**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**
**ім. Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

# Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (магістерського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему «Дослідження методів підвищення енергоефективності печей опору»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1444
спеціальності 144 Теплоенергетика
освітньої програми Теплоенергетика

Чжан К.Є.
(ініціали та прізвище)

Керівник __к.т.н., доцент Єрофєєва А.А._____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент ___ст. викл. Таратута В.О._____

Запоріжжя 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**
**ім. Ю. М. ПОТЕБНІ**

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем_____
Рівень вищої освіти _____другий (магістерський)_____
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 144 «Теплоенергетика»
_____ _____
(код та назва)
Освітня програма __Теплоенергетика_____
( назва)
Спеціалізація _____
(код та назва )

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри** _____
«____» _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Чжан Костянтину Євгеновичу
(прізвище, ім'я, по батьков)

1. Тема роботи (проекту) «Дослідження методів підвищення енергоефективності печей опору»

керівник роботи__Єрофєєва А.А., к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від від «27» лютого 2025 року № 313-с
2. Строк подання студентом роботи «03» грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити 1. Аналіз енергоефективності процесу виробництва зеленого карбіду кремнію в печах опору. 2. Моделювання процесу виробництва зеленого карбіду кремнію в печах опору для завдань обчислювальних досліджень. 3. Розрахунок техніко-економічного обгрунтування впровадження запропонованих рішень.
5. Перелік графічного матеріалу
1) Самохідна піч для виробництва карбіду кремнію. 2)Параметри й показники роботи печі. Розрахунковий елемент печі. 3)Теплові процеси в печі опору для виробництва зеленого карбіду кремнію. 4) Результати перевірки моделі на адекватність. 5) Алгоритм процесу карбідоутворення з автоматичним вибором

потужності печі опору. 6) Запропонований графік введення потужності в піч опору для підвищення її ефективності. 7) Дослідження динаміки нагріву печі у діючому та запропонованому графіках. 8) Дослідження обсягів втрат $SiO_2$ до та після нового графіку навантаження печі. 9) Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| 1 | Єрофєєва А.А, доц., к.т.н. | | |
| 2 | Єрофєєва А.А, доц., к.т.н. | | |
| 3 | Єрофєєва А.А, доц., к.т.н. | | |

7. Дата видачі завдання 23.06.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | Аналіз енергоефективності процесу виробництва зеленого карбіду кремнію в печах опору | 06.10.2025 | |
| 2 | Моделювання процесу виробництва зеленого карбіду кремнію в печах опору для завдань обчислювальних досліджень | 21.11.2025 | |
| 3 | Розрахунок техніко-економічного обґрунтування впровадження запропонованих рішень. | 28.11.2025 | |

Студент _____ К.Є. Чжан
( підпис ) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ А.А.Єрофєєва
( підпис ) (ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій
( підпис ) (ініціали та прізвище)

# АНОТАЦІЯ

К.Є. Чжан. Дослідження методів підвищення енергоефективності печей опору.

Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник А.А. Єрофєєва. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена дослідженню методів підвищення енергоефективності печей опору.

Проаналізовано енергоефективність процесу виробництва зеленого карбіду кремнію в печах опору, технологія виробництва з позиції енергозбереження.

Розроблена математична модель процесу виробництва зеленого карбіду кремнію для завдань обчислювальних досліджень, проведені дослідження можливості підвищення енергоефективності процесу виробництва зеленого карбіду кремнію в печах опору. Запропоновано алгоритм розрахунку процесу виробництва карбіду кремнію для дослідження теплової роботи пічних агрегатів.

Проведений розрахунок техніко-економічного обґрунтування впровадження запропонованих рішень.

Ключові слова: печі опору, енергоефективність, теплові режими, зона печі, динаміка нагрівання, математична модель, алгоритм, елементарний об'єм, газоаналізатор.

# ABSTRACT

K.E. Chzhan. Research on methods for improving the energy efficiency of resistance furnaces.

Qualification thesis for a master's degree in the specialty 144 – Thermal Power Engineering, scientific supervisor A.A. Yerofieieva. Zaporizhzhia National University. Y.M. Potebnyi Engineering Education and Research Institute. Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems, 2025.

The master's thesis is devoted to the study of methods for improving the energy efficiency of resistance furnaces.

The energy efficiency of the green silicon carbide production process in resistance furnaces and the production technology from the point of view of energy conservation are analyzed.

A mathematical model of the green silicon carbide production process has been developed for computational research tasks, and research has been conducted on the possibility of improving the energy efficiency of the green silicon carbide production process in resistance furnaces. An algorithm for calculating the silicon carbide production process has been proposed for studying the thermal performance of furnace units.

A technical and economic justification for the implementation of the proposed solutions has been calculated.

Keywords: furnace resistance, energy efficiency, thermal regimes, furnace zone, heating dynamics, mathematical model, algorithm, elementary volume, gas analyzer..

ЗМІСТ

ВСТУП ……7

1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЗЕЛЕНОГО КАРБІДУ КРЕМНІЮ В ПЕЧАХ ОПОРУ.....9

1.1.Загальні відомості та сфера застосування зеленого карбіду кремнію……..9

1.2.Характеристика пічного агрегату для виробництва карбіду кремнію……..11

1.3.Технологія виробництва карбіду кремнію з позиції енергозбереження……14

1.4.Теплові процеси в печі опору для виробництва карбіду кремнію……..21

1.5.Постановка задачі дослідження……25

2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЗЕЛЕНОГО КАРБІДУ КРЕМНІЮ В ПЕЧАХ ОПОРУ ДЛЯ ЗАВДАНЬ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ……...27

2.1.Структурний аналіз агрегату для виробництва карборунду як електропічної системи……...27

2.2.Моделювання процесу виробництва зеленого карбіду кремнію в печах опору ……35

2.3.Дослідження можливості підвищення енергоефективності процесу виробництва зеленого карбіду кремнію……..46

2.4.Вибір газоаналізатору для умов процесу виробництва зеленого карбіду кремнію ……56

3. РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ……..64

ВИСНОВКИ ……66

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……68

# ВСТУП

*Актуальність роботи.* Актуальність роботи підтверджується тим, в умовах високої енергоємності виробництва зеленого карбіду кремнію, критичним фактором рентабельності є оптимізація теплової роботи печей опору. Існуючі методи керування не завжди враховують нестаціонарний характер теплопровідності шихти та зміну теплофізичних властивостей матеріалів під час плавки.

У цьому контексті актуальним науково-практичним завданням є розробка математичних моделей та алгоритмів розрахунку, які дозволяють без значних капіталовкладень дослідити теплову роботу пічних агрегатів.

Мета роботи – дослідження методів підвищення енергоефективності печей опору шляхом коригування математичної моделі теплових процесів та оптимізації графіка подачі електричної потужності.

Об'єкт дослідження – електричні печі опору.

Предмет дослідження – процес виробництва зеленого карбіду кремнію у печах опору.

*Задачі дослідження.* Для досягнення зазначеної мети дослідження в магістерській роботі вирішуються такі задачі:

1. Підібрати математичну модель печі опору для виробництва зеленого карбіду кремнію.

2. Перевірити на адекватність обрану математичну модель печі.

3. Дослідити можливі підходи до підвищення енергоефективності досліджуваного процесу.

4. Визначити графік подачі потужності в піч з метою підвищення її продуктивності та скорочення втрат $SiO2$.

Методи дослідження: методи математичної статистики, моделювання під час побудови та ідентифікації параметрів моделі.

*Практична цінність* даної роботи полягає в можливості впровадження розроблених у роботі рішень на промислових підприємствах для підвищення енергоефективності виробництва зеленого карбіду кремнію у пічних установках.

# 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЗЕЛЕНОГО КАРБІДУ КРЕМНІЮ В ПЕЧАХ ОПОРУ

## 1.1 Загальні відомості та сфера застосування зеленого карбіду кремнію

Карбід кремнію (SiC) – це бінарна неорганічна сполука кремнію з вуглецем. Стехіометричний склад речовини включає 70,04 % кремнію та 29,96 % вуглецю. Матеріал характеризується молекулярною масою 40,09 та густиною 3,21 г/см³. Відомо явище поліморфізму карбіду кремнію, що проявляється в існуванні низки структурних модифікацій, таких як SiC-I, SiC-II та інших. Через крайню рідкісність природних родовищ цього мінералу, у промисловості використовується виключно синтетичний продукт. Історія його створення сягає початку 1890-х років, коли вчені Ачесон, Муассан та Шутценбергер майже одночасно, але різними методами (від прямого синтезу до відновлення кремнезему), отримали цю речовину.

Історичне походження технічної назви карбіду кремнію «карборунд» пов'язане з експериментальною діяльністю Е. Ачесона. Досліджуючи можливості синтезу штучних алмазів, вчений отримав кристали надвисокої твердості та помилково ідентифікував їх як сполуку вуглецю (carbon) і корунду (corundum). Подальший аналіз довів, що отримана речовина є хімічною сполукою кремнію з вуглецем, проте технологія, розроблена Ачесоном, і донині залишається базовим методом промислового виробництва SiC.

Широке впровадження карбіду кремнію в техніку зумовлене унікальним комплексом його фізико-хімічних характеристик [1] . Насамперед, завдяки винятковим показникам твердості (рис.1) та ріжучої здатності, матеріал є основою для виготовлення широкого спектра абразивних інструментів (порошків, кругів, шліфувальних шкурок).

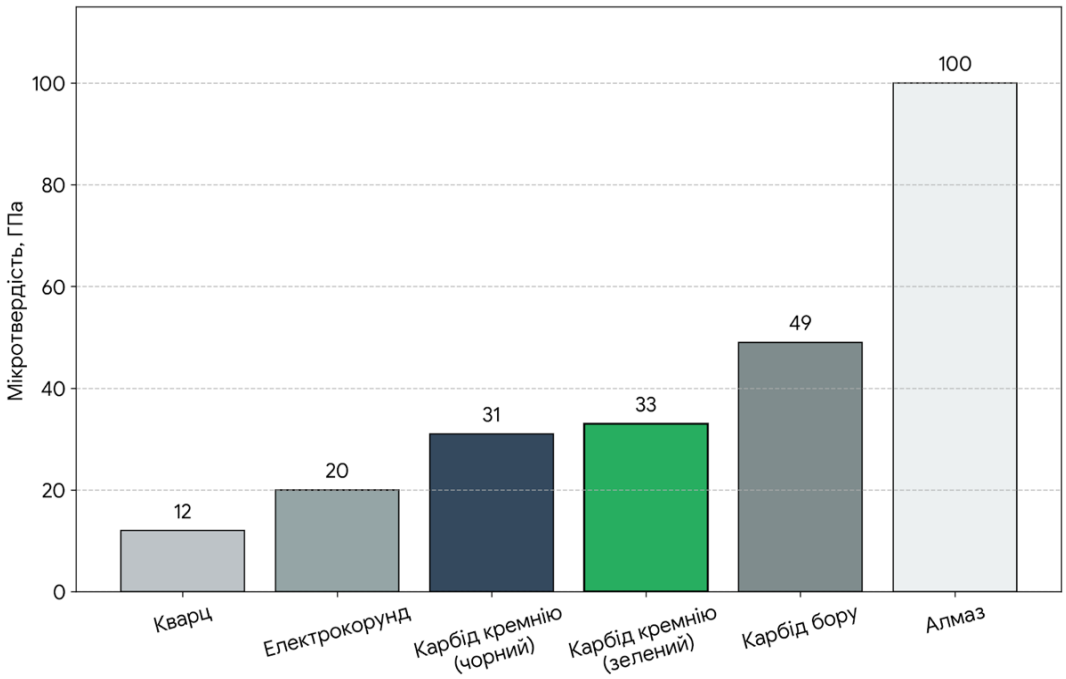



Рисунок 1.1 – Порівняльна діаграма мікротвердості абразивних матеріалів

Карбід кремнію є найбільш ефективним при обробці матеріалів з низьким опором розриву, які не утворюють зливної стружки: чавуну, алюмінію, кольорових металів, а також скла, каменю та ебоніту. Окрім абразивних властивостей, карбід кремнію характеризується високою вогнетривкістю, теплопровідністю та низьким коефіцієнтом лінійного розширення [2]. Це визначає його важливу роль у виробництві вогнетривких матеріалів. Сучасні досягнення у технології зв'язуючих компонентів дозволили значно розширити номенклатуру та покращити експлуатаційні характеристики карбідокремнієвих вогнетривів.

Промисловість випускає три різновиди карбіду кремнію: чорний (КЧ), зелений (КЗ) і спеціальний (КС), що розрізняються за якістю та технологією виробництва. Абразивні кола з карбіду кремнію зеленого широко застосовуються для обробки твердих сплавів.

На сучасному етапі світова структура виробництва кремнію чітко поляризувалася. Китай є абсолютним гегемоном у випуску базової сировини – металургійного кремнію та «сирого» карбіду кремнію, контролюючи понад

70% світового ринку завдяки доступу до дешевої електроенергії; значні обсяги сировини також постачають Бразилія та Норвегія.

Натомість США, Японія та країни Євросоюзу (Німеччина, Франція) утримують лідерство у сегменті High-Tech. Вони спеціалізуються на глибокій переробці матеріалів: вирощуванні надчистих монокристалів та виготовленні напівпровідникових підкладок (wafers) на основі SiC.

Ключовими технологічними лідерами тут виступають компанії Wolfspeed (США), STMicroelectronics (Європа) та Rohm (Японія), чия продукція є критично важливою для індустрії електромобілів (EV), відновлюваної енергетики та оборонних систем.

## 1.2. Характеристика пічного агрегату для виробництва кремнію

Печі для виробництва карбіду кремнію належать до електропечей опору. З моменту організації даного виробництва їх конструкція зазнала суттєвих змін, спрямованих на підвищення ефективності, надійності та зручності експлуатації.

Печі ранніх конструкцій являли собою коритоподібний прямокутний ящик, відкритий зверху. У торцевих стінках корпусу нерухомо закріплювалися струмопідвідні електроди. Печі такого типу отримали назву печей з глухою подиною. Їх недоліками були значні теплові втрати, обмежена механізація процесу та складність обслуговування.

На сучасному етапі виробництво карбіду кремнію здійснюється у самохідних електропечах (рис. 1.2). Основою печі слугує металева платформа, зварена зі швелерів, на якій монтується каркас із чавунних колосників, що утворюють подину. У поперечному перерізі подина має форму гамака, що забезпечує необхідну геометрію робочого простору та рівномірний розподіл матеріалу.

По краях подини встановлюються дванадцять чавунних щитів, по шість з кожного боку, які формують бічні стінки печі. Щити кріпляться до

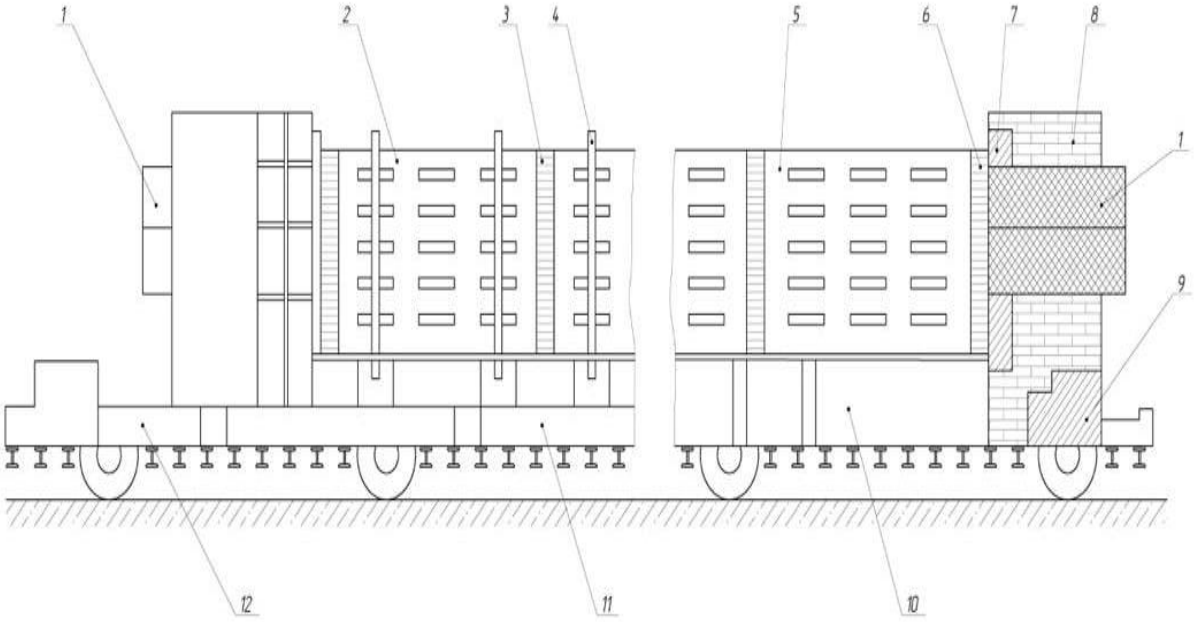
вертикальних стійок за допомогою болтів і притискних планок. Під час монтажу між окремими щитами залишають технологічні зазори, які заповнюються шамотною цеглою без застосування розчину. Для електричної та теплової ізоляції щитів від металевих стійок також використовується цегляна прокладка.

