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ВІДХІДНИХ
ГАЗІВ ПЕЧІ З ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ

5.1 Удосконалення теплової схеми охолодження та очищення відхідних газів печей з ЕКШ

Система охолодження та очищення відхідних газів печі ЕКШ залежить від складу та кількості відхідних газів, що обумовлені хімічним складом сировини та її гранулометричним складом. Окрім інертного газу, що забезпечує роботу киплячого шару, додаються леткі у вигляді водню, оксиду вуглецю, випар Fe, Al, Ca, SiC та інші компоненти, що у сумі складають менш 6% (табл. 5.1). Крім того, до складу відхідних газів входить вуглець у вигляді унесення з киплячого шару до 10%.

Таблиця 5.1 Склад компонентів що отримано в результаті термічного очищення антрациту [91], %

Компоненти	H ₂	Ar	CO	C	C ₅ HN	Fe	Al	SiC	Ca	Інші
Склад, %	0,3	50	3,2	38,6	1,1	0,2	0,1	0,2	0,3	6
Температура кипіння, °C	-	-	-	-	-	2862	2518	2700	1483	-

При охолодженні відхідних газів випар металів конденсується та перетворюється у дрібнодисперсний пил розміром менш 3 мкм [92, 93], який дуже складно вловлюється та випадає у виді наростів на поверхні газоходів.

Одним з відомих способів уловлювання дрібнодисперсного пилу [94,95], що утворюється при конденсації випарів, який розроблено для високотемпературних печей металургії, включає додавання до відхідних газів холодних твердих часток з розмірами на порядок більшими (50-250 мкм) на

яких відбувається конденсація випарів. В подальшому ці частки уловлюються у відомих ефективних пиловловлювачах. Саме такий підхід було запропоновано використати при охолодженні та очищенні відхідних газів печі ЕКШ. Водночас штучне запилення потоку повинно відбуватися безпосередньо на виході газів з печі, оскільки температури сублімації металів близькі до температур обробки вуглецевих матеріалів (табл. 5.1). Крім того, штучне запилення приводить до інтенсивного зменшення температури газової суміші та інтенсифікації теплообміну за рахунок випромінювання [96].

Нова схема (рис. 5.1) передбачає наступну послідовність охолодження і очищення відхідних газів. Відхідні гази потрапляють в охолоджувач, в якому відбувається їх охолодження за рахунок радіаційного теплообміну (рис. 5.2). Інтенсивність процесу передачі теплоти забезпечується саме наявністю великої концентрації дисперсного матеріалу, що виноситься з печі та додається штучно.

Кожух теплообмінника виконується із конструкційної марки сталі та передбачає водяне охолодження. Внутрішні стінки теплообмінника захищаються графітовими вставками для унеможливлення прямого контакту високотемпературних газів із металом. З метою запобігання локальному перегріву вхідна частина може містити додатковий прошарок із вуглецевої повсті між графітовою та сталевую стінками.

Вузол має бути розташований вертикально із спадним рухом потоку та додатково обладнується пиловою камерою в нижній частині для забезпечення більш ефективного гравітаційного уловлювання часток. У підсумку, за таких умов можливе осадження до 40-50% пилу від охолоджених газів, швидкість яких буде зменшено у 2,5-3 рази у порівнянні до вхідного патрубку.

Запропонована схема також передбачає можливість додаткового введення холодного дисперсного матеріалу, що має на меті більш глибоке охолодження газу, стабілізацію температури середовища перед котлом утилізатором. Технічне рішення дозволяє у разі необхідності використання

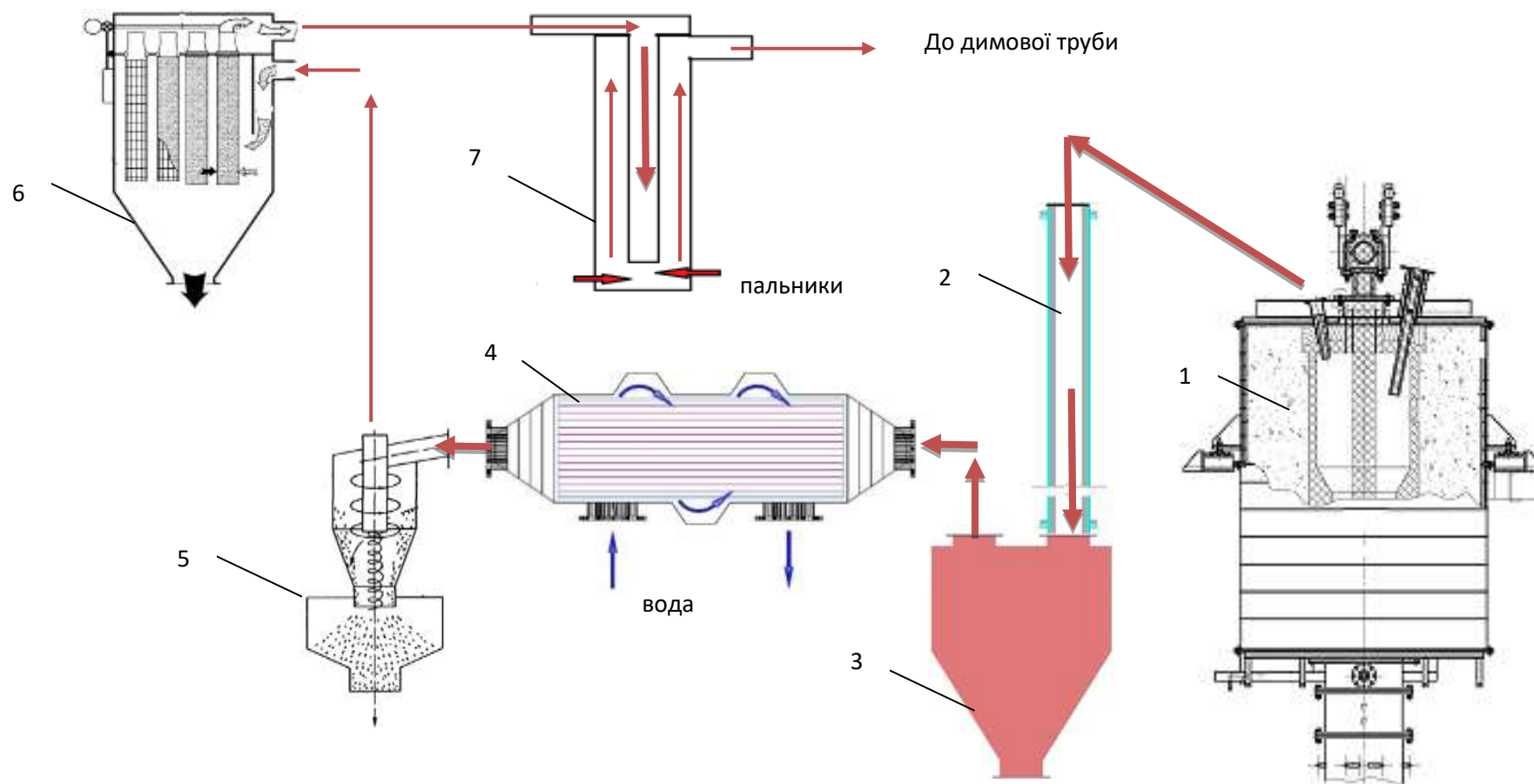


Рисунок 5.1 Удосконалена схема охолодження та очищення відхідних газів печі з ЕКШ: 1 - піч з ЕКШ;
 2 - радіаційний охолоджувач (3000-900°C); 3 - пилова камера; 4 - конвективний охолоджувач (900-300°C);
 5 - водо охолоджуваний циклон; 6 - рукавний фільтр; 7 - допалювач СО та Н₂.

не тільки вуглецевої сировини, як додаткового агенту, але й, наприклад, вапняку або вапна для зв'язування сірки за наявності.

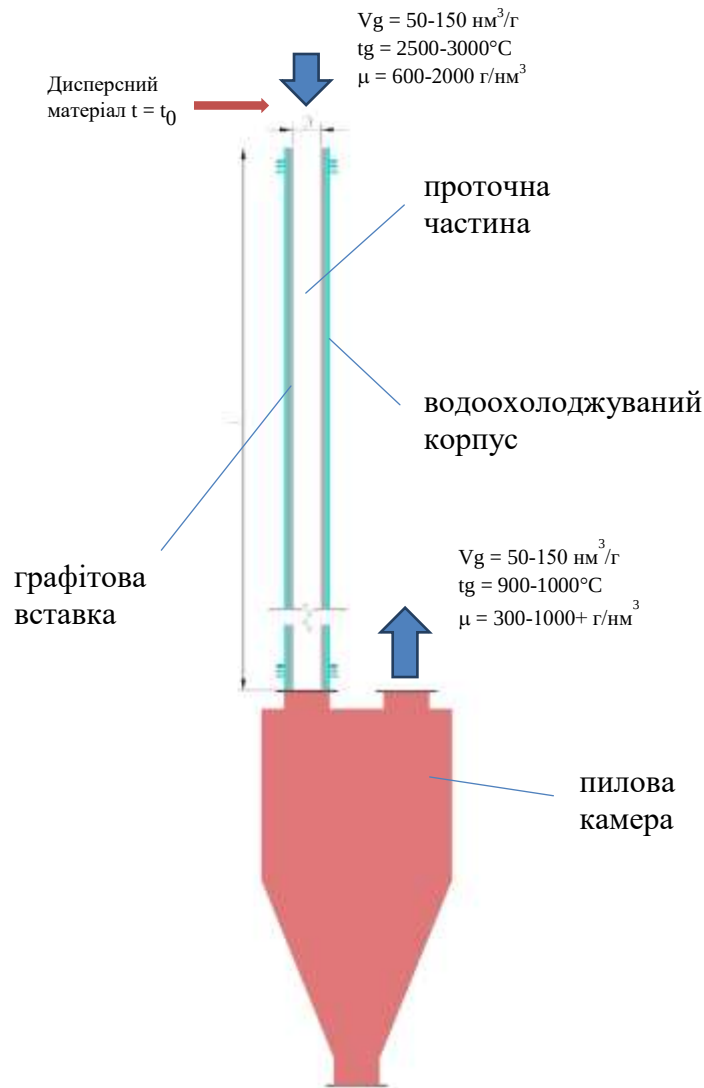


Рисунок 5.2 Схема радіаційного охолоджувача відхідних газів разом із пиловою камерою

Охолоджувач повинен забезпечити зниження температури газів з 3000°C до 1000°C. З такою температурою гази потрапляють до конвективного охолоджувача - котла утилізатора (поз. 4 рис. 5.1), в якому температура знижується до 300°C. Надалі гази потрапляють у водоохолоджуваний циклон, де відбувається очищення газів і їх додаткове охолодження до температури, що забезпечує ефективну роботу рукавного фільтру ($< 180^{\circ}\text{C}$). В рукавному фільтрі відбувається тонке очищення газів, які подаються до допалювача CO і H_2 та димової труби.