Пакети робочих електродів, призначені для підведення електричного струму в піч, монтуються у бічних стінках. Опорною конструкцією електродного вузла є залізобетонний каркас, який встановлюється на раму печі та обкладається цеглою. Цегляна кладка виконує функцію опори для пакета електродів і забезпечує його стабільне положення під час роботи.

З боку робочого простору печі електродний вузол футерується теплоізоляційними вугільними блоками, поверхня яких покривається графітовою пастою для підвищення електропровідності та зменшення контактного опору. Пакет складається з чотирьох робочих електродів перерізом 400 × 400 мм і довжиною 1800 мм. Внутрішня частина електродів виступає в робочий простір печі на 100 мм, тоді як зовнішня частина довжиною близько 500 мм призначена для приєднання контактного пристрою.

Ходове влаштування печі змонтовано на передній частині платформи, перед кутом. Воно складається з двигуна, редуктора, валу та зубчастої передачі. Залежно від потужності змінюються і розміри печей. Деякі параметри та показники роботи печей наведені у табл. 1.1.

Хоча з наведених у таблиці даних випливає, що в період освоєння електропечей підвищеної потужності не було досягнуто суттєвого покращення основних показників їх роботи, наявні підстави стверджувати, що за умов подальшого вдосконалення та стабілізації технологічного процесу такі печі можуть виявитися значно економічнішими порівняно з малопотужними аналогами.




1 - струмопідвідні електроди; 2 – бічний щит передньої стінки; 3 – цегляна кладка; 4 – стійка для кріплення бічних щитів; 5 – бічний щит задньої стінки; 6 - контактний матеріал із графітованих відсівів; 7 – захисні електроди; 8 - торцева стінка з вогнетривкої цегли; 9 – бетонний корпус торця; 10 і 12 - візки кінцеві; 11 - візок середній

Рисунок 1.2 – Самохідна піч для виробництва карбіду кремнію

Таблиця 1.1 – Параметри та показники роботи печей

| Параметр | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Встановлена потужність, кВт | 2000 | 2500 | 3600 |
| Середня питома потужність, кВт | 1900 | 2400 | 3200 |
| Розмір перетину керна, см | 80х40 | 80х40 | 90х45 |
| Довжина керна, м | 11 | 11 | 15 |

Продовження таблиці 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Питома потужність на поверхні керна, Вт/см² | 5,1 | 9,1 | 8,1 |
| Щільність струму на керні А/см² | 2,96 | 3,8 | 2,9 |
| Напруга на низький стороні, В | — | 210 | 300 |
| Сила струму на низький стороні, кА | — | 12,0 | 11,0 |
| Тривалість кампанії (плавки), годин | 40 | 26 | 27 |
| Вихід карбіду, т | 6,5-7 | 6 | 8 |
| Питомі витрати енергії кВт·год/т | 11000 | 9650 | 10400 |

Зі збільшенням встановленої потужності печей спостерігається майже дворазове зростання питомої потужності на поверхні керна, а також підвищення питомої потужності на його поперечному перерізі. Зазначені фактори сприяють інтенсифікації електротермічного процесу та забезпечують підвищення продуктивності виробництва карбіду кремнію.

Разом з тим теплові втрати з поверхні печі наприкінці кампанії для сучасних електропечей потужністю 2400 кВт становлять 16–30 % від підведеної електричної енергії. Такий рівень втрат свідчить про наявність значного резерву для підвищення енергоефективності процесу та зумовлює доцільність подальшого аналізу технології виробництва карбіду кремнію з позицій енергозбереження та оптимізації теплового режиму.

## 1.3. Технологія виробництва зеленого карбіду кремнію з позиції енергозбереження

Процес виробництва карбіду кремнію можна поділити на такі основні процеси: підготовка шихти, підготовка та завантаження печі, перебування печі під струмом, охолодження та розбирання печі, сортування карбіду кремнію.

Підготовка шихти полягає у доведенні сировинних матеріалів до крупності, передбаченої технологічним процесом. Кварцова сировина піддається сушінню, гуркотінню, розсіву та завантажується в бункери.

На окремих підприємствах кварцову сировину перед використанням піддають попередньому промиванню водою з метою видалення механічних домішок і пилу. Антрацит та нафтовий кокс подрібнюють до заданої гранулометрії, після чого здійснюють їх розсів за фракціями та завантажують у відповідні бункери.

Із бункерів проводиться дозування компонентів відповідно до рецептури шихти. Підготовлена шихта зволожується, ретельно перемішується до досягнення однорідної структури та подається у завантажувальні бункери електропечей.

Підготовка печі до роботи здійснюється у спеціально відведеному приміщенні та включає комплекс підготовчих операцій. Зокрема, проводиться ретельне очищення цегляної кладки подини від залишків шихти та солей, а також перевіряється цілісність і придатність вогнетривкої цегли. Уздовж довжини печі на подині викладають чотири ізоляційні пояси з нової вогнетривкої цегли, призначені для запобігання можливості шунтування електричного струму під час роботи печі.

Поверхню робочих електродів перед початком експлуатації ретельно очищають, а всі щілини у торцевих стінках печі герметизують ізоляційною пастою. Уздовж печі встановлюють бічні стінки у вигляді чавунних щитів. Під час їх монтажу суворо дотримуються однакової відстані між щитами по всій ширині печі. З метою запобігання шунтуванню електричного струму через металеві елементи конструкції зазори між щитами заповнюють шамотною цеглою без застосування розчину. Після завершення зазначених операцій підготовлену піч подають до завантажувального відділення.

Завантаження печі здійснюється протягом 3–5 годин відповідно до технологічної карти, розробленої технологом цеху. Усі матеріали, призначені для приготування шихти, надходять у завантажувальне відділення з

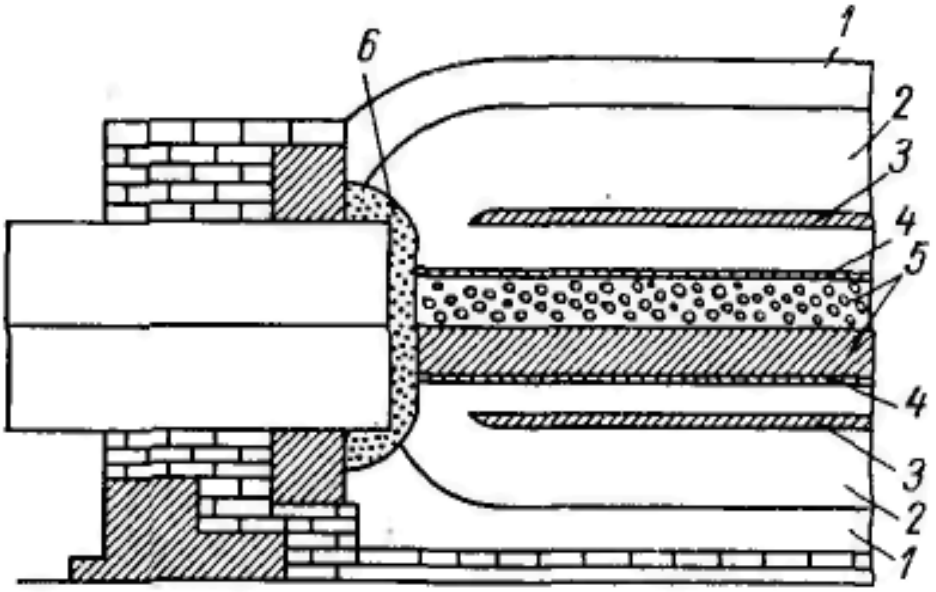
підготовчого відділення за допомогою транспортерів. Для кожного виду матеріалу передбачені окремі бункери, з яких компоненти подаються на вагові дозатори. Дозування здійснюється строго відповідно до рецептури, після чого матеріали надходять у лійку шихтозмішувача.

У процесі змішування компоненти зволожують, додаючи воду у кількості 2–5 % від маси шихти. Після досягнення однорідності суміші шихта вивантажується у проміжний бункер, звідки за допомогою горизонтального реверсивного стрічкового транспортера подається безпосередньо в піч.

Завантаження печі здійснюють у визначеній послідовності. Спочатку на подину насипають шар теплоізоляційної шихти, після чого укладають реакційну шихту. По осі печі в реакційну шихту закладають шар аморфного матеріалу шириною 100–120 см і товщиною 6–10 см, який виконує функцію центру кристалізації карбіду кремнію. Поверх аморфу насипають тонкий шар піску для запобігання розкладу карбіду кремнію при високих температурах, після чого укладають керн, який також покривають тонким шаром піску.

Для формування керна по центру печі встановлюють дерев’яні щити, відстань між якими відповідає ширині керна. У результаті по довжині печі утворюється траншея, в яку завантажують керновий матеріал. На кінцях траншеї, поблизу електродів, перпендикулярно до осі печі встановлюють металеві щити. Простір між кожним електродом і щитом заповнюють дрібнозернистим графітованим коксом.

Після цього траншею заповнюють керновим коксом фракції 20–60 мм. Найбільш придатним матеріалом для формування керна є кокс повторного використання, попередньо відсіяний від дрібних фракцій. Бічні зазори між керном і стінками печі заповнюють реакційною шихтою. Завершальним етапом завантаження є укладання на керн шару реакційної шихти та шару наповнювальної теплоізоляційної шихти. Схематичний розріз завантаженої печі наведено на рис. 1.3.




1 - наповнювальна шихта; 2 - реакційна шихта; 3 - аморф; 4 кварцовий пісок; 5-керн; 6-контактний матеріал з графітованих відсівів

Рисунок 1.3 - Розріз завантаженої печі для виробництва зеленого карбіду кремнію

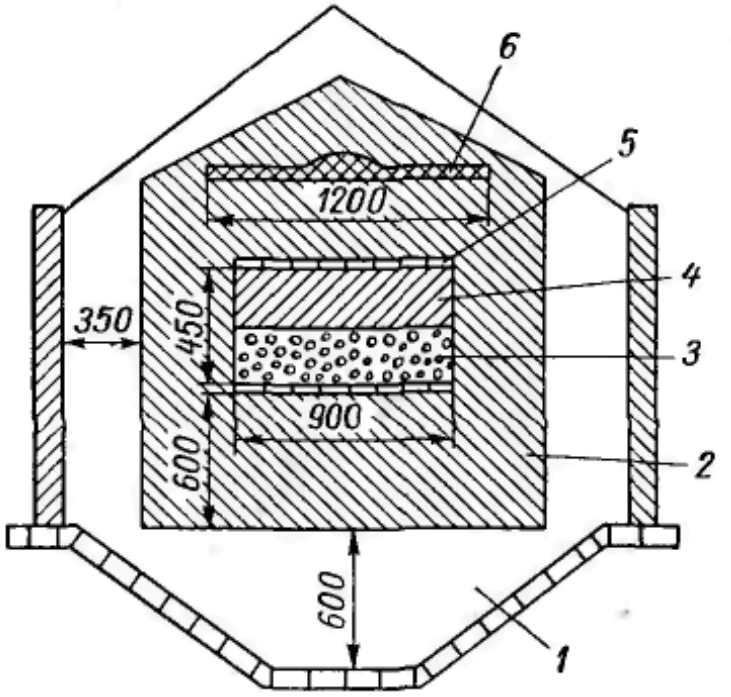
На окремих підприємствах застосовується гетерогенне завантаження печі (рис. 1.4). У цьому випадку реакційну шихту розміщують безпосередньо навколо керна, тоді як ззовні до неї прилягає наповнювальна шихта. При такій схемі завантаження добавка зворотної шихти до реакційної не здійснюється. Гетерогенне завантаження забезпечує зменшення витрат сировинних матеріалів, а також сприяє підвищенню чистоти отриманого карбіду кремнію за рахунок зниження вмісту сторонніх домішок.

Виплавку карбіду кремнію здійснюють у плавильному відділенні. Завантажену піч встановлюють на робочий майданчик і з метою покращення відведення газоподібних продуктів верхню частину та бічні поверхні печі наколюють металевими штирями. Наколювання виконують у напрямку, перпендикулярному осі керна. Після ретельної підготовки контактного пристрою піч підключають до пічного трансформатора.

Через 20–30 хв. після подачі напруги з печі починається інтенсивне виділення водяної пари та газоподібних продуктів реакції. Для забезпечення

безпечного режиму роботи гази підпалюють за допомогою факела, внаслідок чого поверхня печі огортається язиками полум’я блакитного кольору. У міру протікання реакції синтезу карбіду кремнію відбувається усадка шихти.

У процесі виплавки внаслідок локальних проривів парів і газів у окремих ділянках печі можуть утворюватися факели. Такі прояви усувають шляхом завалювання відповідних зон вологою шихтою. У разі виникнення інтенсивного та стійкого смолоскипа піч тимчасово відключають з метою забезпечення безпеки та стабілізації технологічного режиму.




1 - наповнювальна шихта; 2 - реакційна шихта; 3 - нафтовий кокс (керн); 4 - старий графітований керновий матеріал: 5 - кварцовий пісок; 6 - аморф

Рисунок 1.4 - Схема гетерогенного завантаження печі при виробництві карбіду кремнію

На печах потужністю 2500 кВт при виробництві карбіду кремнію зеленого витрата енергії складає 60 000 кВт·год. Тривалість плавки становить 25-26 год. Графік зміни потужності у процесі плавки представлений на рис. 1.5.

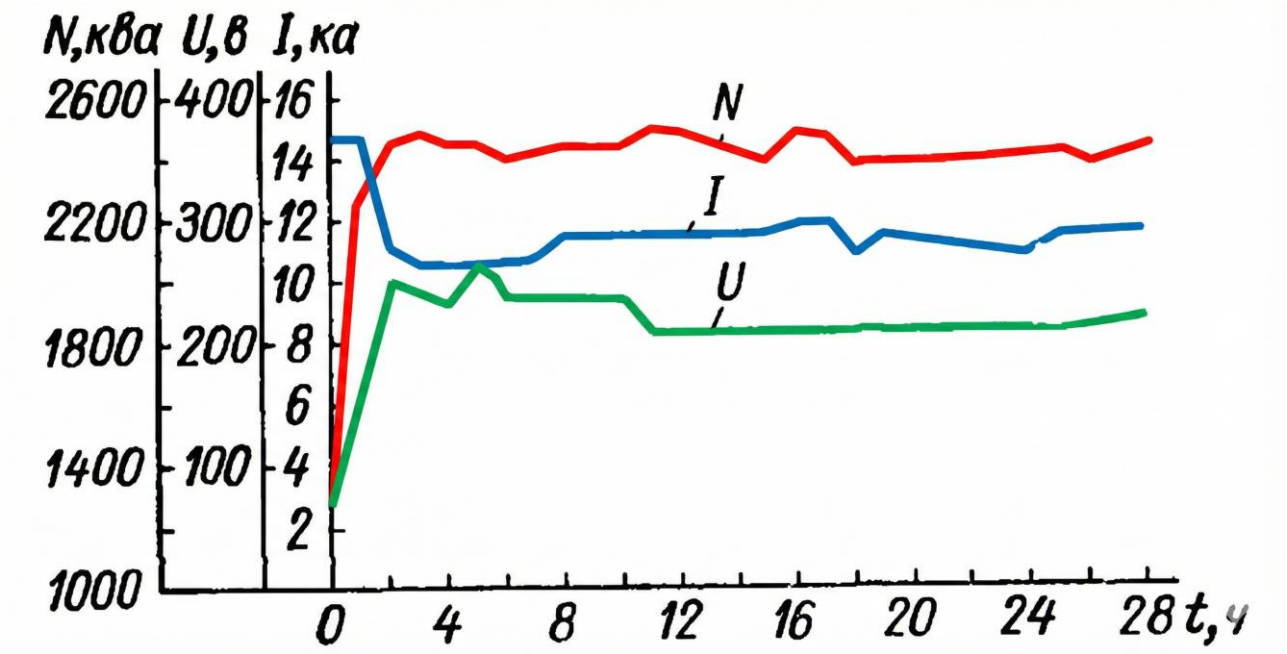


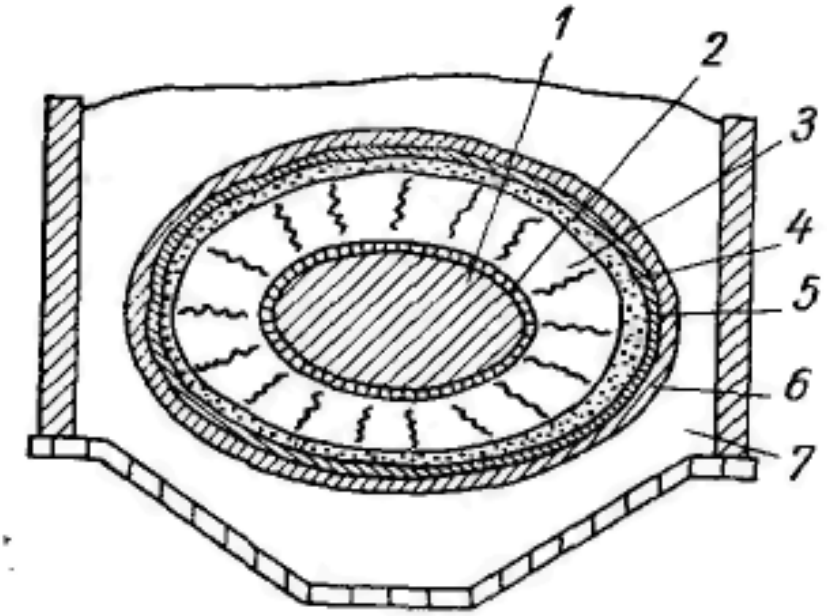

Рисунок 1.5. - Залежності потужності N, напруги U та сили струму I від часу t роботи печей потужністю 2400 кВт

З аналізу графіка подачі потужності в піч, наведеного на рис. 1.5, випливає, що характер зміни підведеної потужності є переважно лінійним. Відомо, що за такого режиму роботи печі в процесі виробництва зеленого карбіду кремнію окремі зони робочого простору зазнають значного перегріву. Це, у свою чергу, призводить до порушення цілісності поверхневих шарів шихти, виникнення факелування на поверхні печі, а також до істотних втрат летких компонентів, зокрема оксиду кремнію SiO. У зв’язку з цим виникає необхідність більш детального аналізу теплових процесів, що відбуваються в електропечі під час виплавки карбіду кремнію.

Охолодження та розбирання печі здійснюють після її відключення від електричної мережі. Піч вивозять з пічного гнізда та встановлюють на охолоджувальний майданчик. Процес охолодження триває, як правило, 24–30 годин, після чого проводять розбирання печі. Упродовж виплавки відбувається значна усадка шихти, внаслідок чого керн зміщується вниз.

У результаті завершення процесу виплавки продукти розташовуються в печі у вигляді концентричних шарів відносно керна. При цьому повернення,

напівпродукти та карбід кремнію утворюють чітко виражену зональну структуру, що схематично представлена на рис. 1.6.




1 - керн; 2 – шар графіту; 3 - карбід кремнію; 4 – аморф; 5 – зростки; 6 – силоксикон; 7 – зворотна шихта

Рисунок 1.6. - Розріз печі для виробництва карбіду кремнію після відключення

Під час розбирання печі з робочого простору видаляють шихту, що не прореагувала, силоксикон та спіки. Процес гарячого розбирання печі триває, як правило, 4–6 годин. На сучасних підприємствах дедалі ширше застосовується гідромоніторний спосіб розбирання, який забезпечує підвищення продуктивності та покращення умов праці.

Отриманий блок карбіду кремнію піддають охолодженню в душовій камері, після чого його транспортують до відділення сортування. Сортування карбіду кремнію розпочинають зі зняття зростків, що утворилися на верхній і бічних поверхнях блоку. Очищений від зростків блок піддають зламу та розгортанню на сортувальних столах, які встановлюють безпосередньо біля печей.

У процесі розгортання карбід кремнію розпадається на окремі шматки, які додатково подрібнюють до розмірів 40–50 см із середньою масою 25–30 кг. Отримані шматки вручну очищають від залишків аморфного матеріалу та

графіту. Після очищення продукцію зважують і передають у відділення крупного дроблення для подальшої переробки.

## 1.4. Теплові процеси в печі опору для виробництва зеленого карбіду кремнію

У процесі одержання карбіду кремнію основним джерелом підведеної теплоти є електрична енергія. Електричний струм, проходячи через керн, спричиняє його інтенсивний розігрів, унаслідок чого тепловий потік поширюється від внутрішніх зон печі до зовнішніх.

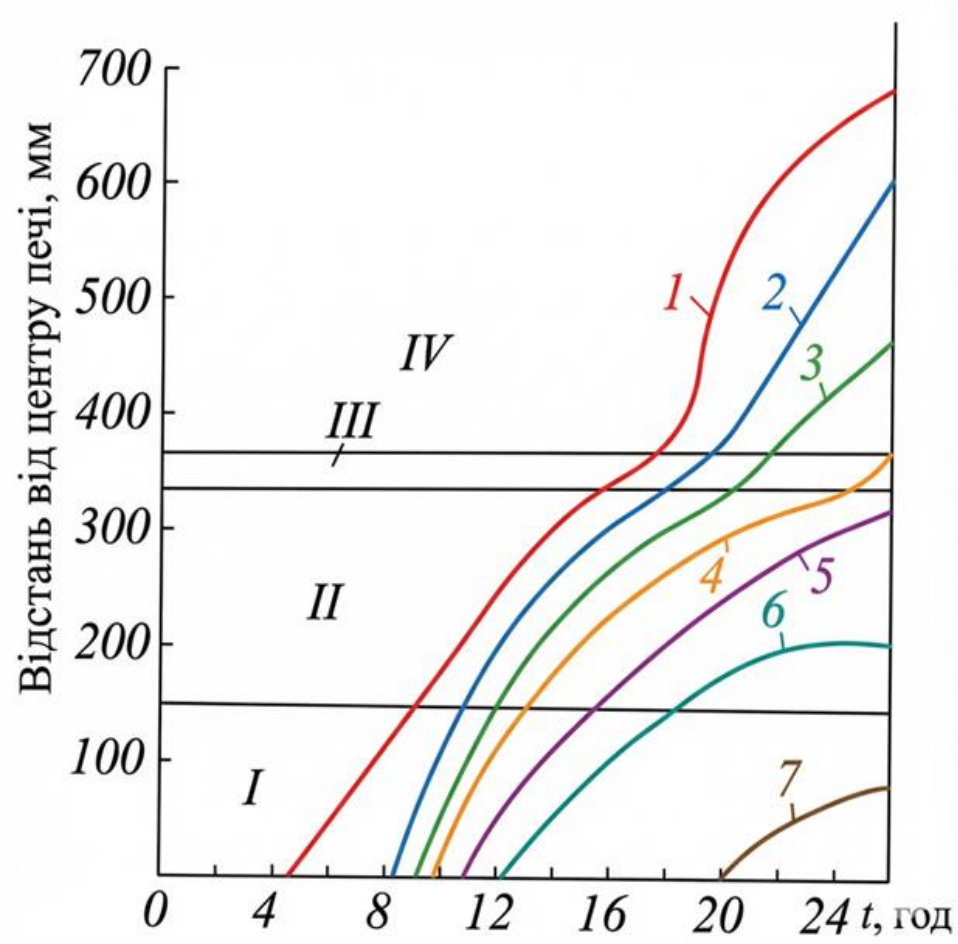
Реакція утворення карбіду кремнію на початковій стадії відбувається в шарі шихти, що безпосередньо оточує керн, а надалі поширюється на суміжні зони робочого простору печі. Характер прогріву окремих зон печі під час виробництва зеленого карбіду кремнію проілюстровано на рис. 1.7. При цьому піч функціонує в умовах нестаціонарного теплового режиму, що зумовлює непостійний характер теплових втрат, які з часом мають тенденцію до зростання.

Температурні умови в печі істотно впливають на перебіг процесу утворення карбіду кремнію, тоді як величина теплових втрат слугує одним із критеріїв обґрунтованого вибору тривалості технологічного процесу.

Окремі закономірності утворення карбіду кремнію в промислових електропечах можуть бути проаналізовані на підставі дослідження розподілу температур за зонами печі, що представлено в табл. 1.2 та на рис. 1.7.

Швидкість процесу карбідоутворення характеризується зміною температури по зонах печі і швидкістю нагрівання.

У печі протягом перших п’яти годин роботи відбувається видалення вологи та летких компонентів із керна. На п’ятій годині температура поверхні керна досягає приблизно 800 °С. Прилеглі до керна шари шихти нагріваються до температури 800 °С зі швидкістю 45–50 мм/год.




I - керн; II - карбід кремнію; III - аморф ; IV - інші матеріали; 1 - 800 ° C; 2 - 1400 ° C; 3 - 1600 ° C; 4 - 1800 ° C; 5 - 2000 ° C; 6 - 2200 ° C; 7 - 2300 ° C

Рисунок 1.7. - Розподіл температури по зонах печі (I-IV) залежно від часу t при виробництві карбіду кремнію зеленого

Швидкість процесу карбідоутворення характеризується зміною температури по зонах печі і швидкістю нагрівання.

Через 5–6 годин після ввімкнення печі відбувається плавлення кухонної солі, що супроводжується поглинанням значної кількості теплоти. Унаслідок цього підвищення температури в зонах, які прилягають до керна, тимчасово уповільнюється. На дев’ятій годині процесу починається утворення аморфного карбіду кремнію, що відбувається одночасно з інтенсивним

випаровуванням кухонної солі. Це призводить до різкого зростання електричної та теплової провідності шихти.

Таблиця 1.2 – Температура нагрівання твердих продуктів під час виробництва карбіду кремнію

| Найменування продукту | Температура нагріву продуктів в ˚С |
|---|---|
| Карбід кремнію | 2080 |
| Керн | 2300 |
| Аморф | 1760 |
| Силоксикон | 1680 |
| Шихта (верх) | 900 |
| Подова шихта | 300 |
| Спеки | 900 |

На десятій годині роботи печі формуються термодинамічні умови для перекристалізації карбіду кремнію з кубічної модифікації в гексагональну. Як видно з температурних кривих, наведених на рис. 1.7, процес перекристалізації відбувається практично одночасно з утворенням карбіду кремнію. Він розпочинається приблизно через 10 годин після пуску печі та триває впродовж 10–12 годин. У цей період інтенсивно протікають процеси перекристалізації, що підтверджується характером розташування температурних кривих 4 і 5.

Починаючи з 22-ї години роботи печі, температури на рівні 1800–2000 °С поширюються в зони, більш віддалені від керна. Наявність кухонної солі в реакційній зоні сприяє інтенсифікації процесу карбідоутворення, створюючи сприятливі умови для формування карбіду кремнію.

При виробництві зеленого карбіду кремнію теплопровідність шихти є вищою, ніж у разі отримання чорного карбіду кремнію, що зумовлює швидший прогрів матеріалу. За цих умов керн нагрівається від 1400 до 2000 °С зі швидкістю близько 200 °С/год, від 2000 до 2200 °С – зі швидкістю 70

°С/год, а від 2200 до 2300 °С – зі швидкістю приблизно 15 °С/год. Утворення зеленого карбіду кремнію розпочинається через 9 годин від початку кампанії та протікає зі швидкістю 10–12 мм/год.

Температура поверхні керна на 3–4-й годині роботи печі становить близько 800 °С, при цьому прилеглі до керна шари шихти нагріваються до відповідних температур зі швидкістю 22–27 мм/год.

Аналіз графіків роботи печей, розподілу температур за зонами, складу газів, відібраних у різні періоди роботи печі, а також даних щодо перерозподілу компонентів шихти по зонах дозволяє зробити висновок, що при виробництві зеленого карбіду кремнію впродовж перших 5–6 годин від початку роботи печі відбувається інтенсивний розігрів керна та видалення з нього вологи й летких компонентів. У цей період керн і прилеглі шари шихти нагріваються до температури 850–900 °С, а газова фаза характеризується відносно невисоким вмістом CO (36–70 %) і підвищеним вмістом $H_2$ та $CO_2$.

Через 8–9 годин від початку роботи печі спостерігається різкий стрибок температури та інтенсивне прогрівання шихти по всій реакційній зоні. Це явище пов’язане з плавленням кухонної солі, що супроводжується зростанням теплопровідності та електропровідності шихти. У реакційній зоні при цьому створюються температурні умови, за яких можливе протікання реакцій відновлення $SiO_2$ та SiO вуглецем.

З аналізу складу газів випливає, що навіть у зоні керна умови для утворення елементарного кремнію не виникають, оскільки газова фаза, що містить навіть соті частки відсотка $CO_2$, чинить окиснювальну дію на кремній. Тривалість витримки при максимальній температурі реакційної зони під час виробництва зеленого карбіду кремнію є більшою, ніж при виробництві чорного карбіду кремнію. Водночас ведення плавки на максимальній потужності протягом усієї кампанії, як показано на рис. 1.5, призводить до істотного перегріву окремих зон печі, прориву шарів шихтового матеріалу та втрат корисного продукту. Для зменшення викидів і втрат у цій технології застосовується тимчасове відключення печі.

У випадку, коли швидкість випаровування кремнієвої кислоти істотно перевищує швидкість її адсорбції вуглецевим матеріалом, процес карбідоутворення супроводжується помітними втратами $SiO_2$. Встановлено, що втрати $SiO_2$ під час виробництва зеленого карбіду кремнію становлять у середньому по печі 5,8–6,5 %, а в межах реакційної зони – 14–20 %.

## 1.5. Постановка завдання дослідження

Процес виробництва зеленого карбіду кремнію в промислових умовах здійснюється в електричних печах опору, в яких безпосередньо завантаження печі (керн) виконує функцію активного електричного опору навантаження в загальному електричному ланцюгу агрегату: джерело електроживлення – коротка мережа – піч. Основна частина джоулевої енергії виділяється саме в шарі керна, тоді як нагрівання шихти відбувається переважно за рахунок процесів теплопередачі.

У процесі нагрівання керна формуються значні температурні градієнти, що зумовлює виникнення термічних напружень. За необґрунтовано високої швидкості нагрівання це призводить до розтріскування поверхні керна. Порушення нормального перебігу технологічного процесу проявляється у вигляді факелування, тобто локалізованого викиду парів і газів, спричиненого їх проривом через окремі ділянки печі. Причинами такого явища можуть бути порушення цілісності керна, зменшення газопроникності шихти, а також нерівномірний нагрів керна по його довжині.

Для усунення факела піч відключають не менш ніж на 40 хвилин. Після цього дерев’яною жердиною верхній шар шихти розгрібають на глибину 30–40 см, утворений провал засипають спіками кухонної солі та силоксикону, а зверху покривають зволоженою шихтою. Після завершення зазначених операцій піч знову вмикають для продовження процесу виплавки.

У разі надмірно повільного нагрівання керна процес карбідоутворення істотно затягується, що призводить до зниження продуктивності печі,

перевитрати електричної енергії та підвищеного теплового навантаження на вогнетривке футерування.

Вуглецева шихта, що обробляється в печі, характеризується суттєвою та нелінійною залежністю електрофізичних і теплофізичних властивостей від температури. У зв’язку з цим формування температурного поля в електропечі опору має складний характер і є важкодоступним для повноцінного експериментального дослідження.

Розроблення нових пічних комплексів, а також удосконалення існуючих технологічних схем доцільно здійснювати на основі методів математичного моделювання із застосуванням сучасної обчислювальної техніки. Це дозволяє підвищити керованість процесу виробництва зеленого карбіду кремнію, збільшити продуктивність печей і забезпечити зростання енергоефективності всього пічного комплексу.

Виходячи з цього, у магістерській роботі поставлені такі завдання:

1. Розробити математичну модель печі опору для виробництва зеленого карбіду кремнію.

2. Перевірити на адекватність розроблену технологічну модель печі.

3. Дослідити можливі підходи до підвищення енергоефективності аналізованого процесу.

4. Визначити графік подачі потужності в піч з метою підвищення її продуктивності та скорочення втрат $SiO_2$.

# 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЗЕЛЕНОГО КАРБІДУ КРЕМНІЯ В ПЕЧАХ ОПОРУ ДЛЯ ЗАВДАНЬ ОЧИСЛЮВАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 2.1 Структурний аналіз агрегату для виробництва карборунду як електропічної системи

Основою системного підходу до дослідження електропічних установок є поєднання загального аналізу системи з детальним вивченням усіх її складових. Отримання вичерпної інформації, необхідної для діагностики та вдосконалення роботи установки, неможливе без попереднього ґрунтовного аналізу кожного окремого елемента та технологічного процесу.

Структурні елементи пічної системи доцільно класифікувати за двома функціональними рівнями. До першого, визначального рівня, належать вихідні матеріали – реакційна шихта, яка в процесі термохімічних перетворень трансформується у цільовий продукт (карбід кремнію). До другого рівня належать допоміжні елементи, що забезпечують умови протікання основного процесу: пічне середовище (допоміжні шихтові матеріали) та футеровка.

Як показано на рис. 1.3, завантаження печі опору складається з нагрівного керна та реакційної шихти, яка оточує його, а також зовнішнього шару теплоізоляційної шихти. Враховуючи геометричні параметри установки, де довжина печі перевищує її ширину в 7–10 разів, для розрахунків доцільно використати спрощену модель. Це дозволяє виділити розрахунковий елемент – «напівряд» (рис. 2.1), для якого теплові потоки з трьох сторін приймаються рівними нулю (адіабатичні границі).

Такий розрахунковий елемент розглядається як багатокомпонентне тверде тіло, що складається з керна, реакційної зони, теплоізоляції та футеровки. При цьому електро- та теплофізичні властивості зазначених матеріалів суттєво залежать від температури.