Основним агрегатом, що забезпечує роботу системи є радіаційний охолоджувач. Тому розробка конструкції та ефективність його застосування потребує проведення досліджень для визначення його ефективності, довжини теплообмінника та його діаметру, впливу запиленості потоку на охолодження газів.

5.2. Розробка методики дослідження радіаційного охолоджувача

5.2.1. Математичне моделювання процесів охолодження високотемпературного запиленого потоку

Згідно до фізичних процесів, що перебігають у охолоджувачі запропонованої конструкції (рис. 5.2), при моделюванні охолодження високотемпературного дисперсного потоку має враховувати радіаційний та конвективний теплообмін між потоком і стінкою, радіаційний теплообмін всередині запиленого потоку (між окремими об'ємами), перенесення теплоти самим потоком [69,97], а також теплоту фазового переходу при конденсації хімічних сполук.

З огляду на стаціонарність задачі, в якості припущення прийнято до розгляду газо-дисперсну систему як єдиного гомогенного середовища – у межах певного об'єму (зони) теплообмінника, температура пилу та газу однакова. Прийнято модель сірого газу.

Розрахункова схема теплообміну представлена на рис. 5.3. Весь охолоджувач уздовж руху потоку поділений на елементарні об'єми з кроком dl . Для теплообмінника довжиною L кількість розрахункових ділянок для газу та стінки становить відповідно $N = L / dl$. Кожен елементарний об'єм заповнений середовищем із ступенем чорності $\varepsilon_{g,i}(T_{gi}, \mu)$, яка є функцією температури та концентрації часток пилу.

Процес в теплообміннику може бути зведений до наступної системи

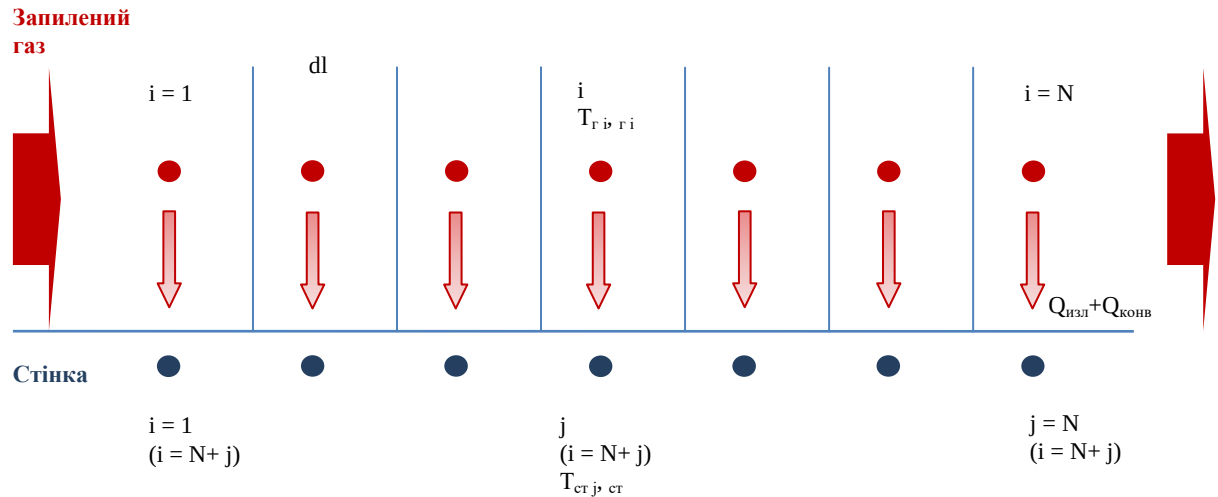


Рисунок 5.3 Розрахункова схема зовнішнього теплообміну у радіаційному охолоджувачі

рівнянь теплового балансу:

- для окремих зон з індексом «i»:

$$Q_{\text{пром},i} + \sum_{k=1}^{2 \cdot N} (c_{г k(i)} \cdot V_{k,i} + c_{м k(i)} \cdot M_{k,i}) \cdot t_{k(i)} + \sum_{j=N+1}^{2 \cdot N} \alpha_{i,j} \cdot F_j \cdot (t_i - t_j) = 0 \quad (5.1)$$

де

k – індекс суміжної зони до зони i , з якою відбувається масообмін;

$t_{k(i)}$ – температура газу в зонах k або i , °C;

t_j – температура поверхні, що межує із зоною i , °C;

$Q_{\text{пром},i}$ – результуючий тепловий потік випромінювання в i -у зону, Вт;

$c_{г k(i)}, c_{м k(i)}$ – ізобарна теплоємність газового потоку та відповідно еквівалентна теплоємність твердої фази в інтервалі температур $0-t_{k(i)}$, Дж/м³°C (Дж/кг°С). Індекси « k » або « i » відповідно до напрямку руху газового потоку: у зону « i » або навпаки. Еквівалентна теплоємність

твердої фази враховує тепловий ефект від конденсації хімічних домішок;

$V_{k,i}$ – об’ємна витрата газу, $\text{м}^3/\text{с}$. В залежності від напрямку руху газу та суміжності зон > 0 , < 0 або $= 0$;

$M_{k,i}$ – масова витрата пилу у газі, $\text{кг}/\text{с}$. В залежності від напрямку руху газу та суміжності зон > 0 , < 0 або $= 0$;

F_j – площа поверхні j , що межує із зоною i , м^2 ;

$\alpha_{i,j}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від зони i на поверхню j , $\text{Вт}/\text{м}^2\text{°C}$.

- для окремих поверхонь « j »:

$$Q_{\text{пром},j} + \sum_{i=1}^N \alpha_{i,j} \cdot F_j \cdot (t_i - t_j) - Q_{\lambda,j} = 0 \quad (5.2)$$

де

$Q_{\text{пром},j}$ – результуючий тепловий потік випромінювання на поверхню j , Вт ;

$Q_{\lambda,j}$ – тепловий потік теплопередачею від внутрішньої стінки охолоджувача до охолоджуючої води через шар захисної ізоляції та сталевго корпусу, Вт .

Ступінь чорноти запиленого газового потоку розраховувалась відповідно до загальноприйнятої методики визначення коефіцієнтів поглинання у котельних агрегатах із пиловими топками [98]:

$$\varepsilon_i = 1 - e^{-k_{\pi} \cdot \mu \cdot L_{\text{эф}} i}, \quad (5.3)$$

$$k_{\pi} = 0,42 \cdot \frac{A}{\rho_{\text{м}}} \cdot 273 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{T_i^2 \cdot d_{\text{ч}}^2}}, \quad (5.4)$$

$$L_{\text{эф } i} = 0,9 \cdot \frac{4 \cdot v_i}{f_i}, \text{ м} \quad (5.5)$$

де

ε_i – ступінь чорноти запиленого газу;

$k_{\text{п}}$ – коефіцієнт ослаблення променів пилом;

μ – концентрація пилу, г/нм³;

$L_{\text{эф } i}$ – ефективна довжина променю, м;

v_i, f_i – об'єм зони та поверхня, що його обмежує, відповідно у м³ та м²;

$\rho_{\text{м}}$ – густина речовини пилу, кг/м³;

T_i – температура газового об'єму, К;

$d_{\text{ч}}$ – діаметр часток пилу, мкм;

$A = 0,14$ – коефіцієнт, який визначається природою матеріалу [3].

У розрахунках випромінювання із поглинаючою середою використовувались так звані узагальнюючі кутові коефіцієнти випромінювання (УККВ), які враховують як взаємно орієнтацію випромінюючих елементів так і поглинаючі властивості газу, що розділяє ці елементи [99].

Водночас, з огляду на спрощену геометрію радіаційного охолоджувача (прямий канал однакового перетину) визначення УККВ здійснювалося за алгебраїчною методикою відповідно до схеми на рис. 5.3 на основі властивостей «взаємності» та «замкненості» кутових коефіцієнтів.

Окрім цього в математичній моделі врахована залежність теплофізичних властивостей газу та матеріалу від температури [100, 101]. Достовірність розробленої математичної моделі обумовлена використанням загально-прийнятих математичних залежностей, даних про теплофізичні властивості речовин, а також дотриманням умов матеріального та теплового балансу у кожному розрахунковому елементі.

Система з $2N$ рівнянь (5.1-5.2) вирішувалась методом ітерацій. Критерієм збіжності рішення виступав модуль нев'язки теплового балансу $< 0,01\%$ між теплотою відданою пиле-газовим потоком та теплотою переданою до охолоджуючої води.

5.2.2. Верифікація та адаптація математичної моделі

В якості модельної задачі для перевірки адекватності розробленої математичної моделі було обрано класичну задачу розрахунку променевого теплообміну на основі зонального методу [99].

З умовами задачі у прямокутну камеру перетином $1 \cdot 1$ м та довжиною 5 м надходять повітря та газоподібне паливо з температурою 300К. Газу рухаються уздовж камери з одночасним виділенням теплоти за рахунок згоряння. Загальне теплове навантаження камери становить 2160 кВт із пропорційним за довжиною розподілом теплової потужності: 2:1:1:0:0. Ступінь чорноти факелу та продуктів згоряння дорівнювала 0,1746; температура стінок камери 300К.

Результати порівняльного розрахунку температури газів у камері представлені в Додатку Г, з якого випливає, що математична модель якісно та кількісно описує процеси радіаційного теплообміну під час руху високотемпературного дисперсного середовища в каналах з охолоджуваними стінками. Відносна похибка розрахунку температури газів для умов поділу каналу на 5 та 10 розрахункових зон перебуває у межах $-2,3$ – $+1,8\%$, що свідчить про відсутність принципових помилок при розрахунку.

Для визначення величини розрахункових зон, що забезпечують достатню точність розрахунків було вирішено тестову задачу з наступними даними: довжина теплообмінника 5 м, $t_r = 2500^\circ\text{C}$; $V_r = 50 \text{ нм}^3/\text{Г}$; $\mu = 2000 \text{ г/нм}^3$; $d_q = 100 \text{ мкм}$; $D = 0,05 \text{ м}$; $\mu_+ = 0 \text{ г/нм}^3$. Розрахунковий крок уздовж апарата дорівнював 50-500 мм. Відповідно кількість розрахункових точок змінювалась в діапазоні 10-100.

Отримані результати співставлення температур високотемпературного потоку наведені у Додатку Г (табл. Г2). У дослідженому діапазоні подрібнення кроку елементарного осередку має місце сталість чисельного рішення розробленої моделі, оскільки температури у контрольних точках відповідають одна одній. Зменшення кроку з 500 мм до 62,5 мм призводить до поступового зниження відхилення рішення відносно базисної точки $dl = 50$ мм, $n = 100$ з 6,4-8,2% до 0,2-0,24%. При чому в абсолютному вимірі величина відхилення кінцевої температури газу у 4°C має місце для умов $dl = 100$ мм, $n = 50$. Останнє було використано при моделюванні.

5.3. Дослідження впливу режимних та геометричних параметрів на роботу радіаційного охолоджувача

Діапазон зміни вихідних параметрів у дослідженнях був прийнятий наступним: температура газу на виході з печі ЕКШ $t_{\Gamma} = 2500-3000^{\circ}\text{C}$; витрата відхідних газів з печі $V_{\Gamma} = 50-150 \text{ нм}^3/\text{г}$; концентрація пилу у газі $\mu = 400-2000 \text{ г/нм}^3$; діаметр часток пилу $d_{\text{ч}} = 100-300 \text{ мкм}$; внутрішній діаметр проточної частини теплообмінника $D = 0,05-0,4 \text{ м}$; додаткове «запилення» потоку холодним матеріалом прийнято на рівні $\mu_{+} = 0-2000 \text{ г/нм}^3$.

Товщина графітової футеровки та сталевого кожуху відповідно дорівнювали 50 мм та 5 мм. Коефіцієнт теплопередачі з боку води дорівнювала 1500 Вт/мК .

На рис. 5.4 представлено типове розрахункове температурне поле в точках по газу t_{Γ} , на внутрішній поверхні $t_{\text{ст вн}}$ та зовнішній поверхні з боку води $t_{\text{ст зов}}$ в радіаційному охолоджувачі. Для прийнятих базових умов температура газів на виході із теплообмінника довжиною у 5 м складає близько 600°C . Температура 1000°C досягається за 2,5-3,0 м по ходу газів.

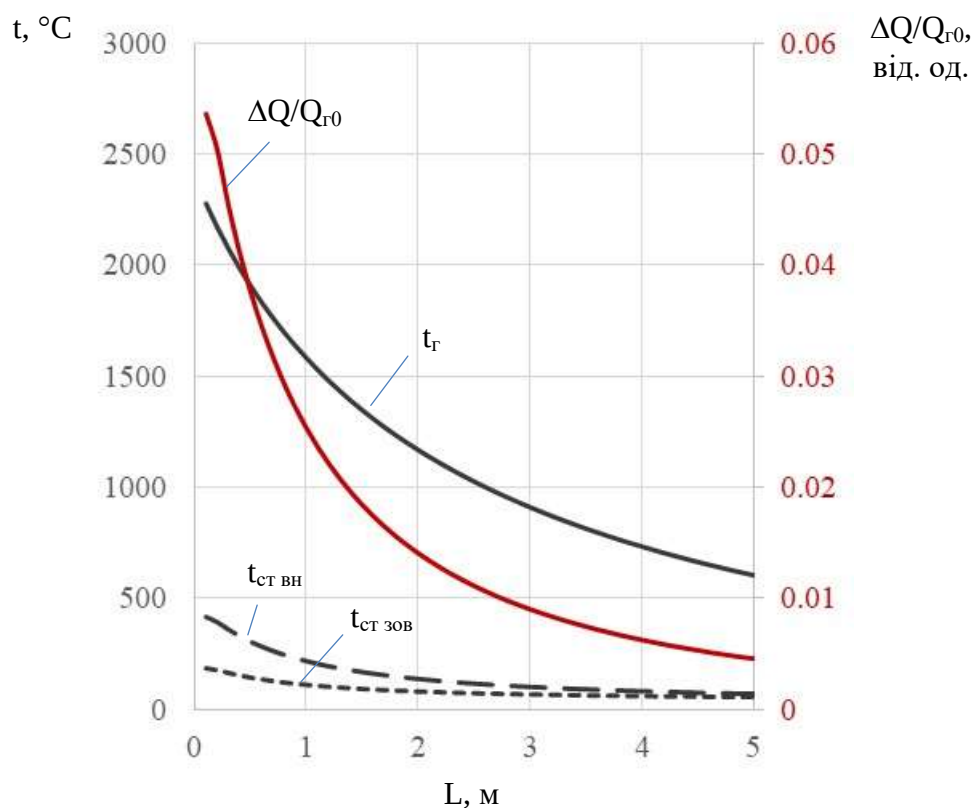


Рисунок 5.4 Температурне поле в радіаційному охолоджувачі відхідних газів: $t_r = 2500^\circ\text{C}$; $V_r = 50 \text{ нм}^3/\text{Г}$; $\mu = 2000 \text{ Г/нм}^3$; $d_{\text{ч}} = 100 \text{ мкм}$; $D = 0,05 \text{ м}$; $\mu_+ = 0 \text{ Г/нм}^3$

Теплова ефективність апарату (Q/Q_{r0}) досягає 80,7%. Найбільша інтенсивність радіаційного теплообміну й відповідно охолодження газів спостерігається на першому метрі руху газів, де вони втрачають майже 50% відсотків свого теплового потенціалу.

Слід також зауважити, що уздовж перших 1,0-1,5 м зовнішньої стінки охолоджувача, яка контактує безпосередньо з водою, температура приймає значення 90-188°C. Отже у розробці необхідно враховувати цю особливість або шляхом створення додаткового штучного термічного опору за рахунок теплоізолюючих вкладишів між графітовою та сталевою стінкою, або за рахунок підвищення коефіцієнту тепловіддачі до води.

Збільшення початкової температури запиленних газів в інтервалі 2500-3000°C (рис. 5.5). майже не впливає на кінцеву температуру потоку – $t_r = 605\text{-}633^\circ\text{C}$. Таким чином, з урахуванням теплової інерційності внутрішньої

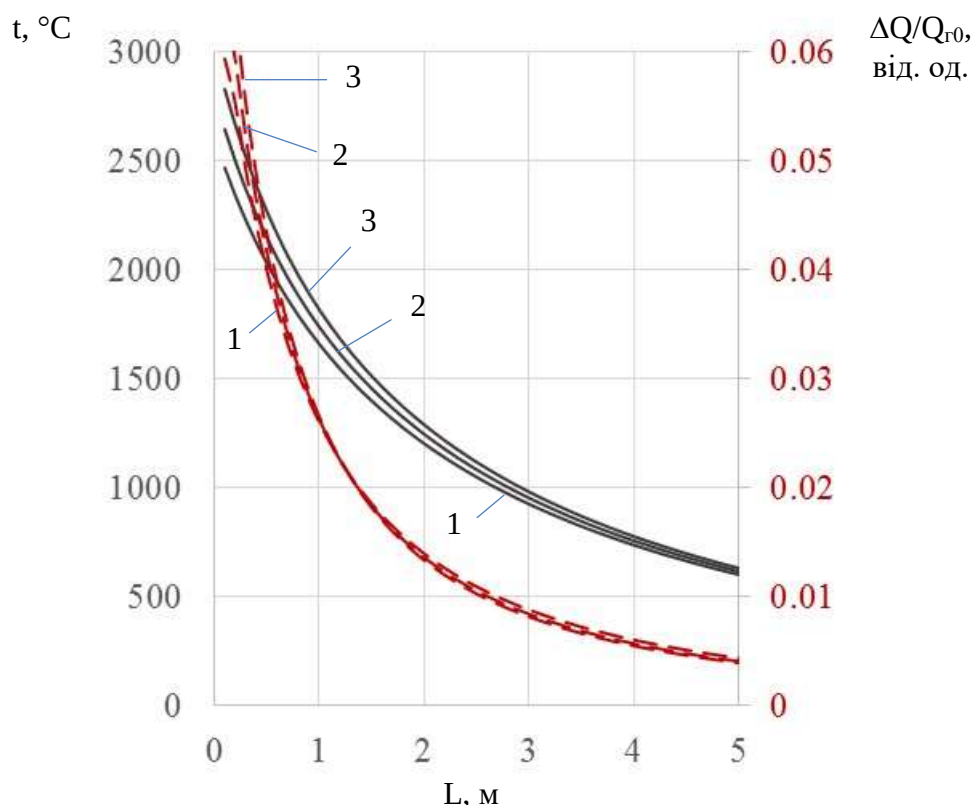


Рисунок 5.5 Вплив зміни температури відхідних газів з печі ЕКШ на їх охолодження у радіаційному охолоджувачі: 1 – $t_r = 2600^\circ\text{C}$; 2 – $t_r = 2800^\circ\text{C}$; 3 – $t_r = 3000^\circ\text{C}$

оснащення слід очікувати стабільність цього параметру відносно коливань температури на вході.

Збільшення діаметру проточної частини показало помітну залежність глибини охолодження від цього показника (рис. 5.6) Для каналу розміром 400 мм температура потоку $900\text{--}1000^\circ\text{C}$ досягається вже по довжині $0,3\text{--}0,4$ м. А розрахункова температура на виході з теплообмінника доходить до 86°C при довжині 5 м.

Вплив розміру каналу проявляється через два механізми. По-перше, пропорційне збільшення загальної поверхні, що відводить теплоту. По-друге, збільшення так званої ефективної довжини променю, яка сприяє зростанню ступеню чорності випромінюючих об'ємів. Саме цими двома факторами пояснюються такий вплив і підвищення теплового потоку від газів, через це