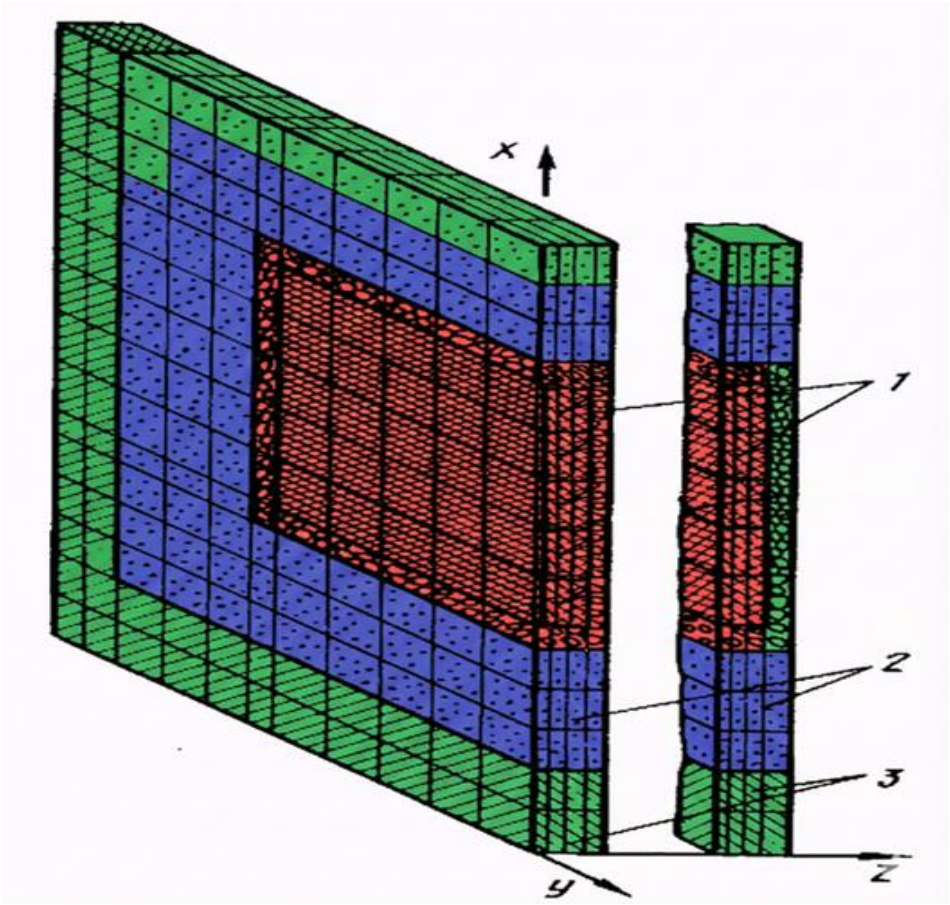
Для подальшого моделювання температурного поля печі опору приймемо наступні припущення:

1. Розподіл тепла в об’ємі печі здійснюється виключно за допомогою теплопровідності. Впливом масопереносу та конвекції в газовій фазі на процес теплообміну нехтуємо внаслідок їх несуттєвості.

2. Тепло з країв печі враховують як тепло, що виділилося на шарі пересипки біля торців. Це виправдано, тому що практика показала, що наявність цього елемента завантаження необхідна для компенсації теплових втрат через торець печі.

3. У зв'язку з недостатністю даних про залежність коефіцієнтів тепло- та електропровідності шихтових матеріалів від тиску останнє прийнято у всіх точках печі однаковим.

4. Обсяг пічного простору, заповнений шихтовими матеріалами, розглядають як середовище з гомогенними властивостями.




1 - керн, 2 - реакційна шихта, 3 - футерування

Рисунок 2.1. - Розрахунковий елемент печі

Математичний опис температурного поля такого складового елемента може бути виражений диференціальним рівнянням теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти:

$$c(t)\rho\frac{\sigma t}{\sigma\tau}=\frac{\sigma}{\sigma x}\left[\lambda(t)\frac{\sigma t}{\sigma x}\right]+\frac{\sigma}{\sigma y}\left[\lambda(t)\frac{\sigma t}{\sigma y}\right]+\frac{\sigma}{\sigma z}\left[\lambda(t)\frac{\sigma t}{\sigma z}\right]+g_V(\tau) \qquad (2.1)$$

Початкові умови: = 0; t = const.

Граничні умови:

$$g_{y=0}=0;\ g_{z=0}=0;\ g_{z=k}=0;$$

$$\left(\frac{\sigma t}{\sigma x}\right)_{x=0}=-\frac{\alpha(t)}{\lambda(t)}(t_{x=0}-t_{\text{в}});$$

$$\left(\frac{\sigma t}{\sigma x}\right)_{x=h}=-\frac{\alpha(t)}{\lambda(t)}(t_{x=h}-t_{\text{в}});$$

$$\left(\frac{\sigma t}{\sigma y}\right)_{y=b\backslash 2}=-\frac{\alpha(t)}{\lambda(t)}\left(t_{y=b\backslash 2}-t_{\text{в}}\right).$$

На межах футеровка – теплоізоляція, теплоізоляція – реакційна шихта, реакційна шихта керн:

$$\lambda_1\left(\frac{\sigma t_1}{\sigma n}\right)=\lambda_2\left(\frac{\sigma t_2}{\sigma n}\right),$$

де c, λ - теплоємність і теплопровідність матеріалів завантаження печі, що є функціями температури;

ρ – щільність або насипна маса для шихтових матеріалів прийнята постійною величиною, яка не залежить від температури;

g_V – Джоулева теплота, що виділяється в одиниці об'єму електропровідної частини печі, визначається через струм і опір;

α – коефіцієнт тепловіддачі, є функцією температури.

Для опису граничних умов на поверхні печі розглянемо розміщення та умови роботи печей опору у цеху. Печі в цеху розташовані за секціями на відстані 1,5...2,0 м між поверхнями бічних стін. Процес тепловіддачі на поверхні бічних стін може здійснюватися конвекцією та випромінюванням.

На поверхні верхнього шару теплоізоляції процес тепловіддачі також буде здійснюватися конвекцією та випромінюванням, так як поверхня парасольки знаходиться на відстані 1,0...1,5 м від поверхні шихти. Причому швидкості газоповітряної суміші настільки малі, що практично не вдається заміряти розрідження під парасолькою. Найчастіше у подині печі є вентиляційні канали, тому процес тепловіддачі на подині печі доцільно розглянути з урахуванням лише конвективної складової.

Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі конвекцією α_k скористаємось рівнянням для розрахунку середнього коефіцієнта тепловіддачі при вільній течії вздовж вертикальних стінок:

$$Nu_{ж,с} = 0{,}75(Gr_{ж,с}Pr_{ж})^{0{,}25}(Pr_{ж}\backslash Pr_{с})^{0{,}25} \qquad (2.2)$$

В якості лінійного розміру, що входить до числа Нуссельта і Грасгофа, використовуємо висоту печі h. Тоді:

$$Nu_{ж,h} = \frac{\alpha_k h}{\lambda_ж} \qquad (2.3)$$

$$Gr_{ж.h} = \frac{g\beta_ж\theta_c h^3}{\nu_ж^2}\ , \qquad (2.4)$$

де Pr - критерій Прандтля;

β - температурний коефіцієнт об'ємного розширення;

ν - кінематична в'язкість, м ² / с;

с, ж - індекси приналежності до температури стінки та рідини.

Розрахунки, виконані за даними рівняннями, свідчать про те, що величина коефіцієнта тепловіддачі при температурі поверхні печі від 273 до 373 К в середньому становить 2,5 Вт/(м² К) і при подальшому підвищенні температури буде збільшуватися несуттєво. Однак, враховуючи, що практично всі існуючі печі опору мають канали в стінках і подині, по яких

рухається газоповітряна суміш, поверхня тепловіддачі, що омивається газами, в два рази перевищує зовнішню поверхню стін і подини. Тому приймаємо коефіцієнт тепловіддачі вдвічі більший, тобто - 5Вт/(м²·°С) при збереженні поверхні теплообміну, що дорівнює зовнішній плоскій поверхні печі.

Для визначення залежності коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням від температури поверхні печі та верхнього шару теплоізоляції скористаємось рівнянням:

$$\alpha_{\text{в}} = \varepsilon c_0 \frac{[(t_i \backslash 100)^4 - (t_{\text{в}} \backslash 100)^4]}{(t_i - t_{\text{в}})} \qquad (2.5)$$

де ε - ступінь чорноти тіла;

c_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м² К);

t_i - температура поверхні на кордоні з довколишнім середовищем,

К; t_в - температура довколишнього повітря, К

З аналізу процесів теплообміну в печі опору та на її межі випливає, що диференційне рівняння (2.1) суттєво нелінійне внаслідок складних тимчасових та температурних залежностей тепло- та електрофізичних характеристик матеріалів, граничних умов та просторової анізотропії.

Тому пряме рішення рівняння (2.1) у разі неможливо. Для розв’язання поставленого завдання скористаємося методом елементарних балансів енергії, що знайшло застосування завдяки своїм широким можливостям.

Для використання методу елементарних балансів енергії при розрахунку температурних полів печі [3] графітації розіб'ємо виділений розрахунковий елемент — півряд (рис. 2.1) на безліч елементарних об’ємів. Однак, як випливає з сутності методу елементарних балансів, кожен елементарний об’єм повинен містити матеріал одного виду.

Для розв’язання рівняння теплопровідності спочатку необхідно розв’язати завдання розподілу щільності струму між елементарними об'ємами, так як питомий опір матеріалів завантаження істотно залежить від їхньої

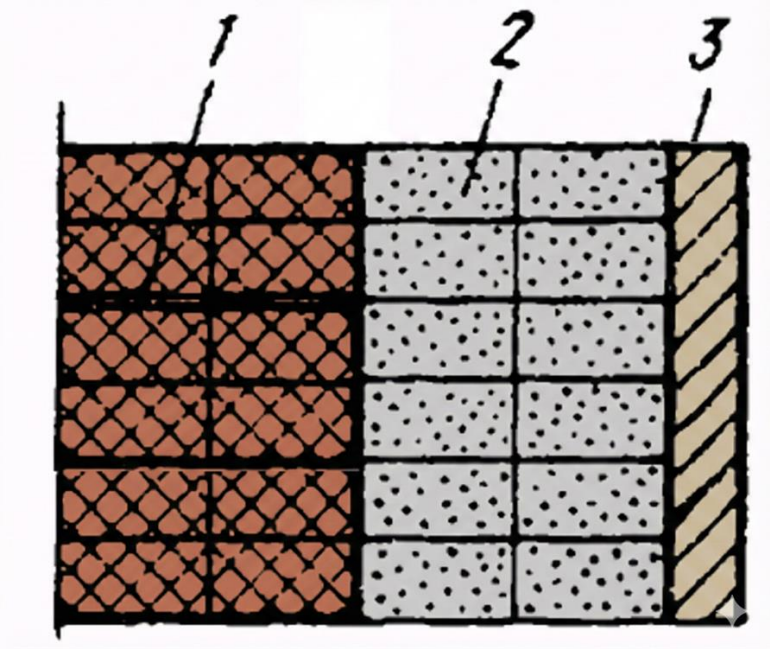
температури і приймати рівномірний розподіл струму перерізу керна неправомірно.

Опір кожного з представлених на рисунку 2.2 елементарних обсягів розраховують за такою формулою:

$$R^{\Omega}_{i,j,k} = \rho_{i,j,k}(t_{i,j,k}) l_{i,j,k} \backslash S_{i,j,k} \quad (2.6)$$

де ρ_(i,j,k) (t_(i,j,k) ) - питомий опір як функція температури i,j,k-го елемента;

l_(i,j,k), S_(i,j,k) - довжина та площа i,j,k-го елемента.




1-керн, 2 – реакційна шихта, 3 – теплоізоляція

Рисунок 2.2 – Схема заміщення

Опір кожного шару, що складається з паралельно з'єднаних елементів, розраховують за формулою:

$$R_{сл} = \frac{1}{\sum(\frac{1}{R^{\Omega}_{i,j,k}})} \quad , \quad (2.7)$$

а опір керна печі:

$$R_{\text{к.п}} = \sum_2^1 R_{сл} \, . \qquad (2.8)$$

При розгляді печі опору в цілому виникає необхідність розглянути складнішу систему, в якій пічний агрегат є змінним електричним опором навантаження в електричному ланцюзі: джерело електроживлення - коротка мережа - піч (рис. 2.3). Виділення даної системи є вкрай важливим для енергетичних розрахунків електротермічних агрегатів, оскільки дозволяє встановити розподіл потужності між усіма елементами системи.

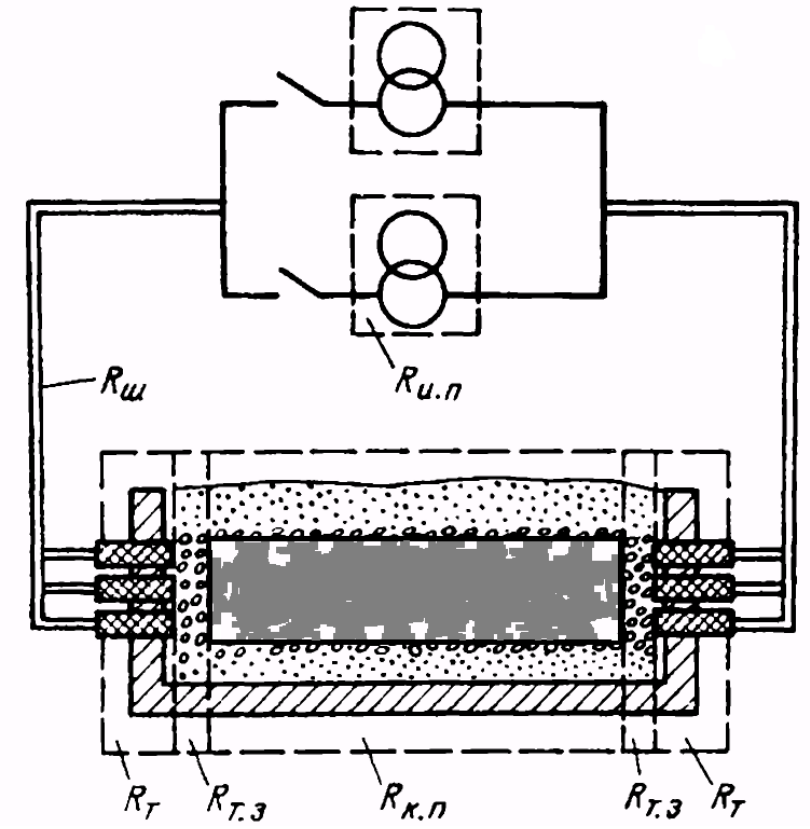



Рисунок 2.3. - Схема електропостачання печі опору

Загалом будемо мати систему джерело електроживлення – коротка мережа – керн – допоміжні шихтові матеріали – футерування печі.

Коротка мережа це - сукупність провідників, що з'єднують низьковольтні висновки джерела електроживлення з робочою зоною електричної печі. До складу короткої мережі включені не тільки мідні та алюмінієві шинопроводи, а й графітові струмопідведення, а також шари графітованого коксу, що

завантажуються в піч між торцями струмопідведення, тобто. елементи технологічного завантаження.

Графітові струмопідведення. На рис. 2.3 показані графітові струмопідводи, рівномірно розташовані по всьому перерізу керна печі. У місцях контакту з металевими шинопроводами графітові струмопідводи мають постійну температуру, що не перевищує 90 °С. З іншого торця температура струмопідводів змінюється в залежності від температури довкілля до 2600...3000 ° С наприкінці кампанії нагріву.

Саме по собі завдання визначення теплової роботи струмопідведення досить складне і має бути вирішене окремо. Тому в даному випадку залежність опору струмопідведення від часу процесу нагріву визначали за методикою, що застосовується для розрахунків шинопроводів, і потім знаходили аналітичну залежність опору струмопідведення Rт , як функцію часу нагріву або середньої температури керна печі.

Опір шару графітованого коксу у струмопідводів розраховували виходячи з таких міркувань. Товщина даного технологічного елемента є стабільною величиною і становить приблизно 250 мм у кожного торця. Висоту та ширину встановлюють для конкретного завантаження. Як вихідні дані використовують залежність питомого електроопору графітованого коксу від температури. Визначальною температурою вибрано середню температуру перерізу керна печі. Таким чином, у процесі зміни температури керна печі розраховують опір даного шару як функцію його середньої температури.

Джерело електроживлення. Печі опору працюють на змінному струмі (переважно невеликі печі) або живляться від випрямного агрегату постійним струмом (сучасні великотоннажні печі). Розглянемо визначення активного опору джерела живлення постійного струму. Цей опір визначає втрати енергії в джерелі електроживлення і його необхідно враховувати при розробці графіка підйому потужності для нагріву реакційної шихти, а також при визначенні витрати енергії на піч, так як вимірювання активної потужності, що споживається агрегатом, проводиться на первинних обмотках силових

трансформаторів шляхом перетворення вхідного напруги шляхом перетворення вхідної напруги та струму відповідними вимірювальними трансформаторами.

Сучасні джерела постійного струму для печей опору електродної промисловості збирають на основі серійного агрегату, що складається з трансформатора ТЦНП і випрямного агрегату ДВ1, і мають наступні характеристики: межа регулювання вторинної напруги 60...300 В, номінальна величина вторинного струму 50 кА, потужність -15 МВт. За необхідності нарощування потужності джерело живлення набирають з 2, 3 або 4 паралельно працюючих агрегатів.

У джерелах живлення постійного струму відбувається багаторазове перетворення форми, величини струму і напруги, тому прямий експериментальний вимір опору та втрат потужності в ньому утруднено. Ці параметри зазвичай визначають розрахунковим шляхом з урахуванням паспортних даних основних пристроїв агрегату. Значення внутрішнього опору джерела живлення різних ступенях напруги розрізняються не більше, ніж на 10...15 %, тому внутрішній опір агрегату прийнято величиною постійною

## 2.2 Моделювання процесу виробництва зеленого карбіду кремнію в печах опору

Піч опору як реальний об'єкт має безліч зв'язків, і вибір конкретної моделі є найбільш складним і відповідальним етапом. Основна вимога до математичних моделей — достатня точність. Це означає, що з ідеалізації реального об'єкта необхідно врахувати все існуючі властивості та зв'язки, виключивши другорядні. Формування питання залежить не тільки від характеру самого об'єкта, але і від поставленого завдання.

Зокрема, для опису процесу карбідоутворення в печах типу Ачесон розроблено кілька підходів (алгоритмів). Розглянемо алгоритм, рішення якого дозволяє визначити об'ємні температурні поля печі, електричні

характеристики процесу та баланс енергії агрегату, якщо відомі геометричні параметри та схема завантаження печі, тепло- та електрофізичні властивості всіх матеріалів як функції від температури, характеристика всіх елементів короткої мережі та джерела електроживлення, а також графік потужності.

Алгоритм розрахунку являє собою сукупність наступних операцій:

- Введення вихідних даних.
- Розрахунок просторової сітки; розрахунковий елемент розбивають на елементарні обсяги за вихідними даними схеми завантаження та геометричних розмірів печі; виконують перерахунок керна круглого перерізу на прямокутне.
- Введення вихідного температурного поля.
- Завдання початкового часу та першого кроку часу.
- Опис простору: надають різні назви певним областям простору, що містять у собі матеріали за відповідною схемою завантаження. Наприклад, обсяг печі, в якому розташований керн, надають назву ZAG {i, j, k}, реакційної шихті - PER {i, j, k) і т.д.
- Тепло- та електрофізичні властивості матеріалів завантаження вибирають залежно від середньої температури кожного елементарного об'єму. Для цього сформована для кожного виду матеріалу підпрограма, в якій надано залежності коефіцієнта теплопровідності, теплоємності та питомого електроопору як функцій температури в діапазоні від 0 до 3300 °С; щільність всіх матеріалів прийнята величиною постійною.
- Розрахунок електричного опору керна печі Rк.п здійснюють послідовно за рівняннями (2.7), (2.8) залежно від температури кожного елементарного об'єму.

Визначення електричного опору пічного агрегату: спочатку розраховують опір керна у струмопідведення Rт.з як функцію середньої

температури керна, потім опір графітових струмопідведення Rт як функцію їх середньої температури, опір джерела живлення Rіп визначають за формулою для паралельного з'єднання провідників, так як при роботі на початковій стадії кампанії працює один трансформатор-випрямляч; при досягненні максимального струму, наприклад, 50 кА, підключається в паралельну роботу другий комплект - трансформатор-випрямляч, опір всього джерела живлення відповідно зменшується вдвічі і т.д.; з урахуванням опору шинопідведення Rш загальний електричний опір агрегату складе:

$$R_{\text{аг}}(t) = R_{\text{к.п}}(t) + R_{\text{т.з}}(t) + R_{\text{т}}(t) + R_{\text{ш}} + R_{\text{і.п.}} \qquad (2.9)$$

Розрахунок напруги, підведеної до вторинної обмотки джерела живлення:

$$U_{\text{и.п}} = \sqrt{NR_{\text{аг}}} \ , \qquad (2.10)$$

де N = f(τ) - потужність у момент часу τ, що визначається з графіка потужності, заданого у вихідних даних.

Визначення вторинного струму в ланцюзі:

$$I \ = \sqrt{NR_{\text{аг}}} \ . \qquad (2.11)$$

Розрахунок зміни температури кожного елементарного обсягу від дії внутрішнього джерела теплоти в інтервалі кроку часу:

$$\Delta t^{p}_{i,j,k} = \frac{(IR_{\text{сл}})^2}{x_{i,j,k}, y_{i,j,k}, z_{i,j,k}, C_{i,j,k}, \gamma_{i,j,k}, R^{\Omega}_{i,j,k}} \qquad (2.12)$$

де $R_{\text{сл}}$ - опір шару;

$x_{(i,j,k)}$, $y_{(i,j,k)}$, $z_{(i,j,k)}$ - лінійні розміри елемента;

$C_{(i,j,k)}$, $\gamma_{(i,j,k)}$ ,$R_{(i,j,k)}{}^{\Omega}$ — теплоємність, щільність та електроопір елемента.

Визначення середньої розрахункової температури кожного елементарного обсягу від дії внутрішнього джерела теплоти:

$$t_{i,j,k}^{p} = t_{i,j,k}^{H} + \frac{\Delta t_{i,j,k}^{p}}{2} \ , \qquad (2.13)$$

де $t_{(i,j,k)}{}^{H}$ — початкова на заданий крок часу температура елементарного обсягу.

Далі цю температуру $t_{(i,j,k)}{}^{p}$ порівнюють із заздалегідь заданою температурою $t_{(i,j,k)})'$ визначають похибку, якщо остання не знаходиться в межах заздалегідь заданої величини, уточнюють середню температуру та інші характери та теплофізичних характеристик матеріалів. Якщо розрахункова та задана середні температури знаходяться в межах заданої похибки, переходять до наступної операції.

Розрахунок термічних опорів кожного елементарного обсягу шести напрямків, наприклад, для одного з елементів - за напрямком j+1:

$$R_{i,j+1,k}^{\lambda} = \frac{y_{i,j,k}}{\left[2x_{i,j,k}z_{i,j,k}\lambda_{i,j,k}\left(t_{i,j,k}^{p}\right)\right]} \ . \qquad (2.14)$$

На межі з довкіллям термічний опір знаходять з наступного виразу:

$$R_{i,j+1,k}^{\lambda} = \frac{1}{\left[x_{i,j,k}z_{i,j,k}\alpha_{i,j,k}(t_{i,j,k}^{p})\right]} \qquad (2.15)$$

де - коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище, що розраховується в залежності від середньої температури кожного елементарного обсягу на кордоні з навколишнім середовищем.

Розрахунок тимчасового обсягу за рівнянням:

$$R^{\tau}_{i,j+1,k} = \frac{\Delta\tau}{\left[x_{i,j,k}, y_{i,j,k}, z_{i,j,k}, C_{i,j,k}, \gamma_{i,j,k}(t^{p}_{i,j,k})\right]}. \quad (2.16)$$

Визначення теплових потоків по шести напрямках для кожного елементарного об'єму, наприклад, для спрямування j+1:

$$Q_{i,j+1,k} = \frac{(t^{p}_{i,j+1,k} - t^{p}_{i,j,k})}{(R^{\lambda}_{i,j+1,k} + R^{\lambda}_{i,j,k})} \quad . \quad (2.17)$$

Розрахунок потрібної температури кожного елементарного об'єму на кінець часу Δτ з рівняння:

$$t^{n+1}_{i,j,k} = t^{n}_{i,j,k} + t^{p}_{i,j,k} + (Q_{i,j+1,k} + Q_{i,j-1,k} + Q_{i+1,j,k} + Q_{i-1,j,k} + Q_{i,j,k+1} + Q_{i,j,k-1})R^{\tau}_{i,j,k} \quad (2.18)$$

Визначення кожного елементарного обсягу наступного кроку часу з виразу:

$$\Delta\tau_{i,j,k} = \mathrm{C}_{i,j,k}(t^{p}_{i,j,k}) \setminus R^{\lambda}_{i,j,k}(t^{p}_{i,j,k}) \cdot 0{,}95. \quad (2.19)$$

Визначення найменшого значення кроку Δτ_min для подальшого розрахунку. Вибір кроку часу дозволяє істотно скоротити машинний час, оскільки витрати часу на його розрахунок у кожній ітерації несуттєві, але крок часу для холодної печі в кілька разів більше, ніж для гарячої. Це дозволяє суттєво зменшити загальну кількість ітерацій.

Розрахунок перепаду температури по радіусу і довжині заготівлі, що нагрівається, а також найбільшого перепаду температури по перерізу керна - різниці температур між центром і кутовою точкою керна по перерізу заготовок.

Розрахунок балансу за окремими статтями:

кількість енергії, підведеної до печі опору, за рівнянням:

$$W = N_1\Delta\tau_1 + N_2\Delta\tau_2 + \cdots + N_n\Delta\tau_n \quad (2.20)$$

де n – номер ітерації;

N - потужність протягом часу Δτ, Вт.

Кількість енергії, підведеної до керна печі W і втрати енергії в елементах короткої мережі та джерела електроживлення $W_Т$, $W_{Т.з}$, $W_ш$ і $W_{і.п}$ відповідно - за рівняннями, аналогічними (20);

кількості енергії (теплоти), витрачені на нагрівання керна Q_k реакційної шихти Q_(р.ш), теплоізоляції Q_т і вогнетривкого футерування Q_ф-за формулою (на прикладі розрахунку теплоти, витраченої на нагрівання керна).

$$Q_к = \sum_1^n\left\{\sum_{i=1,j=1,k=1}^{ZAG}\left[V_{i,j,k}\gamma_{i,j,k}C_{i,j,k}\left(t_{i,j,k}^{n+1} - t_{i,j,k}^{n}\right)\right]\right\} \quad (2.21)$$

де n – кількість ітерацій;

ZAG { i, j, k } - безліч, що описує простір, в якому розташований керн печі;

кількість енергії (теплоти), що становить втрати у навколишнє середовище з поверхні печі – за рівнянням:

$$Q_{окр} = W_{к.п} - (Q_k + Q_{р.ш} + Q_т + Q_ф) \quad (2.22)$$

Після підведення балансу для кожного елементарного об'єму задають середню температуру, що залежить від параметрів внутрішнього джерела теплоти, на наступний крок за часом:

$$t_{i,j,k}^{з} = t_{i,j,k}^{n+1} + t_{i,j,k}^{\Delta}\backslash 2N^{n+1}\backslash N^n. \quad (2.23)$$

Нарешті проводять порівняння заздалегідь заданого часу кампанії з розрахованим. Якщо розрахований час не досяг заданого, організують цикл для розрахунку температурного поля, а якщо досяг заданого, розрахунок автоматично припиняється і здійснюють виведення отриманої інформації.

Викладений алгоритм розрахунку процесу виробництва карбіду кремнію представлений у вигляді блок-схеми на рис. 2.4 і призначений в основному для дослідження теплової роботи пічних агрегатів за існуючих графіків введення енергії.

При розробці оптимальних графіків потужності використання даного алгоритму утруднено і потрібно робити безліч розрахунків на ЕОМ, підбираючи методом послідовного наближення необхідний режим. Однак у зв'язку з нелінійністю тепло-і електрофізичних характеристик нагріваються в печі матеріалів підібрати оптимальний графік потужності можна лише з достатнім ступенем наближеності.

Перевірка адекватності математичної моделі проведена за результатами вимірювань температурних полів та електричних характеристик процесу виробництва карбіду кремнію у промислових агрегатах з використанням наступної методики.

1. Температуру вище 2000...2200 °С вимірюють за допомогою оптичного пірометра і встановлюють в завантаження печі графітової трубки.

2. Вимірюють падіння напруги на окремих елементах короткої мережі (металеві шинопроводи, графітові струмопідводи) та керні печі опору.

3. Реєструють електричні характеристики процесу з приладів контролю - амперметру, вольтметру, мегават-метру, лічильнику енергії.

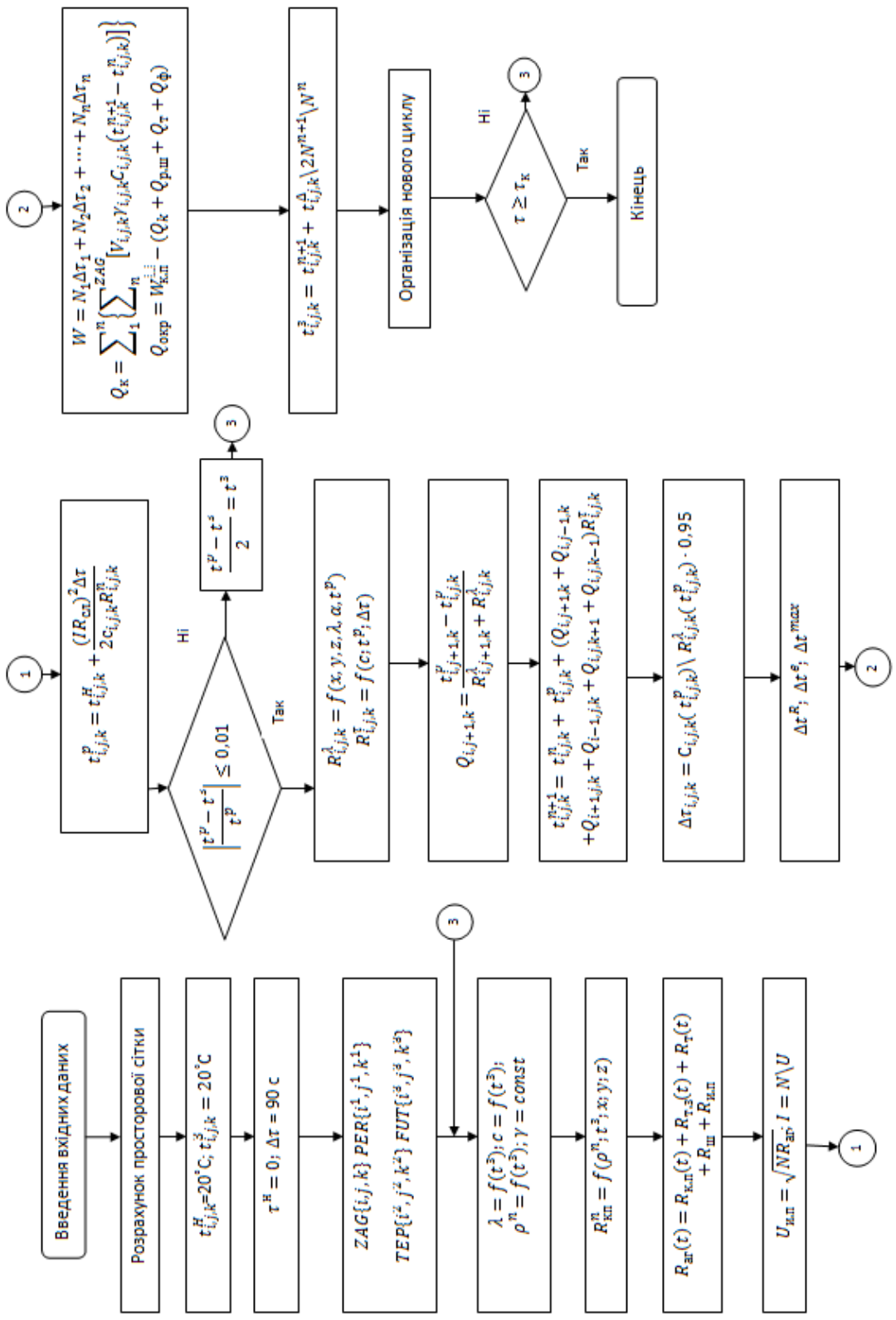



Рисунок 2.4 - Алгоритм розрахунку процесу виробництва карбіду кремнію

4. Розраховують опори елементів короткої мережі та керна печі, а також потужність, що розсіюється в керні печі та в елементах короткої мережі (за величиною падіння напруги на окремих ділянках агрегату та електричних характеристик процесу).

5. Визначають опір джерела електроживлення (за паспортними характеристиками трансформатора та випрямляча).

6. Аналізують матеріальний баланс печі шляхом прямого зважування всіх матеріалів, що завантажуються і вивантажуються, або шляхом виміру обсягу печі, реєстрації кількості завантажуваної в піч шихти, фіксації схеми завантаження, визначення насипної маси і гранулометричного складу допоміжних шихтових матеріалів.

7. Визначають тепло- та електрофізичні характеристики шихтових матеріалів відповідно до їх гранулометричного та якісного складу.

8. Вводять у математичну модель як вихідні дані отримані експериментальні та розрахункові характеристики матеріалів та елементів агрегату для розрахунку за графіком введення потужності температурних полів печі та електричних параметрів процесу.

9. Порівнюють результати експерименту та розрахунку при необхідності уточнюють електро- та теплофізичні характеристики для отримання задовільної збіжності результатів розрахунку та експерименту. Як показали дослідження, зазвичай уточнюють питомий електроопір реакційної шихти та коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційної шихти в діапазоні температур від 0 до 3000 °С.

10. Здійснюють остаточний розрахунок процесу карбідоутворення на математичній моделі. Цей розрахунок дозволяє отримати детальну

інформацію про температурні поля печі при нагріванні, електричні характеристики процесу і баланс енергії електропічного агрегату.

11. Проводять оцінку похибок визначення електричних характеристик процесу за класом точності відповідних приладів контролю.

12. При оцінці похибок вимірювання температур враховують такі фактори:

- відхилення спаю термопари від передбачуваної точки вимірювання в просторі печі внаслідок вигоряння шару тирси, випарювання вологи, розкладання оксидів і виділення летких, неточності установки датчика температури. Сумарна похибка від усіх перелічених факторів не повинна перевищувати 14%;
- шунтування електродів термопари ВР5/20 ізоляцією з оксиду магнію за розрахунками відповідно до  не перевищує 0,7%;
- вплив хімічної корозії електродів термопари при контакті з оксидом магнію, похибка прийнята 0,8% відповідно до даних.

Похибки, пов'язані з тепловою інерцією датчиків температури за рахунок додаткового термічного опір кожуха з графіту та соломки оксиду магнію, не враховуються внаслідок низької швидкості зміни температури в завантаженні печі.