розрахункова температура стінки з боку води за прийнятих умов збільшується

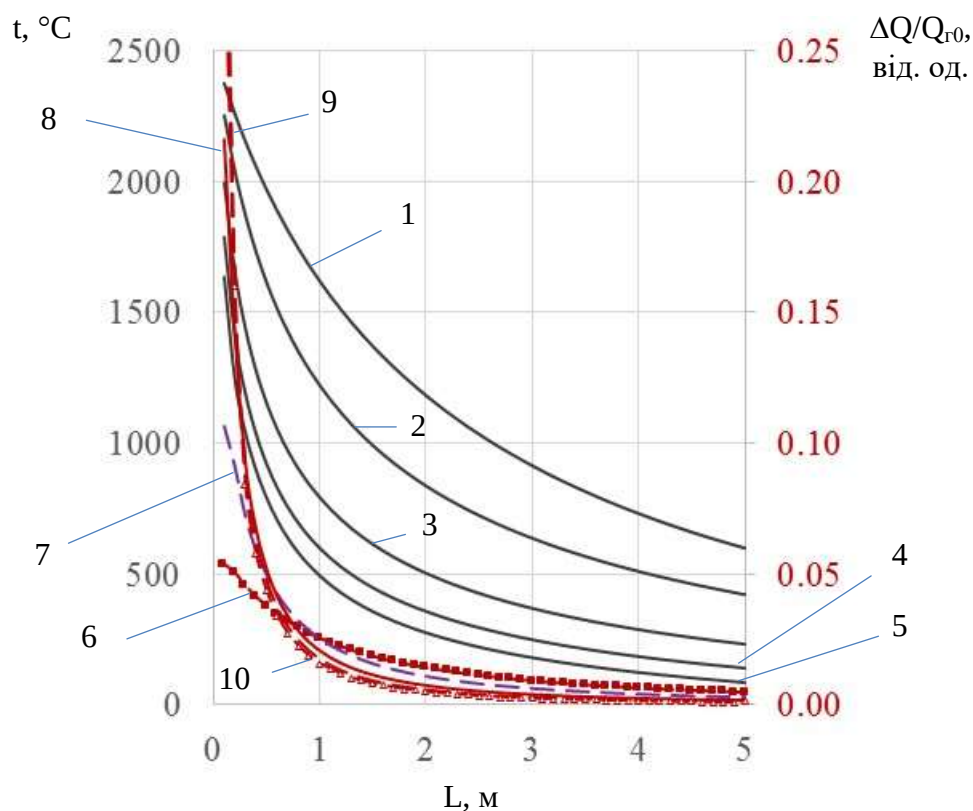


Рисунок 5.6 Вплив зміни діаметру проточної частини радіаційного охолоджувача на його ефективність: 1-5 – t_r ; 6-10 – $\Delta Q/Q_{r0}$; 1, 6 – $D = 50$ мм; 2, 7 – $D = 100$ мм; 3, 8 – $D = 200$ мм; 4, 9 – $D = 300$ мм; 5, 10 – $D = 400$ мм.

до 279°C , що потребує додаткових заходів для зменшення температури газів шляхом штучного запилення потоку.

Значний вплив на ефективність охолодження газів має збільшення витрати газу. Кінцева температура на довжині 5 м збільшується з 600 до 987°C при рості витрат газу з 50 до $150 \text{ м}^3/\text{год}$, а ефективність холодильника зменшується з $80,7\%$ до $65,3\%$. Проте в абсолютному вимірі теплове навантаження навпаки збільшується майже в $2,5$ рази. Отже цей фактор суттєво впливає на показники роботи та потребує обов'язкового врахування у розробці конструкції.

Зменшення концентрації пилу у відхідних газах з $400\text{--}2000\text{ г/нм}^3$ супроводжується пропорційним зниженням теплового потенціалу газу оскільки витратні теплоємності твердої та газової фази співставні за прийнятих умов (доля теплового потенціалу твердої складає 40-70%). З іншого боку це призводить до менших значень ступеню чорності потоку, тобто відповідно погіршує радіаційний теплообмін з позвехньою. Водночас це приводить до покращує теплообмін у осьовому напрямку. Таким чином протилежна взаємодія перелічених факторів у підсумку дає лише зменшення кінцевої температури з 600°C до 400°C (рис.5.7) Відносна доля відведеної теплоти збільшується і становить 87,1% проти 80,7% у базовому варіанті.

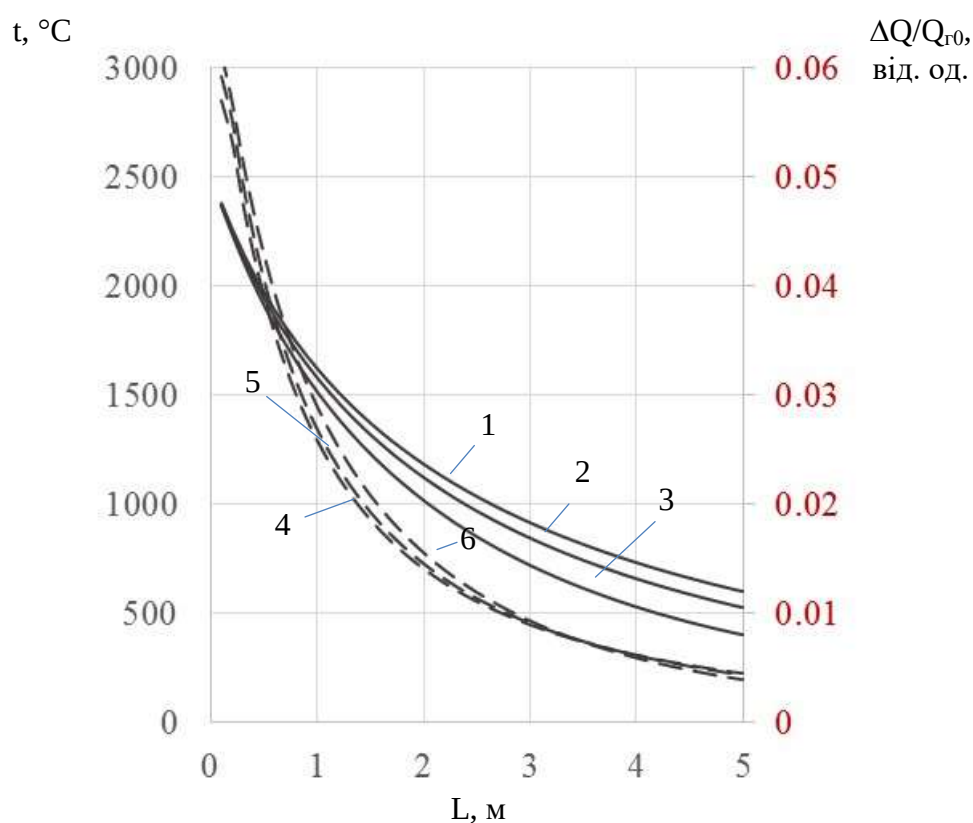


Рис. 5.7 Вплив зміни концентрації пилу на ефективність радіаційного охолоджувача: 1-3 – t_r ; 4-6 – $\Delta Q/Q_{r0}$; 1, 4 – $\mu = 2000\text{ г/нм}^3$; 2, 5 – $\mu = 1200\text{ г/нм}^3$; 3, 6 – $\mu = 400\text{ г/нм}^3$.

Аналогічним чином проявляється взаємодія зазначених факторів при додатковому запиленні потоку (рис. 5.8). Застосування заходу дозволяє зменшити температуру газів на вході з 2500°C до 1500°C при штучному запиленні до $\mu^{+} = 2000 \text{ г/нм}^3$. Таким чином, температура дисперсної середовища після штучного запилення знижується менш ніж температура десублімації основних видів випарів (табл.5.1) що відходять з печі. Кінцева температура при довжині 5 м залишається практично на тому ж рівні $583\text{-}600^{\circ}\text{C}$, що і в базовому варіанті, а теплова ефективність роботи теплообмінника знижується майже на 15% що пов'язано з зменшенням температурного напору при штучному запиленні.

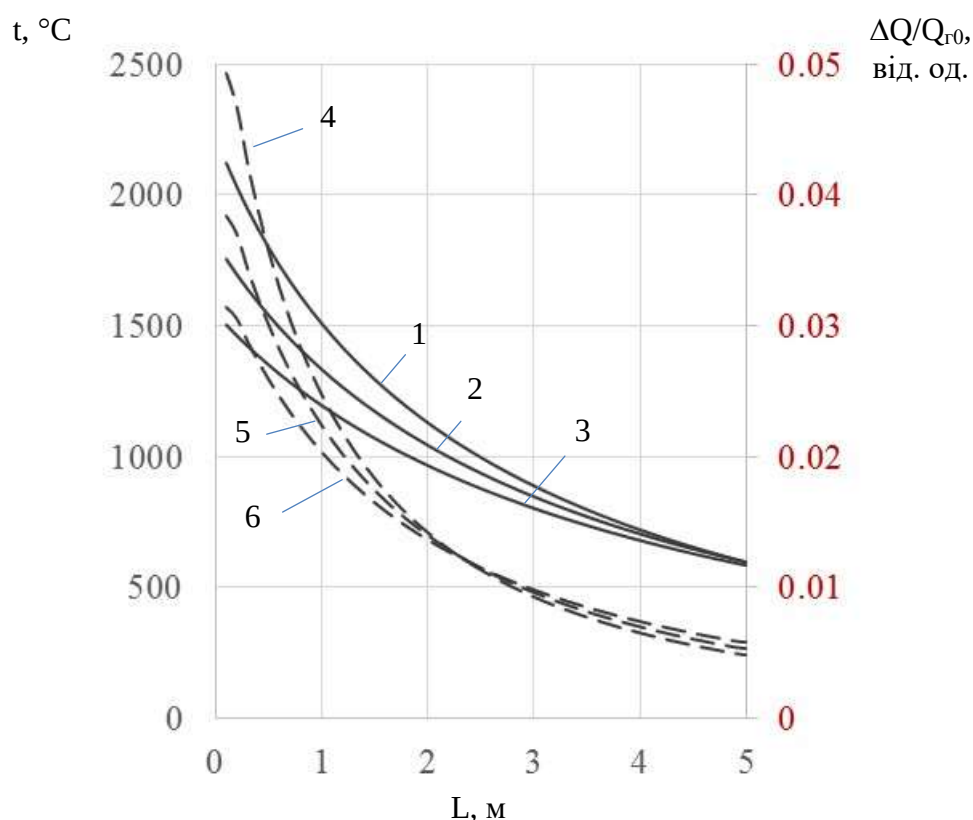


Рисунок 5.8 Вплив штучного запилення на роботу радіаційного охолоджувача: 1-3 – t_r ; 4-6 – $\Delta Q/Q_{r0}$; 1, 4 – $\mu^{+} = 400 \text{ г/нм}^3$; 2, 5 – $\mu^{+} = 1200 \text{ г/нм}^3$; 3, 6 – $\mu^{+} = 2000 \text{ г/нм}^3$.

Максимальна температура стінки з боку води при запиленні зменшується до 130°C . У підсумку можна зазначити, що у дослідженому діапазоні доцільність додаткового запилення дозволяє вирішити комплексні завдання роботи радіаційного охолоджувача: забезпечити десублімацію випарів на штучному пилу, зменшити теплове навантаження на теплообмінні поверхні на його вході і забезпечити ефективне охолодження газів до заданої температури.

Висновки розділу:

1. Запропоновано технологічну схему охолодження і очищення відхідних газів печі ЕКШ для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів. Схема виключає допалення відхідних газів і містить радіаційний охолоджувач поверхневого типу, конвективний холодильник (котел-утилізатор), водоохолоджуваний циклон, рукавний фільтр, допалювач.

2. Розроблено стаціонарну зональну математичну модель радіаційного охолоджувача високотемпературного запиленого газу в інтервалі температур $3000-900^{\circ}\text{C}$, яка враховує: змінні теплофізичні властивості теплоносіїв; теплоту фазового переходу речовин; перенесення теплоти між потоком та стінками, а також в середині потоку за рахунок радіаційного та конвективного теплообміну.

3. Виконано верифікацію математичної моделі радіаційного охолоджувача високотемпературного запиленого газу на основі вирішення відомої задачі теплообміну у камері горіння. Доведено, що модель дає задовільні результати з похибкою у межах $-2,3-+1.8\%$. Обґрунтовано довжину розбиття каналу на елементарні осередки $dl < 100$ мм, що забезпечує розрахунки з похибкою $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

4. Проведені параметричні дослідження теплової роботи радіаційного охолоджувача умовною довжиною 5 м, із товщиною графітової та сталевий

стілки 50 мм й 5 мм відповідно за певних умов зовнішнього охолодження $\langle = 1500 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, в діапазоні параметрів: початкової температури $t_r = 2500\text{-}3000^\circ\text{C}$; витрати відхідних газів $V_r = 50\text{-}150 \text{ нм}^3/\text{г}$; концентрації пилу $\mu = 400\text{-}2000 \text{ г/нм}^3$; діаметру часток пилу $d_q = 100\text{-}300 \text{ мкм}$; внутрішнього діаметру проточної частини теплообмінника $D = 0,05\text{-}0,4 \text{ м}$; додаткового «запилення» потоку холодним матеріалом прийнято на рівні $\mu_+ = 0\text{-}2000 \text{ г/нм}^3$. В результаті чисельних експериментів визначено наступне:

- радіаційний охолоджувач відхідних газів печей ЕКШ забезпечує ефективне охолодження до температури $500\text{-}600^\circ\text{C}$ у дослідженому діапазоні параметрів, при цьому ефективність теплообмінника складає 65-85%;

- найбільша інтенсивність радіаційного теплообміну й відповідно охолодження газів спостерігається на першому метрі руху газів, де вони втрачають майже 50% відсотків свого теплового потенціалу, але це приводить до зростання температури водо охолоджуваної сталеві поверхні більш 100°C , що потребує додаткових заходів запобігаючи кипінню теплоносія;

- основними факторами, які впливають на роботу теплообмінника є довжина і діаметр робочого каналу, витрати інертного газу в печі та концентрації пилу у газовому потоці;

- застосування штучного запилення відхідних газів дозволяє зменшити температуру з 2500°C до $2100\text{-}1500^\circ\text{C}$ при штучному запиленні до $\mu_+ = 400\text{-}2000 \text{ г/нм}^3$, тобто нижче температури десублімації випарів. Кінцева температура при довжині 5 м залишається практично на тому ж рівні $583\text{-}600^\circ\text{C}$, що і в базовому варіанті, а теплова ефективність роботи теплообмінника знижується майже на 15% що пов'язано з зменшенням температурного напору при штучному запиленні.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу конструкцій печей з електротермічним киплячим шаром запропоновано їх класифікацію за конструктивними та технологічними ознаками в тому числі за: температурою термічної обробки, напрямком руху електричного струму через киплячий шар, типом газорозподільчих решіток, схемою організації поточного процесу, системою охолодження готового продукту, системою охолодження та очищення відхідних газів.

2. На основі експериментальних досліджень аеродинамічних режимів роботи печей з ЕКШ на холодній моделі отримано наступні результати:

- визначено 5-ть характерні режими існування киплячого шару: щільний та нерухомий шар, перехідний режим, малоінтенсивний та інтенсивний режим роботи. Останній забезпечує інтенсивне перемішування матеріалу у робочій камері та забезпечує рівномірність температурного поля при нагріві електричним током.

- для реалізації інтенсивного режиму киплячого шару необхідно підвищення середньої пробності шару до 0,55-0,65. З метою розрахунку необхідної швидкості газу для забезпечення цієї умови можливо використовувати залежність $\varepsilon = f(Re)$ рекомендовану [61], яка дозволяє отримати результати з похибкою не більш 20%.

3. На основі проведених досліджень розроблено методику розрахунку печей з електротермічним киплячим шаром для термічної обробки вуглецевих матеріалів, що включає розрахунки аеродинамічного режиму роботи, матеріального та теплового балансів.

4. Визначено основні технічні показники печі, потужність, витрати інертного газу, води охолодження та основні конструктивні розміри пілотної печі продуктивністю печі 10 кг/год, з використанням яких розроблено та виготовлено піч та проведено її випробування, які показали принципову можливість нагріву матеріалу у електротермічному киплячому шарі.

5. Аналіз конструкцій холодильників для дисперсних матеріалів у щільному шарі показав, що для охолодження вуглецевих матеріалів після печі ЕКШ доцільно використовувати двоступеневу схему: перша ступінь – прямо трубний холодильник з паралельними каналами, друга ступінь – перехреснотоківий холодильник з шаховим розташуванням водоохолоджуваних труб. Інтенсифікація процесу охолодження готового продукту в прямо трубних холодильниках першого ступеня можлива за рахунок зменшення діаметру каналів та використання секцій, що забезпечують перемішування матеріалу.

6. На основі математичного моделювання отримано залежність безрозмірної середньомасової температури вуглецевого матеріалу при охолодженні в прямотрубному холодильнику від режимних та конструктивних параметрів холодильника (швидкості руху матеріалу, діаметру каналів охолодження, кількості секцій безперервного руху та їх висоти). Залежність може бути використана для оптимізації показників роботи холодильника подібного типу.

7. Запропоновано методику розрахунку перехреснотоківого холодильника готового продукту з температурами 900-300°C, на основі якої розроблено та виготовлено холодильник продуктивністю 1000 кг/год.

8. На основі експериментальних досліджень абразивного зносу при переміщенні готового вуглецевого продукту по металевій поверхні встановлено, що при малих тисках Ст. 3 більш стійка до зносу при терті о порошок коксу, ніж нержавіюча сталь AISI 304. При тисках більше 30 кПа стійкість до зношування сталі AISI 304 стає вище. Зміни у відносній стійкості до зношування сталей Ст. 3 і AISI 304 пояснюються відмінністю в характері зміцнення при деформації. Отримані дані дозволили обґрунтувати вибір сталі та розрахувати абразивний знос холодильника другої ступені.

9. Запропоновано технологічну схему охолодження та очищення відхідних газів печі ЕКШ для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів. Схема виключає допалення відхідних газів і містить радіаційний

охолоджувач поверхневого типу, конвективний холодильник (котел утилізатор), водоохолоджуваний циклон, рукавний фільтр, димову трубу.

10. Розроблено стаціонарну зональну математичну модель радіаційного охолоджувача високотемпературного запиленого газу в інтервалі температур 3000-900°C, на основі якої визначено:

- радіаційний охолоджувач відхідних газів печей ЕКШ ефективно охолоджує дисперсний потік до температури 500-600°C у дослідженому діапазоні параметрів, при цьому ефективність теплообмінника складає 65 -85%;

- найбільша інтенсивність радіаційного теплообміну й відповідно охолодження газів спостерігається на першому метрі руху газів, де вони втрачають майже 50% відсотків свого теплового потенціалу, але це приводить до зростання температури водоохолоджуваної сталевий поверхні більш 100°C, що потребує додаткових заходів запобігаючи кипінню теплоносія;

- основними факторами що впливають на роботу теплообмінника є довжина і діаметр робочого каналу, витрати інертного газу в печі та концентрації пилу у газовому потоці;

- застосування штучного запилення відхідних газів дозволяє: зменшити температуру з 2500°C до 2100-1500°C при штучному запиленні до $\mu^+ = 400 - 2000$ г/м³, тобто нижче температури десублімації випарів; зменшити температуру водоохолоджуваної стінки корпусу при практично на тому ж рівні температури газу на виході 583-600°C.

Список використаних джерел

1. Фиалков А.С. Углеграфитовые материалы: Москва: Энергия, 1979, 320 с.
2. Петров Б.Ф. Энеросбережение при производстве электродного термоантрацита : Київ: Екотехнолгія, 2006, 144с.
3. Печи для производства высокочистых углеродных материалов / Губинский М.В., Федоров С.С., Ливитан Н.В., [та ін.]// Теория и практика тепловых процессов в металлургии : Міжнародна науково–практична конференція (18-21 сентября 2012, Екатеринбург), Екатеринбург, УрФУ, 2012. С. 79-83.
4. Harold Schobert. Chemistry of fossil fuels and biofuels : Cambridge University Press, 2013. 480с
5. Анализ энергетической эффективности печей для высокотемпературной термической обработки углеродных материалов / М. В. Губинский, С. С. Федоров, Н. В. Ливитан, А. Г. Гогоци [та ін.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. № 2. С. 92-96.
6. Печі з електротермічним киплячим шаром. Конструктивні особливості А.В. Сибір , М.В. Губинський, С.С. Федоров, С.М. Губинський, О.Г. Гогоці // Металургійна та гірничорудна промисловість. 2020. № 2. С. 42-61
7. Gupta C., Sathiyamoorthy D. Fluid bed technology in materials processing. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1999. 528 p.
8. Забродський С.С. Високотемпературні установки з псевдозрідженим шаром: М.: Енергія, 1971. 328 с.
9. Мониторинг применения огнеупорных материалов на предприятиях республики Беларусь / Волочко А.Т., Шипко А.А., Демин Н.И., Будзинская А.В.// Литье и металлургия. 2011. №4. С. 53-59.
10. Кащеев И.Д. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок /

Справочное издание, Кн.1. М., Интермет Инжиниринг, 2000. 663 с.

11. Process and apparatus for the direct reduction of Iron oxides in an electrothermal fluidized bed and resultant product: pat. WO/2003/080874 US ; № PCT/US2003/008347; fil. 19.03.2003; pub. 02.10.2003. 5 p.

12. Tuot James. Prodaction of TiC in an electrothermal fluidized bed. Department of Chemical Engineering : McGi11 University, 1976. 680 p.

13. Method for the continuous production of carbides: pat. 4543240 US : № 06/691076; fil. 01.14.1985; pub. 09.24.1985. 4 p.

14. Способ и установка для получения карбида кремния: пат.2015/ЕА/0077 ВУ ; Заявка № 027539; подан. 2015.05.07; опубл. 2017.08.31, Бюл. №08. 4 с.

15. Технологические решения в_производстве карбида циркония: анализ, оценка состояния и_перспектив / Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. № 23(1). С. 256-270.

16. Knowlton, T.M., Pulsifer, A.H. and Wheelock, T.D. Coal char gasification in an electrofluid reactor // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 1969.№ 8(4). P. 539.

17. Electric direct heating method metallic pieces: pat. 306034 US ; № US3060304A; fil. 19.10.1959; pub. 23.10.1962. 3 p.