На рис. 2.5, 2,6 показані крива електричного опору печі опору та температур в окремих її точках, отримані експериментально та шляхом розрахунку на математичній моделі.

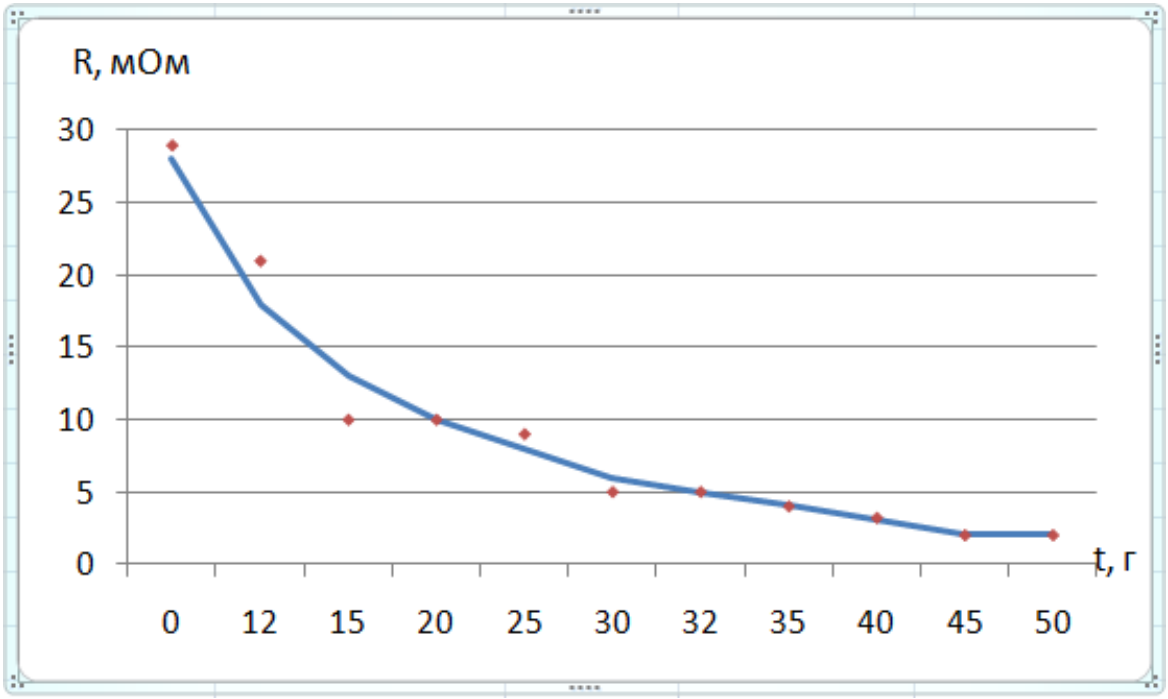



Рисунок 2.5 - Зміна електричного опору печі в процесі плавки (точки – дані з печі, крива – дані з моделі)

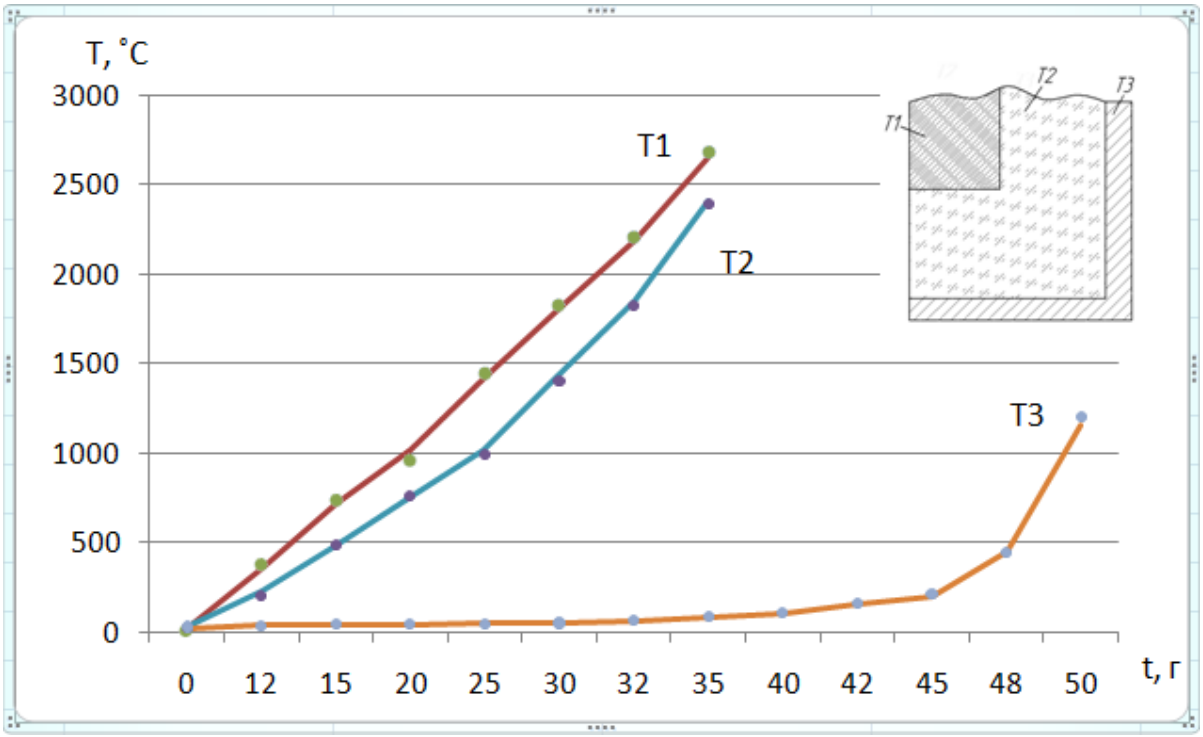



Рисунок 2.6 - Криві зміни температури в окремих зонах печі опору в процесі кампанії (точки – дані з печі, криві – дані з моделі)

Як випливає з рисунка, розбіжність експериментальних даних і даних, отриманих методом математичного моделювання, вбирається у 15...20%. Зберігається характер зміни як електричних параметрів — напруги, струму та опору, так і температури в окремих точках печі — керне, теплоізоляційній шихті та футеруванні.

Суттєво впливає на результати розрахунку з використанням математичної моделі достовірність даних про тепло- та електрофізичні властивості матеріалів у широкому діапазоні температур - від 0 до 3000°С.

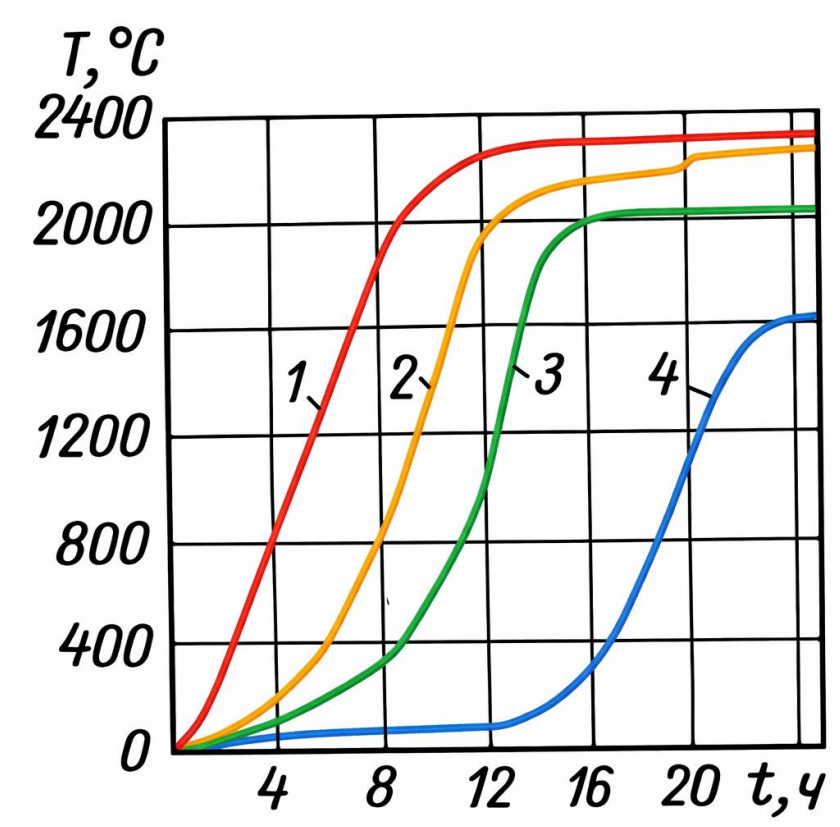
Таким чином, представлені результати свідчать про достатню міру адекватності математичних моделей промислового процесу виробництва карбіду кремнію в електричних печах опору. Це дозволяє використовувати математичні моделі для вдосконалення технології в існуючих печах та при проєктуванні нових конструкцій печей та агрегатів.

## 2.3. Дослідження можливості підвищення енергоефективності процесу виробництва зеленого карбіду кремнію

Удосконалення процесу виробництва зеленого карбіду кремнію — це насамперед удосконалення теплової роботи пічного агрегату, що ґрунтується на достовірній інформації про температурні поля об'єкта. Це дозволяє встановити закономірності перебігу процесів, виділити корисну роботу та втрати енергії.

Для отримання якісного карбіду кремнію температура термічної обробки реакційної шихти в печах повинна бути не менше 2300 ... 2400 ° С (рис. 2.7). Як показали дослідження, у деяких печах досягнення цієї температури у всьому обсязі керна печі економічно недоцільне. Це пов'язано з недостатньою потужністю джерел електроживлення, що не дозволяє виробляти швидке

нагрівання керна на кінцевій стадії процесу. В результаті температура по периферії керна печі зростає дуже повільно, зайво прогрівається теплоізоляція, підвищується температура футерування печі, падає продуктивність і необґрунтовано зростає питома витрата енергії.




1 - керн; 2 – на відстані 150 мм від керна; 3 – на відстані 250 мм від керна; 4 – на відстані 400 мм від керна

Рисунок 2.8 - Температура Т внутрішніх зон печі в залежності від часу t при виробництві карбіду кремнію зеленого

У практиці експлуатації пічних агрегатів нерідко виникає необхідність обмеження споживаної потужності або тимчасового відключення печей у процесі виробництва карбіду кремнію. Найчастіше це пов’язано з використанням енергоємних виробництв як регуляторів споживання електричної енергії в періоди максимального навантаження енергосистем.

Відключення печі призводить до різкого зменшення температурного перепаду по радіусу керна. Унаслідок цього відбувається надто швидке охолодження керна до середньої температури реакційної шихти. При знеструмленні печі її електричний опір різко зростає, а після повторного ввімкнення так само різко зменшується. У період відключення печі на початковій стадії кампанії, а також у зоні максимального рівня потужності, кількість акумульованого в керні тепла практично не змінюється завдяки компенсації тепловтрат за рахунок тепла, що виділяється реакційною шихтою.

Наприкінці кампанії, коли середня температура керна печі перевищує 2000…2200 °С і теплоізоляція вже достатньо прогріта, відключення печі призводить до істотних втрат тепла з реакційної шихти. При цьому спостерігається різке зниження температури в центральній частині керна за відносно незначного зменшення температури на периферії. Таким чином, відбувається певне вирівнювання температурного поля по перерізу керна печі.

У зв’язку з цим низка дослідників пропонувала навмисно вимикати піч на певний проміжок часу з метою вирівнювання температурного поля по перерізу керна та отримання продукції з більш однорідними властивостями. Проте експлуатаційні та модельні дослідження свідчать, що відключення печі на різних стадіях кампанії практично не забезпечує зменшення температурного перепаду по перерізу керна. Водночас подовження тривалості кампанії призводить до зниження продуктивності агрегату та зменшення температури у всіх точках керна печі.

Зокрема, при моделюванні роботи печі опору на стадії нагрівання було встановлено, що за наявності трьох простоїв температура в найхолоднішій точці керна зменшується на 40 °С, тоді як температура футерування наприкінці кампанії зростає на 132 °С. Наведені результати отримано за умови однакової загальної витрати електричної енергії на пічний агрегат. Отже, можна зробити висновок, що будь-яке відключення печі опору негативно впливає на її техніко-економічні та експлуатаційні показники.

Одним з основних чинників, що характеризують енергоємність процесу виробництва карбіду кремнію, є режим термічної обробки в електричних печах опору, який визначається графіком введення енергії в піч.

Графіки, що застосовуються у вітчизняній практиці, зазвичай будуються за принципом рівномірної подачі потужності на керованій ділянці процесу та підтримання номінального значення струму на наступних стадіях кампанії. При цьому передбачається пряма пропорційна залежність між зростанням температури в об'ємі керна печі та кількістю введеної енергії. Основою побудови таких графіків є швидкість підйому температури вздовж центральної осі керна, оскільки зазвичай вважається, що енергія, яка підводиться до печі, розподіляється рівномірно по всьому перерізу керна.

Разом із тим експериментальні дослідження показують, що температурне поле печі має складний характер, а його формування в процесі кампанії залежить від низки технологічних і конструктивних факторів. Так, у результаті дослідження впливу енергетичного коефіцієнта корисної дії та граничних умов теплообміну на поверхні печі японські дослідники отримали складний графік введення енергії. Дослідження виконувалися з використанням математичної моделі, в основу якої було покладено метод Галеркіна.

Процес карбідоутворення в електричних печах опору описується диференційним рівнянням теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти, тому не може бути лінійної залежності між енергією, що вводиться, і зміною температури в керні печі. Крім того, ряд авторів, наприклад, зробили спробу розробити метод розрахунку допустимих термічних напруг, що виникають в обпалених заготовках в процесі їх нагрівання. Результати робіт показують, що швидкість введення енергії в піч визначається термічними напругами, що виникають у тілі заготовки, що знаходиться в нерівномірному температурному полі.

Таким чином, для побудови раціонального графіка введення енергії в піч необхідно знайти залежність між енергією, що вводиться в піч, і перепадом температури по керну печі. Для вирішення поставленого завдання

використано математичну модель процесу карбідоутворення запропонованої вище. За її допомогою можна розрахувати об'ємне температурне поле в керні у процесі всього періоду нагрівання, а також визначити найбільш зручний графік подачі потужності в піч залежно від об’ємів виділення $SiO_2$. Обсяги викидів останнього необхідно скоротити у зв'язку з тим, що при порушенні ходу технологічного процесу відбувається суттєве скорочення продуктивності печі через витік газоподібного кремнію, який не встигає пройти хімічну реакцію карбідоутворення.

Чинний графік введення потужності в піч, а також температура печі в окремих зонах та відповідні втрати SiO2 представлені на рис. 2.9, 2.10, 2.11.

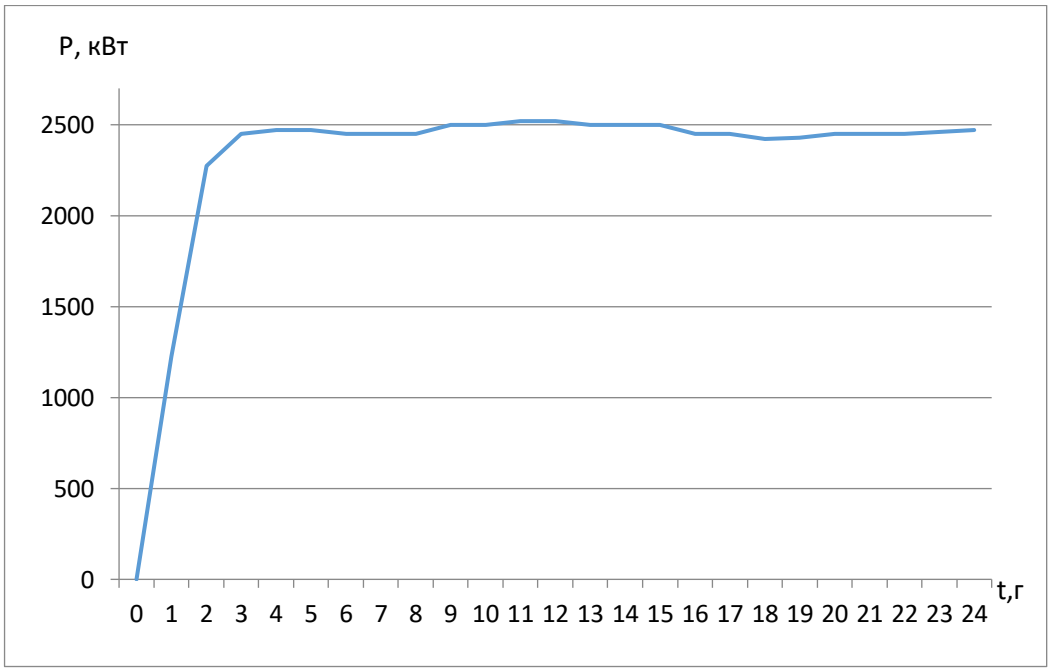
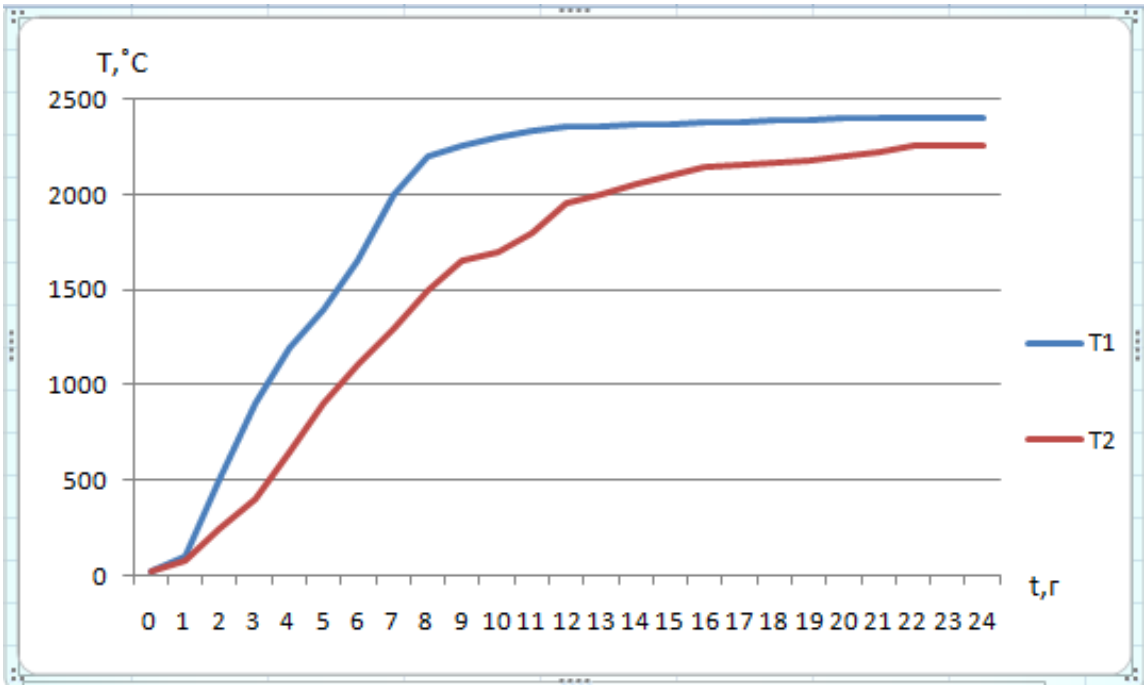



Рисунок 2.9 - Графік введення потужності в піч

Як видно з рисунка 2.9. потужність, що підводиться до печі, підтримується практично на одному рівні протягом всієї кампанії, порушення монотонного навантаження печі може бути викликане тільки відключеннями останньої в години пік.