18. Manieh A., Scott D. S. and Spink D. R. Electrothermal Fluidized Bed Chlorination of Zircon // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 1974. № 52. P. 507-514.

19. Исследование процесса получения водорода пиролизом углеводородов в аппарате с электротермическим псевдооживленным флюидом. Кажан А.П., Богомолов В.А., Ховавко А.И. [та ін.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. №2. С. 27-31.

20. Капсулирование кварцевого песка пироуглеродом в электротермическом псевдооживленном слое. Богомолов В.А., Кажан А.П.,

Бондаренко Б.И. [та ін.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2013. № 5. С. 33-36.

21. Advanced Green Petroleum Coke Calcination in an Electrothermal Fluidized Bed Reactor Kozlov A., Chudnovsky Ya., Khinkis M., Yuan H., Mark Zak M // EPD Congress. 204,(17 January 2014) . P. 1-8.

22. Electrothermic fluidzed bed process: pat. 3499947A US ; № US3499947A; fil. 05.08.1968; pub. 03.10.1970. 4 p.

23. Electrothermic fluidzed bed apparatus: pat. US3006838A; № US759769A; fil. 09.08.1958; pub. 31.10.1961. 4 p.

24. Реактор с электротермическим кипящим слоем: пат. SU 1223989A ; Заявка № 027539; подан. 1984.07.10; опубл. 1986.15.04. Бюл. №14. 4 p.

25. Реактор для піролізу газоподібних вуглеводнів: пат. UA 83147; Заявка № и 2013 03318; подан. 2013.18.03; опубл. 2013.27.08. Бюл. №16. 4 p.

26. Реактор для високотемпературних процесів у псевдозрідженому шарі: пат. UA 117157; Заявка № а 2013 06499; подан. 2015.01.07; опубл. 2017.26.06. Бюл. №12. 4 p.

27. Апарат для непосредственного нагрева псевдоожиженного слоя: пат. SU 181211; Заявка № 181211; подан. 1965.07.04; опубл. 1966.15.04. Бюл. №9. 2 с.

28. Способ электротермической переработки дисперсного материала в псевдоожиженном слое и устройство для его осуществления: пат. 2663425 RU; Заявка № 0002663425; опубл. 2018.06.08. 6 p.

29. Method for heat treating carbonaceous material in a fluidized bed: pat. 4160813 US ; № US59211875A; fil. 21.07.1978; pub. 10.06.1979. 4 p.

30. Method and apparatus for heat treatment of particulates in an electrothermal fluidized bed furnace and resultant products: pat. US20050062205A1; № US10/666,614; fil. 18.09.2003; pub. 24.03.2005. 4 p.

31. Реактор для високотемпературних процесів у псевдозрідженому

шарі: пат. UA 108964; Заявка № u 2015 00065; подан. 2015.01.07; опубл. 2016.10.08, Бюл. №15. 4 с.

32. Електротермічна піч псевдозрідженого шару: пат. UA 107972; Заявка № u 2016 00086; подан. 2016.04.01; опубл. 2016.24.06, Бюл. №12 – 4 с.

33. Федоров, С. С., Губинский, М. В., Форись, С. Н. Выбор размеров рабочего пространства электротермических печей кипящего слоя для переработки углеродных материалов // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2014. № 4. С. 87-90.

34. Реактор с электротермическим кипящим слоем: пат. SU 1003878; Заявка № 1003878; подан. 1981.02.04; опубл. 1983.15.03, Бюл. №10. 2 с.

35. Установка с электротермическим кипящим слоем: пат. SU 423861; Заявка № 423861; подан. 1971.03.05; опубл. 1974.15.04, Бюл. №14 – 2 с.

36. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник/ Под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. Л.: Химия, 1986. 352 с

37. Kevin J. Albrecht¹, Clifford K. Ho High-Temperature Flow Testing and Heat Transfer for a Moving Packed-Bed Particle/sCO₂ Heat Exchanger // AIP Conference Proceedings 2033, 040003, 2018, (Published Online: 08 November 2018) , 9 p. <https://doi.org/10.1063/1.5067039>

38. INDIRECT-HEAT THERMAL PROCESSING OF PARTICULATE MATERIAL: пат. EP 2 032 925 B1; Application number: 07719677.2; Date of filing: 03.05.2007; Date of publication of application: 11.03.2009 Bulletin 2009/11

39. Sutherland N., Nix A. INNOVATIVE COOLING SOLUTION FOR BIOSOLIDS / 20th European Biosolids & Organic Resources Conference & Exhibition (Nov 9th- 11th, 2015)

40. HEAT EXCHANGER FOR COOLING OR HEATING BULK SOLIDS: пат. : US 2018 / 0347918 A1; Appl . No . : 16 / 059 , 984; Filed : Aug . 9 , 2018 ; Pub . Date : Dec . 6 , 2018

41. HEAT EXCHANGER FOR COOLING BULK SOLIDS: pat. US 9.459,054 B2; Appl. No.: 13/464,793 ; Filed: May 4, 2012; Date of Patent: Oct. 4, 2016
42. . Морев А.А., Мракин А.Н., Селиванов А.А.Т еплотехнические аспекты использования зольных теплообменников в схемах комплексной энерготехнологической переработки сернистых горючих сланцев // Проблемы энергетики. 2015. № 5-6, С. 60-65
43. T. Baumann, S. Zunft Development and performance assessment of a moving bed heat exchanger for solar central receiver power plants // Energy Procedia. 69. 2015. P. 748 – 757
44. J. Niegsch, D. Kiineke and P.-M. Weinspach Heat transfer and flow of bulk solids in a moving bed// Chemical Engineering and Processing. 33. 1994. P. 73-89
45. Hiromi Takeuchi. Particles Flow Pattern Around Tube and Local in Moving Heat Transfer Bed// AIChE Journal June. 1996. Vol. 42, No. 6. P. 1620-1626.
46. Thermal Process .Moving Bed Cooler URL <http://www.grenzebach.com> (дата звернення 30.07.2021)
47. Горбис З.Р., Календарьян В.А. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями. М. Энергия , 1975. 296с
48. Крючков Е.Н. Исследование теплообменников для охлаждения сыпучих материалов: дис. ... кандидата технічних наук. Дніпропетровськ, 1972.
49. Детков С.П., Еринов А.Е. Тепловые процессы в печных агрегатах алюминиевой промышленности. Київ: Наук. Думка, 1987. 272с.
50. Van den Hil, M.J. Screw Heat Exchangers: Thermal Process by Means of Screw Conveyors. 2017 URL www.celsiusprocessing.com/downloads/lezing_bulk_europe.php. (cited 2017 3 August)

51. Waje S. S., Thorat B. N. & Mujumdar A. S. Screw Conveyor Dryer: Process and Equipment Design, *Drying Technology // International Journal/* 2007. 25:1, P.241-247, DOI: 10.1080/07373930601161112
52. Waje S. S., Thorat B. N. & Mujumdar A. S. An Experimental Study of the Thermal Performance of a Screw Conveyor Dryer, *Drying Technology // International Journal.* 2006. 24:3, P. 293-301, DOI: 10.1080/07373930600564506
53. Cooling/Heating Screw Conveyors [URL](https://showes.com/equipment/heating-cooling-for-screw-conveyors/) (дата
звернення 30.07.2021)
54. Повышение эффективности системы очистки отходящих газов высокотемпературной печи для обработки углеродных материалов. /Кутицкая, Е. А., Губинский, М. В., Федоров, С. С., Гогоци, А. Г. // (2015). IV научно-практической конференции «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» : Сборник докладов, Екатеринбург, 2015. С.62-65.
55. Ахметов М.М. Электрокальцинаторы – печи для осуществления химико-технологических процессов. Уфа : БашНИИ НП, 1991. 68с.
56. Бородуля, В. А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. Минск: Наука и техника, 1973. 176с.
57. Сімейко К.В. Науково-технологічні основи високотемпературних процесів у електротермічному псевдозрідженому шарі : дис. ... доктора технічних наук. Львів, 2020. 391с.
58. Выбор аэродинамических режимов работы высокотемпературных печей электротермического кипящего слоя./ Губинский, М. В., Федоров, С. С., Ливитан Н. В. [та ін.] // *Металлургическая теплотехника: сборник трудов Национальной металлургической академии Украины.* 4(19). С. 55-61.
59. 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 (STUDY OF AERODYNAMIC PROPERTIES OF CONTINUOUS HIGH TEMPERATURE REACTORS) //

ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. 2013. 1B. V01BT10A036. doi:10.1115/fedsm2013-16630.

60. HANDBOOK of FLUIDIZATION and FLUID-PARTICLE SYSTEMS/ edited by Wen-Ching Yang URL <http://www.dekker.com/>

61. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия, 1981. 296с.

62. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. М.: Химия , 1972. 240с

63. Arnaldos J., Casal J. Prediction of transition velocities and hydrodynamical regimes in fluidized beds // Powder Technology. 1996. V. 86. P. 285-298

64. Ходунков В.П. Методы и устройства для исследования тепловых и гидродинамических процессов в дисперсных потоках: дис. ... кандидата технических наук. Спбкт-Петербург, 2011

65. Дослідження режимів роботи пілотної електротермічної печі киплячого шару продуктивністю 10 кг/год / С. С. Федоров, А. В. Сибір, М. В. Губинський, [та ін.] // Металургійна та гірничорудна промисловість. 2019. № 3-4. С. 48-55.

66. Ultrahigh-Temperature Continuous Reactors Based on Electrothermal / Fluidized Bed Concept Fedorov, S. S., Rohatgi, U. S., Barsukov, I. V., [та ін.] // Journal of Fluids Engineering. 2015. 138(4), 044502. doi:10.1115/1.4031689.

67. Modeling the Operation Regimes in Ultra-High Temperature Continuous Reactors / Fedorov, S. S., Gubynskyi, M. V., Barsukov [та ін.] the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting: Proceedings. 2014, 1с, P. V01CT18A012. doi:10.1115/FEDSM2014-22161.

68. T Baumann and S Zunft Theoretical and experimental investigation of a Moving Bed Heat Exchanger for Solar Central Receiver Power Plants/ J. Phys.: Conf (2012. Ser. 395 01205)

69. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных

потоков. М.: Энергия. 1970. 424 с

70. Kevin J. Albrecht , Clifford K. Ho Heat Transfer Models of Moving Packed-Bed Particle-to-sCO₂ Heat Exchangers / J. Sol. Energy Eng. Jun 2019. 141(3): 031006 (8 pages) Paper No: SOL-17-1302. <https://doi.org/10.1115/1.4041546>

71. Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т. 1 / Пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко и др. М.: Энергоатомиздат. 1987. 560 с.