T1 – температура керна, T2 – температура реакційної зони

Рисунок 2.10 – Динаміка нагріву печі

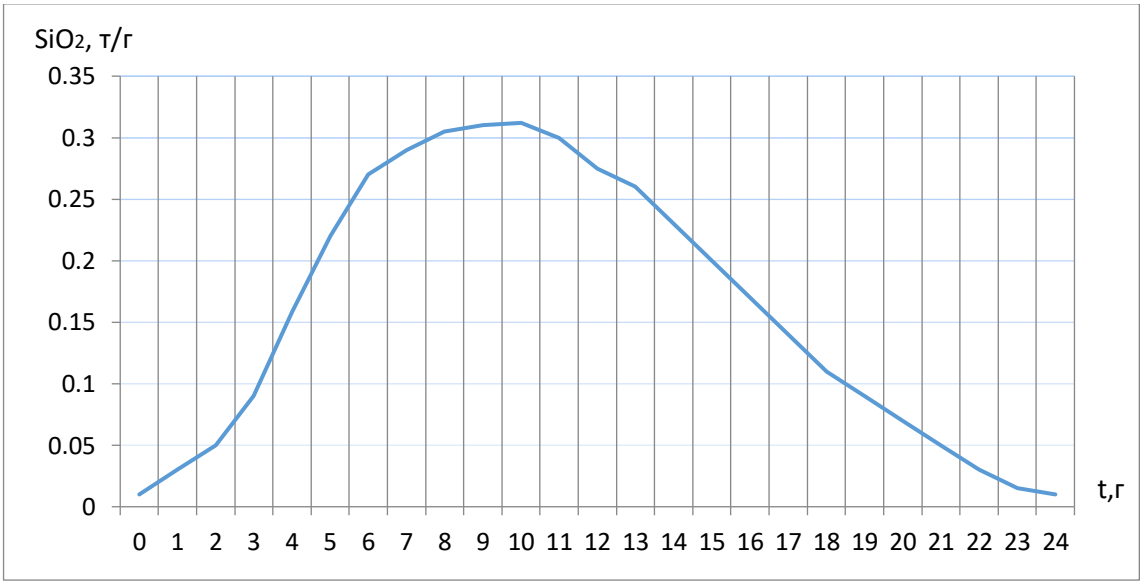



Рисунок 2.11 – Обсяги випаровування $SiO_2$ протягом кампанії

У тому випадку, коли швидкість випаровування кремнієвої кислоти значно вища за швидкість адсорбції її вуглецевим матеріалом, процес карбідоутворення буде пов'язаний з помітними втратами $SiO_2$. Встановлено, що витік $SiO_2$ під час виробництва карбіду кремнію зеленого становить у печі 5,8 - 6,5%, а, у реакційній зоні 14 - 20% (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 - Баланс $SiO_2$ по печі в цілому та реакційній зоні

| Статті приходу та витрати | Зміст $SiO_2$ в зеленому карбіді кремнію | |
|---|---|---|
| | в кг | в % |
| Піч | | |
| Дано в піч з шихтою | 26 531 | 100,0 |
| Отримано з продуктами | 12 752 | 48,0 |
| Витрачено на синтез SiC | 12 523 | 46,2 |
| Витік (втрати) | 1 526 | 5,8 |
| Реакційна зона | | |
| Дано в піч з шихтою | 16 213 | 100,0 |
| Отримано з продуктами | 289 | 1,8 |
| Витрачено на синтез SiC (всього) | 13 702 | 84,5 |
| В тому числі на синтез товарного SiC | 11 568 | 71,3 |
| Витік (втрати) | 2 222 | 13,7 |

Отже, у роботі необхідно запропонувати такий режим роботи печі, який забезпечив би підвищення її продуктивності та зменшив втрати $SiO_2$ у процесі плавки.

Аби вирішити завдання автоматичного вибору потужності, тобто для підтримки оптимального температурного режиму печі розроблено спеціальний алгоритм (рисунок 2.12). В основу останнього покладено той самий метод розрахунку об'ємного температурного поля, що й у попередньому випадку. В якості вихідних даних додатково вводять величину допустимого перепаду температури в обсязі реакційної шихти як функцію температури, межі регулювання вторинної напруги і допустиму величину струму джерела електроживлення.

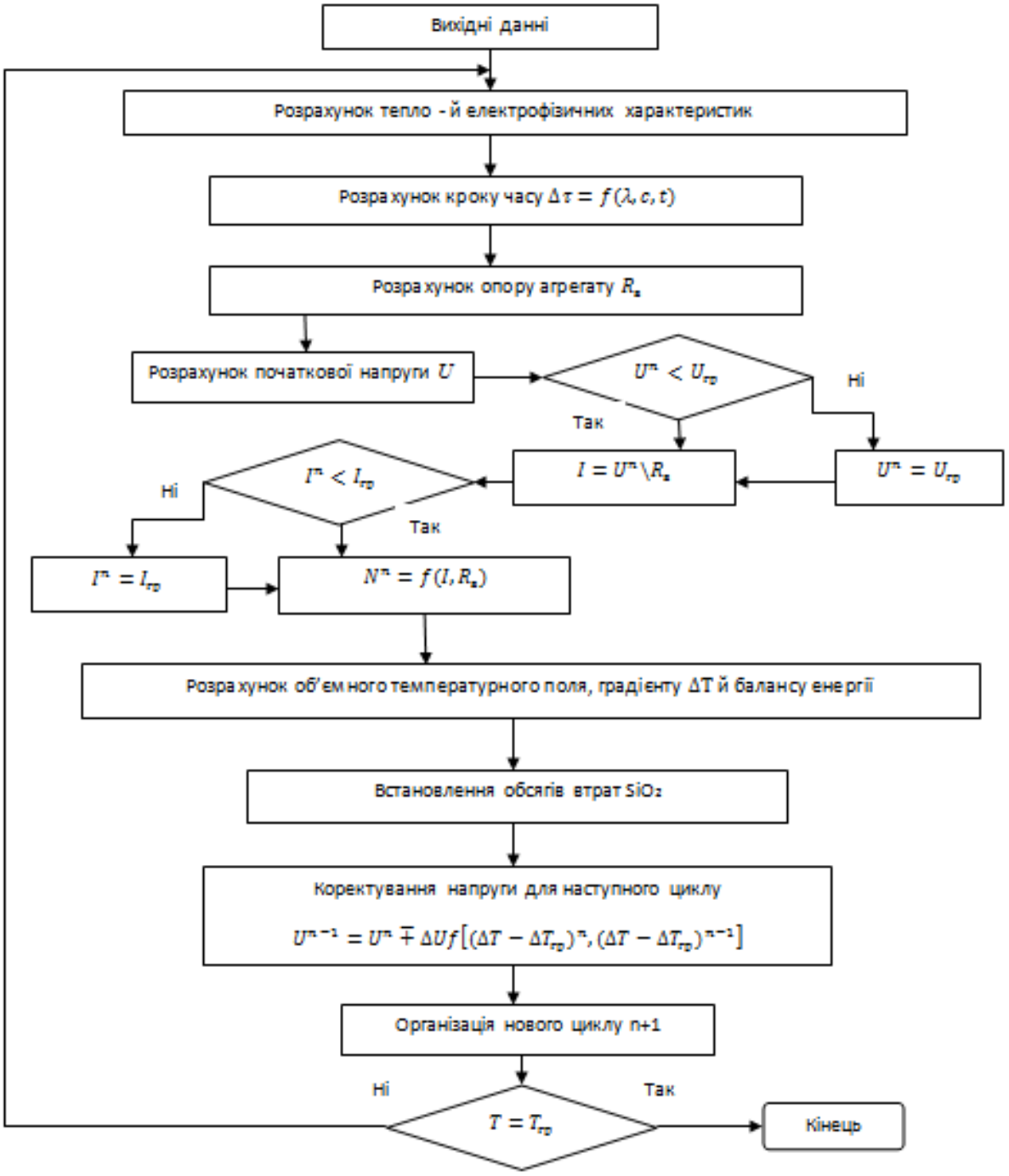



Рисунок 2.12 – Алгоритм процесу карбідоутворення з автоматичним вибором потужності електричної печі опору

Алгоритм цієї задачі після розрахунку об'ємного температурного поля доповнено наступними операціями з розрахунку найбільшого градієнта температури в обсязі заготовок; за визначенням напруги на наступний крок часу (на перший цикл надають початкового значення, зазвичай рівне найбільшому) в залежності від зміни значення та напрямки збільшення розрахованого градієнта температури в порівнянні з допустимим в даному

поточному циклі n і в попередньому циклі n - 1. Це дозволяє з достатньою точністю підтримувати надане значення градієнта температури протягом усього періоду. Як показали дослідження, відхилення температури від заданого градієнта не перевищує 12 %.

Після закінчення розрахунку градієнта температур аналізуються викиди $SiO_2$, що виступає в ролі коригуючого впливу при розрахунку напруги наступного циклу плавки. Крім того, при розрахунку зміни напруги автоматично враховуються також межі регулювання напруги і допустима величина струму. Крім того, при розрахунку зміни напруги автоматично враховуються також межі регулювання напруги і допустима величина струму.

Після розрахунку напруги наступного циклу (відрізок) часу здійснюють організацію нового циклу n + 1. При досягненні заздалегідь заданої температури в найбільш "холодній" точці керна печі розрахунок автоматично переривається.

В результаті досліджень було отримано принципово новий графік введення потужності в піч (рисунок 2.13). Робота печі в запропонованому режимі дозволяє отримати ряд переваг помітного скорочення обсягів споживаної потужності, зниження навантаження на силові лінії і трансформатор печі.

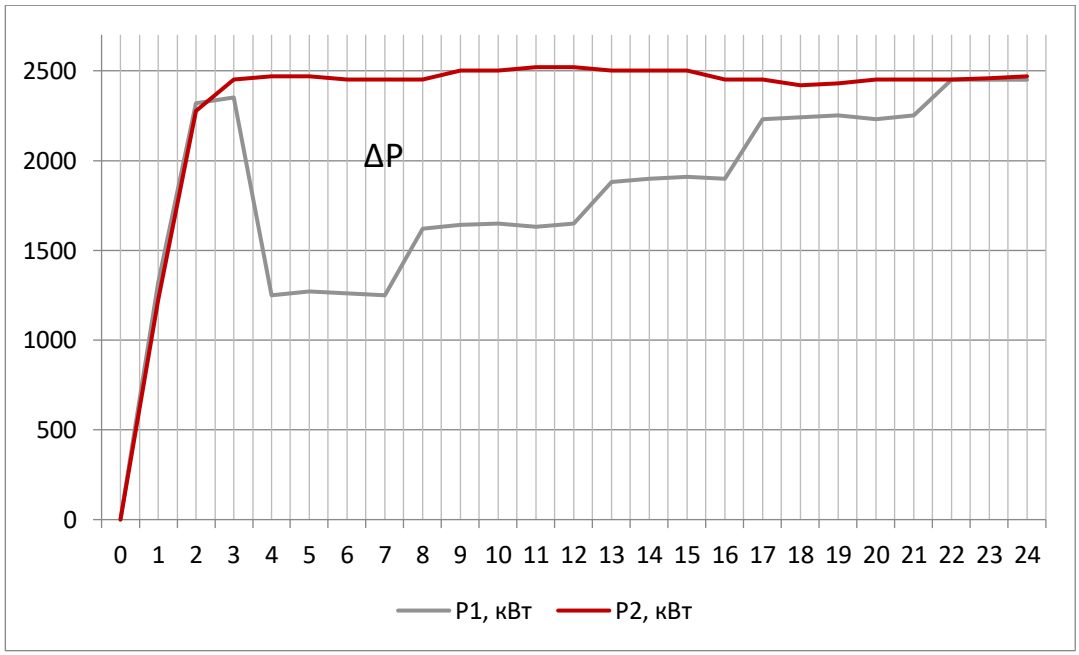



Рисунок 2.13 – Запропонований графік введення потужності у піч

Зміна графіка введення потужності спричинила зміну динаміки набору температури в керні та реакційній зоні печі (рис.2.14).

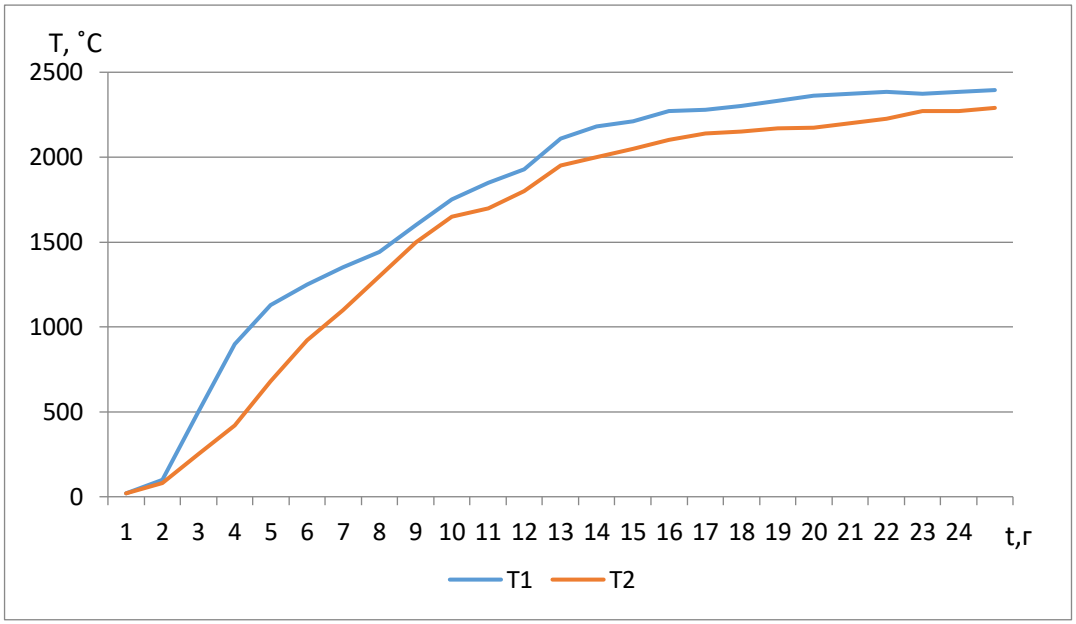



Рисунок 2.14 – Динаміка нагрівання керна T1 та реакційної зони T2

Якщо порівнювати динаміку нагріву до і після зміни графіка подачі потужності в піч, видно, що перепад температур зменшився, що у свою чергу динаміці дозволило скоротити обсяги викидів $SiO_2$ , як видно з наступного рисунка 2.15.