72. INDIRECT-HEAT THERMAL PROCESSING OF PARTICULATE MATERIA, pat: EP 2 032 925 B1: Application number: 07719677.2; Date of filing: 03.05.2007 Date of publication of application: 11.03.2009 Bulletin 2009/11

73. Чудновский, А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. Москва: Издательство физико-математической литературы. 1962. 456с.

74. Дульнев, Г. Н., Заричняк, Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Ленинград: Энергия. 1974. 264с.

75. Дульнев, Г. Н., Новиков, В. В. Процессы переноса в неоднородных средах. Ленинград: Энергоатомиздат. 1991. 248с.

76. Исследование охлаждения тонкодисперсного графита в рекуперативных теплообменниках/ Тищенко Т.А., Федоров С.С., Губинский М.В., Безуглый В.А., Гогоци А.Г.. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: Proceeding of XVII International Scientific Conference Czestochowa, 2016. С.564-574

77. Тищенко Т.А., Федоров С.С., Губинский М.В., Безуглый В.А., Гогоци А.Г. Исследование охлаждения тонкодисперсного графита в рекуперативных теплообменниках. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: Proceeding of XVII International Scientific Conference Czestochowa, 2016. С.564-574

78. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. М.: Высшая школа. 1991. 207 с.

79. Богачев, Н. Н., Богданкевич, И. Л., Гусейнзаде, Н. Г. Моделирование физических процессов. Часть II. Методы конечных разностей и конечных элементов. Москва: МГТУ МИРЭА. 2013. 96с.
80. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия. 1990. - 239 с.
81. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. М.:Металлургия. 1975. 296с
82. Металлургические печи. Терия и расчеты: Т.2/по дощ редакцией В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. Минск: Белорус. Наука, 2007.- 832с
83. Справочник по теплообменникам: справочник / под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. М . : Энерговидат. 1987. Т.2. 352 с.
84. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе / пер. с нем. И. Н. Дулькина. М. : Энергоатомиздат. 1981. 384 с.
85. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: «Энергия», 1977. 344 с
86. Теплопередача: Учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергия. 2014. 416с
87. Крючков Е.Н. Исследование поверхностных теплообменников для охлаждения сыпучих материалов: дис. ... кандидата техн. наук. Днепропетровск, 1972.
88. Louy Qoaider, Suhil Kiwan , Qahtan Thabit Investigation of the Flowability and the Thermal Behavior of Sand /Basalt-Mixture in Moving Bed Heat Exchanger (MBHX) as Heat Transfer Medium for Concentrating Solar Tower Plants // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering .Volume 10, Number 4. 2016. P. 263-270
89. Изнашивание ферритной и аустенитной сталей при воздействии незакрепленных частиц кокса / Н.П. Бродниковский, А.Г. Гогоци, П.В. Мазур,

Ю.И. Зозуля, Б.Н. Малиновский, А.В. Самелюк, М.В. Губинский, С.С. Федоров // Электронная микроскопия и прочность материалов: Сб. научн. тр. К.: ИММ НАН Украины, 2014. Вип. 20. С. 172-178.

90. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с

91. Хрущев М. М. Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. — 252 с.

92. Аналіз впливу складу вуглеводного сировини на угар вуглецю при високотемпературній обробці в електротермічних печах киплячого слою / Федоров, С. С., Губинський, М. В., Барсуков, І. В., Гогоци, А. Г., Форісь С. Н. // Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії: колективна монографія. Дніпро. Нова ідеологія. 2017. С. 271-274.

93. Адоньев С.М., Филиппьев О.В. Пылегазовые выбросы предприятий чёрной металлургии. М.: Металлургия, 1973. 200 с

94. Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. / Rizescu C.Z., Bacinschi Z., Stoian E.-V., Poinescu A.A. URL <http://www.wseas.us/elibrary/conferences/2010/Tunisia/WWAI/WWAI-25.pdf>

95. Спосіб уловлювання парів металів і їх сполук. Патент UA 72858 : Заявка 200311212241 від 24.12.2003. Опубл. 27.08.2007 Бюл. №13 2007

96. Способ улавливания паров металлов и их соединений из отходящих газов металлургических агрегатов. Патент РФ 2196182 : подача заявки: 2001-01-12, публикация патента: 10.01.2003

97. [Спосіб очищення високотемпературних газів від возгонів](#): Пат. на корисну модель 1477720 Україна: МПК В01Д 7/02, С22В 7/02; №u2020 06684; заявл. 16.10.2020; опубл. 09.06.2021, бюл. № 23

98. Блох А. Г. Теплообмен в топках паровых котлов, Москва: Энергоатомиздат. 1984. 240с.

99. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и дополн. / НПО ЦКТИ. Санкт-Петербург, 1998. 256 с.

100. Невский А. С. Лучистый теплообмен в печах и топках. М.: Металлургия, 1971. 440 с.
101. POCO Graphite Inc. Properties and Characteristics of Graphite (January 2015). URL <http://poco.com>.
102. Зубарев В. Н., Козлов А. Д., Кузнецов В. М. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник. Москва: Энергоатомиздат. 1989. 233с.

ДОДАТОК А

Принципова схема очищення та утилізації теплоти відхідних газів печі з ЕКШ з використанням котла утилізатора

Принципова схема очищення та утилізації теплоти з використанням котла утилізатора (рис. А 1) складається з вертикального конвейера - 1, проміжного бункера - 2 з віброживильником - 3, валкової дробарки - 4, вібросита - 5, печі з ЕКШ - 6, котла утилізатора - 7 з газопідігрівачем рекуперативного типу - 8, багатоступеневої системи очищення газів, що включає циклон - 9, рукавний фільтр - 10, газодувку - 11, абсорбційну скрубєрну колону - 12 об'єднану з трубою Вентурі, краплі і тумановловлювачі, контур циркуляції води краплєвловлювача - 13, контур циркуляції води труби Вентурі - 14, комплексу регенерації розчину NaOH з отриманням гіпсу - 15, комплекс підготовки подачі вапняного молока - 16, апарат валкового віджиму вологого гіпсу - 17, барабанна сушарка гіпсу - 18, система регенерації віджатої води - 19, блок каталітичного відновлення оксидів азоту NO до N₂ на каталізаторі - 20, блок допалювання - 21, димосос - 22.

Видалення сірки, металів і їх оксидів при високотемпературній обробці в киплячому шарі вимагають їх багатоступеневого очищення, яке забезпечує комплексне вирішення екологічних завдань і включає допалювання газів з одержанням відновлювального середовища (коефіцієнт витрати повітря 0,96-1), охолодження продуктів згоряння в котлі-утилізаторі до температур, що забезпечують надійну роботу очисних апаратів і зниження їх габаритів - циклон + рукавний фільтр.

Наступним етапом є тонке очищення продуктів згоряння від дрібнодисперсного пилу, в тому числі і возгонів важких металів, в трубі Вентурі. Очищений від пилу газ, надходить абсорбційну колону, де проводиться його чищення від оксидів сірки, а також від крапель і туману. При цьому температура продуктів згоряння знижується до 50°C. Наступним етапом

є підігрів продуктів згоряння до температури 500°C , за рахунок теплоти відхідних з печі газів в рекуперативному теплообміннику. Збільшення температури продуктів згоряння забезпечує ефективне поновлення оксидів азоту.

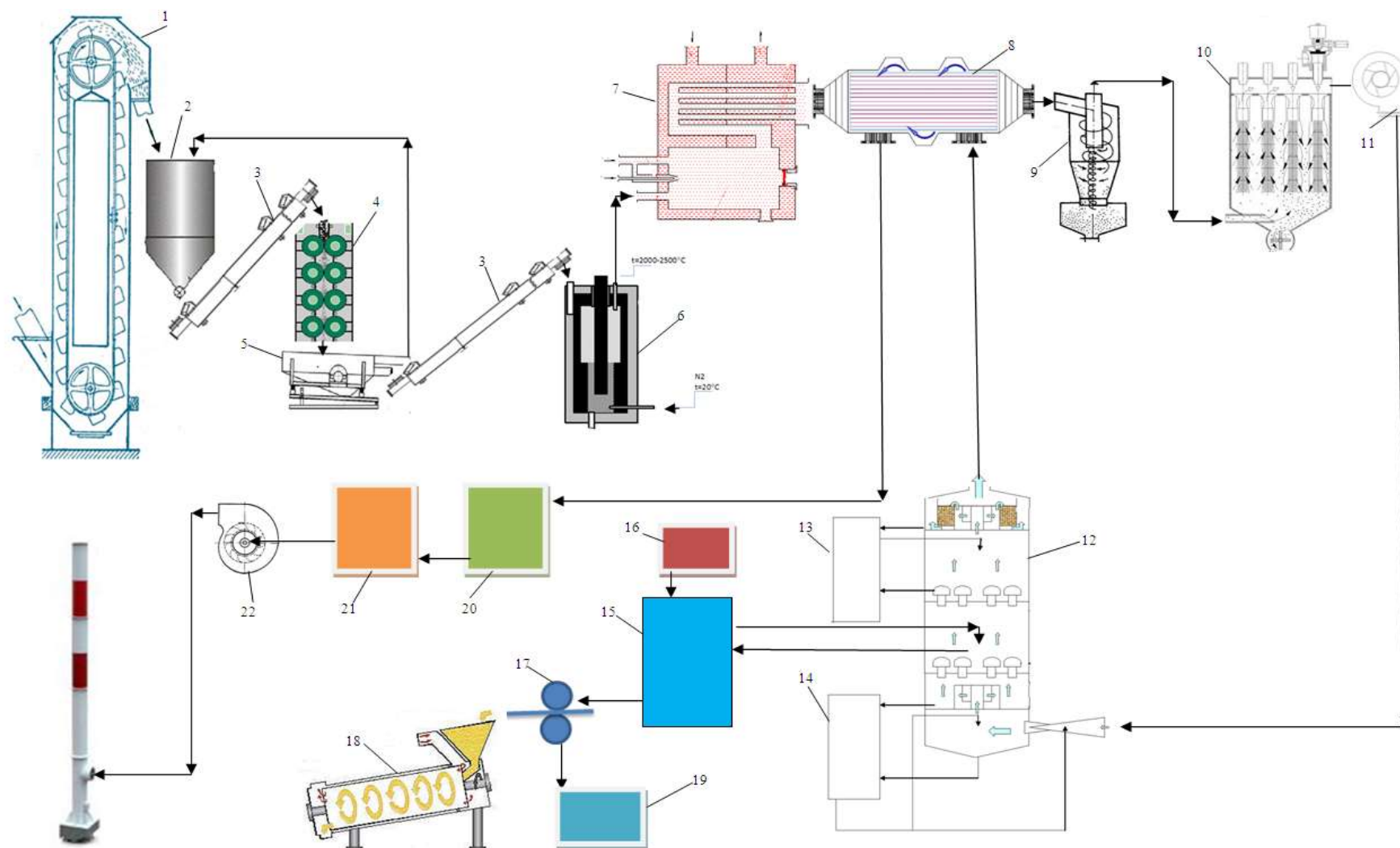


Рисунок А.1 Схема печі ЕПШ з системою очищення і охолодження відхідних газів з котлом утилізатором.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи

аспіранта кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Національної металургійної академії України Гогоці О.Г.

В рамках виконання проекту BNL-T2-0372-UA «Recycling of spent batteries from electric drive vehicles» (номер темі УНТЦ Р842 «Переробка використаних батарей електричних приладів) при розробці пілотної печі з електротермічним киплячим шаром продуктивністю 10 кг/год використано результати дисертаційної роботи аспіранта Гогоці О.Г. «Удосконалення режимних і конструктивних параметрів високотемпературних печей з електротермічним киплячим шаром для термічної обробки вуглецевих матеріалів». А саме:

- Рекомендації щодо вибору аеродинамічних режимів роботи печей з електротермічним киплячим шаром,
- Методика розрахунку печей з електротермічним киплячим шаром,
- основні технічні показники печі, потужність, витрати інертного газу , води охолодження та основні конструктивні розміри пілотної печі продуктивністю печі 10 кг/ год.

Заступник директора
ТОВ « Центр матеріалознавства»



Загородна В.В.

11.01.2021

ДОДАТОК В

Основні креслення пілотної печі з ЕКШ для високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів продуктивністю 10 кг/год

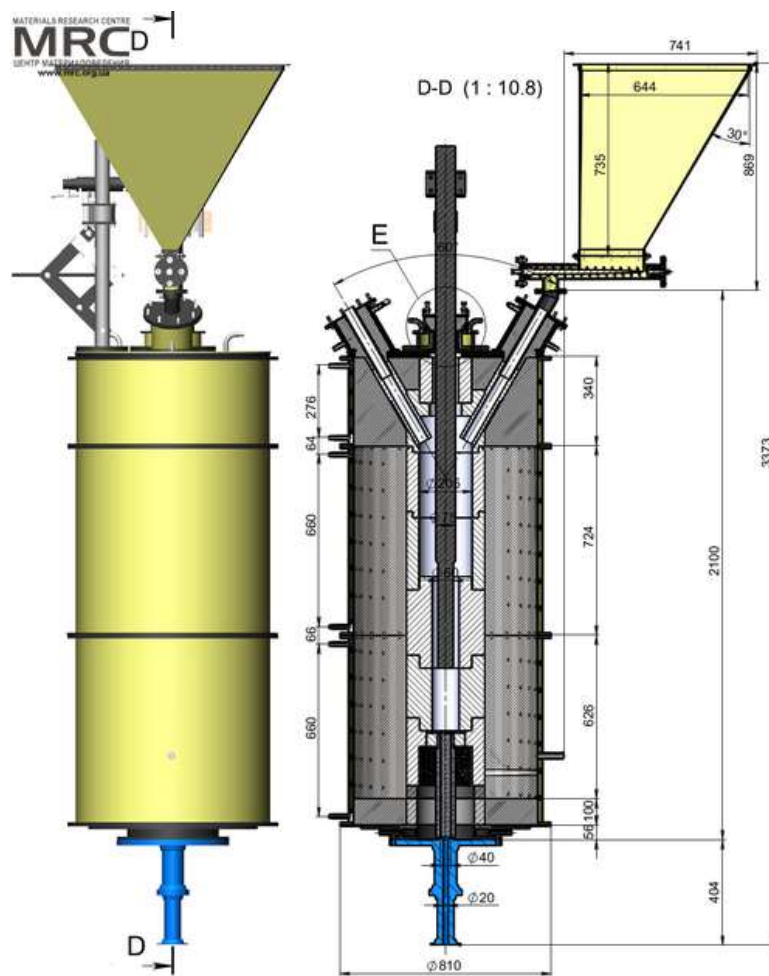


Рисунок В.1 Загальний вигляд печі продуктивністю 10 кг/год з бункером та шнековим живильником

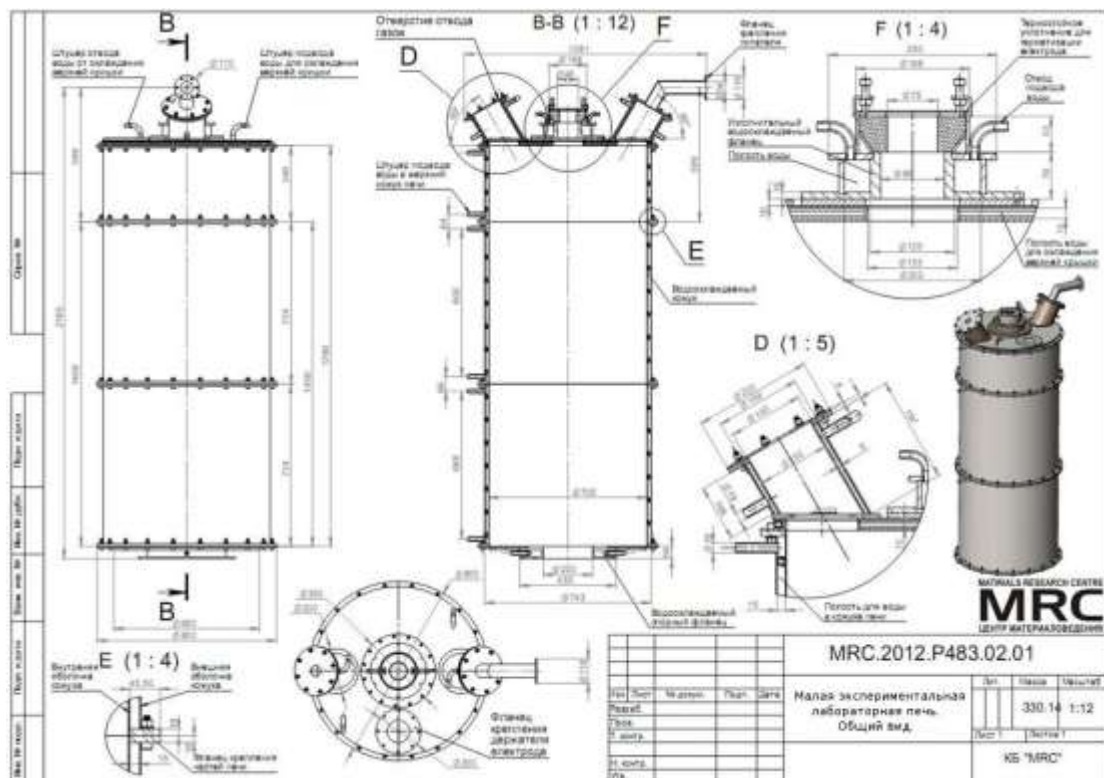


Рисунок В.4 Загальний вид печі

ДОДАТОК Г

Результати порівняльного розрахунку температури газів

Таблиця Г.1 Результати верифікації математичної моделі (5.1-5.5)

Методика розрахунку та похибка	Температура на виході з зон, К									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Математична модель з поділом камери на 5 зон (5.1-5.5)	1155	1420	1574	1389	1259	-	-	-	-	-
Зональний метод [99] з поділом камери на 5 зон	1156	1409	1550	1365	1244	-	-	-	-	-
Відносна похибка (5 зон), %	0.1	-0.8	-1.6	-1.7	-1.2	-	-	-	-	-
Математична модель з поділом камери на 10 зон (5.1-5.5)	787	1200	1342	1450	1526	1577	1450	1355	1279	1215
Зональний метод [99] з поділом камери на 10 зон	770	1188	1337	1450	1531	1585	1461	1368	1295	1237
Відносна похибка (10 зон), %	-2.3	-1.0	-0.4	0.0	0.3	0.5	0.8	1.0	1.2	1.8

Таблиця Г.2 Обґрунтування вибору розрахункового кроку уздовж
радіаційного охолоджувача

Показник	Контрольна точка визначення температури газів				
	1 м	2 м	3 м	4 м	5 м
Параметри сітки: $dl = 50$ мм, $n = 100$					
Температура газу, К	1987	1502	1213	1020	882
Параметри сітки: $dl = 62.5$ мм, $n = 80$					
Температура газу, К	1991	1505	1216	1023	884
Відхилення результату відносно $dl = 50$ мм, $n = 100$	- 0.20	- 0.24	- 0.25	- 0.25	- 0.24
Параметри сітки: $dl = 100$ мм, $n = 50$					
Температура газу, К	1998	1511	1221	1027	888
Відхилення результату відносно $dl = 50$ мм, $n = 100$	- 0.53	- 0.63	- 0.65	- 0.65	- 0.64
Параметри сітки: $dl = 125$ мм, $n = 40$					
Температура газу, К	2011	1523	1231	1035	895
Відхилення результату відносно $dl = 50$ мм, $n = 100$	- 1.18	- 1.41	- 1.46	- 1.46	- 1.42
Параметри сітки: $dl = 250$ мм, $n = 20$					

Температура газу, К	2048	1557	1260	1059	915
Відхилення результату відносно dl = 50 мм, n = 100	- 3.06	- 3.70	- 3.85	- 3.82	- 3.72
Параметри сітки: dl = 500 мм, n = 10					
Температура газу, К	2113	1621	1315	1106	954
Відхилення результату відносно dl = 50 мм, n = 100	- 6.35	- 7.94	- 8.37	- 8.38	- 8.18



Затверджую

Перший проректор

Національної металургійної
академії України

д.т.н., проф. Іващенко В.П.

" 02 " 03 2021р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Гогоці Олексія Георгійовича «Удосконалення режимних і конструктивних параметрів високотемпературних печей з електротермічним киплячим шаром для термічної обробки вуглецевих матеріалів » у навчальному процесі

Отримані аспірантом кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Гогоці О.Г. у рамках дисертаційної роботи «Удосконалення режимних і конструктивних параметрів високотемпературних печей з електротермічним киплячим шаром для термічної обробки вуглецевих матеріалів » на здобуття наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика :

- визначення гідродинамічних режимів роботи печей з електротермічним киплячим шаром ,
- методика розрахунку печей з електротермічним киплячим шаром для обробки вуглецевих матеріалів,
- результати моделювання роботи холодильників дисперсного вуглецевого матеріалу,

використовуються при викладанні курсів лекцій з дисциплін, «Спеціальні питання тепломасообміну», «Високотемпературні процеси та установки» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика», а також при виконанні студентами, випускних бакалаврських, магістерських і науково-дослідних робіт.

Завідувач
кафедри енергетичних систем та
енергоменеджменту

 Валерія Пінчук