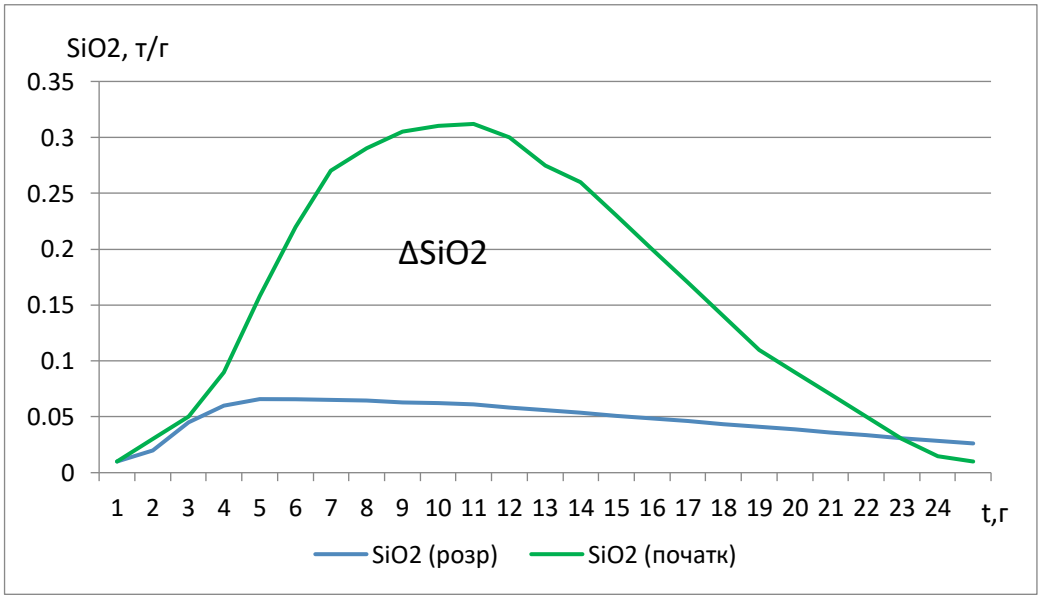



Рисунок 2.15 – Обсяги втрат $SiO_2$ до та після введення нового графіка навантаження печі

Запропоноване рішення щодо зміни графіку подачі потужності в піч дозволило практично виключити факеління печі на початкових етапах плавки, і тим самим запобігти відключенню печі для відновлення цілісності керна. Зниження динаміки нагріву температури дозволило знизити розтріскування керна та реакційної зони та зменшити витрати $SiO_2$, що у свою чергу позначиться на продуктивності печі.

Таким чином, дослідження режимів введення електричної енергії в печі опору на основі математичної моделі дозволяє ефективно, без істотних матеріальних витрат, виявити основні закономірності формування температурного поля печі та розробити економічні режими роботи.

Як критерій, що визначає швидкість введення енергії в печі опору для виробництва зеленого карбіду кремнію, може бути використаний перепад температури по радіусу керна, а також обсяги виділення $SiO_2$.

## 2.4 Вибір газоаналізатору для умов процесу виробництва зеленого карбіду кремнію

Для того щоб забезпечити енергоефективне управління аналізованим процесом, як вже вище було сказано, необхідно забезпечити вимірювання виділення такого компонента, як $SiO_2$. Для цього необхідно підібрати газоаналізатор, що дозволяє забезпечити вимірювання зазначеного компонента газової суміші.

В даний час ринок газоаналізаторів досить широкий, кожен з них призначений для вимірювання вмісту (концентрації) одного або декількох компонентів газових сумішах на тлі конкретної газової суміші в нормованих умовах. Поряд із використанням окремих газоаналізаторів створюються системи газового контролю, що поєднують десятки таких приладів.

Газоаналізатори класифікують таким чином:

1. Термокондуктометричні газоаналізатори. Їхня дія заснована на залежності теплопровідності газової суміші від її складу. Термокондуктометричні газоаналізатори не мають високої вибірковості і використовуються, якщо контрольований компонент теплопровідності істотно відрізняється від інших, наприклад для визначення концентрацій $H_2$, He, Ar, $CO_2$ у газових сумішах, що містять $N_2$, $O_2$ та ін. Діапазон виміру - від одиниць до десятків відсотків за обсягом.

2. Термохімічні газоаналізатори. У цих приладах вимірюють тепловий ефект хімічної реакції, в якій бере участь компонент, що визначається. Найчастіше використовується окислення компонента киснем повітря; каталізатори - марганцево-мідний (гопкаліт) або дрібнодисперсна Pt, нанесена на поверхню пористого носія. Зміна температури $\Delta t$ при окисненні вимірюють за допомогою металевого або напівпровідникового терморезистора. У ряді випадків поверхню платинового терморезистора використовують як каталізатор.

Величина $\Delta t$ пов'язана з числом молей M компонента, що окислився, і тепловим ефектом q відношенням:

$$\Delta t = kMq,$$

де k-коефіцієнт, що враховує втрати тепла, що залежать від конструкції приладу.

3. Магнітні газоаналізатори. Цей тип застосовують визначення $O_2$. Їхня дія заснована на залежності магнітної сприйнятливості газової суміші від концентрації $O_2$, об'ємна магнітна сприйнятливість якого на два порядки більша, ніж у більшості інших газів.

Такі газоаналізатори дозволяють вибірково визначати $O_2$ у складних газових сумішах. Діапазон вимірюваних концентрацій $10^{-2}$ - 100%. Найбільш поширені магнітомеханічні та термомагнітні газоаналізатори.

У магнітомеханічних газоаналізаторах вимірюють сили, що діють у неоднорідному магнітному полі на поміщене в аналізовану суміш тіло.

Точніші газоаналізатори, виконані за компенсаційною схемою. У них момент обертання ротора, функціонально пов'язаний з концентрацією $O_2$ аналізованої суміші, врівноважується відомим моментом, для створення якого використовуються магнітоелектричні або електростатичні системи. Роторні газоаналізатори ненадійні у промислових умовах, їх складно юстувати.

4. Пневматичні газоаналізатори. Їхня дія заснована на залежності щільності ρ і в’язкості ŋ газової суміші від її складу. Зміни густини та в'язкості визначають вимірюючи гідромеханічні параметри потоку.

Поширено пневматичні газоаналізатори трьох типів.

- Газоаналізатори з дросельними перетворювачами вимірюють гідравлічний опір дроселя (капіляра) при пропусканні через нього аналізованого газу. При постійній витраті газу перепад тиску на дроселі - функція щільності (турбулентний дросель), в'язкості (ламінарний дросель) або того й іншого параметра одночасно.
- Струменеві газоаналізатори вимірюють динамічний напір струменя газу, що випливає із сопла. Їх використовують, наприклад, в азотній промисловості для вимірювання вмісту $H_2$ в азоті (діапазон вимірювання 0-50%), у хлорній промисловості – для визначення $Cl_2$ (0-50 та 50-100%). Час встановлення показань цих газоаналізаторів не перевищує кількох секунд, тому їх застосовують також у газосигналізаторах до вибухових концентрацій газів і

пар деяких речовин (дихлоретану, вінілхлориду) в повітрі промислових приміщень.

- Інфрачервоні газоаналізатори. Їхня дія заснована на вибірковому поглинанні молекулами газів та пари ІЧ-випромінювання в діапазоні 1-15 мкм. Це випромінювання поглинають усі гази, молекули яких складаються не менше ніж із двох різних атомів. Висока специфічність молекулярних спектрів поглинання різних газів обумовлює високу вибірковість таких газоаналізаторів та їх широке застосування у лабораторіях та промисловості. Діапазон вимірюваних концентрацій $10^{-3}$ -100%.

5. У дисперсійних газоаналізаторах використовують випромінювання однієї довжини хвилі, отримане за допомогою монохроматорів (призми, дифракційних ґрат). У недисперсійних газоаналізаторах, завдяки особливостям оптичної схеми приладу (застосування світлофільтрів, спеціальних приймачів випромінювання тощо) використовують немонохроматичне випромінювання.

6. Ультрафіолетові газоаналізатори. Принцип їх дії ґрунтується на вибірковому поглинанні молекулами газів та пари випромінювання в діапазоні 200-450 нм. Вибірковість визначення одноатомних газів дуже велика. Дво- та багатоатомні гази мають в УФ-області суцільний спектр поглинання, що знижує вибірковість їх визначення. Однак відсутність УФ-спектру поглинання у $N_2$, $O_2$, $CO_2$ та парів води дозволяє у багатьох практично важливих випадках проводити досить селективні вимірювання у присутності цих компонентів. Діапазон обумовлених концентрацій зазвичай $100^{-2}$ - 100% (для парів Hg нижня межа діапазону $2{,}5 \cdot 100^{-6}$ %).

Ультрафіолетові газоаналізатори застосовують головним чином для автоматичного контролю вмісту $C1_2$, $O_3$, $SO_2$, $NO_2$, $H_2S$, $C1O_2$, $SiO_2$

дихлоретану, зокрема у викидах промислових підприємств, а також для виявлення парів Hg, рідше Ni $(CO)_4$, у повітрі приміщень.

7. Люмінесцентні газоаналізатори. У хемілюмінесцентних газоаналізаторах вимірюють інтенсивність люмінесценції, збудженої завдяки хімічній реакції контрольованого компонента з реагентом у твердій, рідкій або газоподібній фазі.

8. Фотоколориметричні газоаналізатори. Ці прилади вимірюють інтенсивність забарвлення продуктів вибіркової реакції між компонентом, що визначається, і спеціально підібраним реагентом. Реакцію здійснюють, як правило, у розчині (рідинні газоаналізатори) або на твердому носії у вигляді стрічки, таблетки, порошку (відповідно стрічкові, таблеткові, порошкові газоаналізатори). Фотоколориметричні газоаналізатори застосовують для вимірювання концентрацій токсичних домішок (наприклад, оксидів азоту, $O_2$, $C1_2$, $CS_2$, $O_3$, $H_2S$, $NH_3$, HF, фосгену, ряду органічних сполук) в атмосфері промислових зон та в повітрі промислових приміщень.

Під час контролю забруднень повітря широко використовують переносні прилади періодичної дії. Велика кількість фотоколориметричних газоаналізаторів застосовують як газосигналізатори.

9. Електрохімічні газоаналізатори. Їхня дія заснована на залежності між параметром електрохімічної системи та складом аналізованої суміші, що надходить до цієї системи. У кондуктометричних газоаналізаторах вимірюється електропровідність розчинника при селективному поглинанні ним компонента, що визначається. Недоліки цих газоаналізаторів – низька вибірковість та тривалість встановлення показань при вимірі малих концентрацій. Кондуктометричні газоаналізатори широко застосовують визначення $O_2$, CO, $SO_2$, $H_2S$, $NH_3$ та інших.

10. Іонізаційні газоаналізатори. Дія ґрунтується на залежності електричної провідності газів від їх складу. Поява в газі домішок надає додатковий вплив на процес утворення іонів або їх рухливість і, отже, рекомбінацію. Зміна провідності, що виникає при цьому, пропорційно змісту домішок.

Усі іонізаційні газоаналізатори містять проточну іонізаційну камеру, на електроди якої накладають певну різницю потенціалів. Ці прилади широко застосовують для контролю мікродомішок у повітрі, а також як детектори в газових хроматографах.

В результаті аналізу ринку газоаналізаторів вибір було зупинено на приладі ДОЗОР-С - багатофункціональний газоаналізатор багатокомпонентних сумішей. Газоаналізатор призначений для безперервного автоматичного вимірювання від 1-го до 3-х компонентів з наступного набору газів CO, $CO_2$, $SO_2$, $SiO_2$, $H_2$, $N_2$, $CH_4$, NO, $O_2$ при контролі різних технологічних процесів.

Газоаналізатор ДОЗОР-С виготовляється як у три-, двокомпонентному, так і в однокомпонентному варіанті і використовується у складі автоматизованих систем управління технологічними процесами в чорній, кольоровій металургії, цементній та скляній промисловості, підприємствах виробництва цегли та кераміки, у хімічній та нафтохімічній промисловості, ТЕЦ, ДРЕС, котельнях і т.д.

Тип газоаналізатора – стаціонарний. Спосіб забору проби – примусовий. Характеристики газоаналізатора ДОЗОР-С наведені в таблиці 2.2.

Переваги газоаналізатора ДОЗОР-С:

- мікропроцесорна система обробки інформації і самодіагностики;
- вбудована світлова та звукова сигналізація по кожному каналу;
- цифровий відліковий пристрій концентрації газу;

Таблиця 2.2 – Характеристики газоаналізатора ДОЗОР-С

| Характеристики | Значення |
|---|---|
| Вимірювані компоненти | $CO$, $CO_2$, $SO$, $SiO_2$, $H_2$, $N_2$, $CH_4$, $NO$, $O_2$ |
| Температура навколишнього середовища | Для блоків: -20…+50º С<br>Для датчиків: -40…+50º С |
| Вихідні сигнали | - управління виконавчими пристроями - "сухий" контакт реле, 2 А, 220 В;<br>- струмовий вихід - 0-5, або 4-20 мА;<br>- цифровий вихід - RS 232 або RS 485; |
| Живлення | - Основне ~220 В; ±220В; ±24В<br>- Резервне ±24В, ~220В |
| Пороги включення сигналізації,% НКПР | - попереджувальна, "ПОРІГ 1" – 10 (20)*;<br>- передаварійна, "ПОРІГ 2" – 20 (40)*;<br>- сигнал "Відмова";<br>* – налаштовуються на вимогу замовника |
| Діапазон вимірюваних каналів | 1 – 5 |
| Діапазон вимірювань сигналізаторів | від 0 до 50% НКПР |
| Перевірочний компонент | метан, пропан або гексан |
| Захист | IP 65 |
| Габаритні розміри складових частин сигналізатора | - БПС: 284 х 232 х 143 мм;<br>- датчик: 100 х 115 х 110 мм |
| Маса складових частин сигналізатора | - БПС – 4,0 кг;<br>- датчик – 0,4 кг |

- можливість управління зовнішніми виконавчими пристроями;
- перешкодозахищена лінія зв'язку "Датчик-БПС";
- наявність струмових і цифрових виходів;
- можливість одночасного контролю довибухонебезпечних концентрацій і ГДК шкідливих газів (чадний газ, сірководень і ін.).

За даним розділом магістерської роботи можна зробити такі висновки:

1. Зроблено вибір математичної моделі печі опору, адекватність якої експериментально доведено.

2. Розроблено алгоритм розрахунку потужності, що підводиться в піч, з метою скорочення втрат газоподібного $SiO_2$. Отримані графіки потужності печі, що вводиться в піч, динаміки нагріву по зонах, крива обсягів викидів $SiO_2$ в процесі плавки.

3. Проведено вибір газоаналізатора для умов виробництва зеленого карбіду кремнію.

# 3. РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

На моделі отримано алгоритм розрахунку потужності, що вводиться в піч на підставі аналізу температури по зонах печі, а також обсягів випаровування $SiO_2$. Управління процесом плавки за вказаною траєкторією дозволяє скоротити обсяги споживання потужності на виробництво зеленого карбіду кремнію та скоротити уліт газоподібного $SiO_2$.

Запропоноване рішення має на увазі впровадження газоаналізатора, придатного для використання в умовах розглядуваного процесу, а також цілого комплексу технічних засобів, що тягне за собою певні витрати в капітальні вкладення, а також на демонтаж та монтаж нового обладнання.

Загальні витрати, які імовірно знадобляться для запровадження запропонованого заходу становлять С=4576000 грн.

Оцінка ефективності запропонованого керуючого впливу виконана в такий спосіб. Максимальна потужність печі складає $P_{max}$ = 2,5 МВт/год, середньогодинна потужність печі складає $P_a$ = 2420 кВт/год, середньоспоживана енергія на плавку $W_a$ ~ 60 МВт·год, а ціна кіловат-години електроенергії, що відпускається підприємству 6,00 грн.

З представленого на рис. 2.11 графіка подачі потужності в піч можна отримати обсяг енергії зекономленої внаслідок ведення плавки у новому режимі. Таким чином, з графіка отримуємо:

$$W_э = 2500 \cdot 4 + 1300 \cdot 3 + 1600 \cdot 4 + 1800 \cdot 4 + 2300 \cdot 4 + 2500 \cdot 4 = 49000 \text{ кВт·год.}$$

Економія енергії $\Delta W_e$ складає порядку 11 МВт·год.

Таким чином, економія на одній плавці становитиме:

$$Е_М = W_Е \cdot Ц_{ел.ен.} = 11000 \cdot 6 = 66000 \text{ грн.}$$

Приймаючи середню кількість плавок на місяць $N_{пл} = 26$, отримуємо:

$$Е_М = Е \cdot N_{пл} = 66000 \cdot 26 = 1716000 \text{ грн/міс.}$$

Річна економія становить:

$$Е_Р = Е_М \cdot 12 = 20{,}592 \text{ млн грн/рік.}$$

Вказана економія наведена для печі, загальна кількість яких у цеху становить 14 одиниць. Крім того, запропонований графік введення потужності в піч дозволяє скоротити обсяги ульоту СОУ газоподібного $SiO_2$ умовно на 76% (рис. 2.14), що дозволить збільшити продуктивність печі.

Для визначення рівня підвищення енергоефективності скористаємося даними щодо продуктивності печі ПП у 6 т SiC за плавку та обсягом ульоту ОУ газоподібного продукту, який складає виходячи з вищеописаних даних до 20%.

Таким чином можна судити про наступне підвищення продуктивності:

$$\Delta П = (ПП \cdot ОУ) \cdot СОУ = (6 \cdot 0{,}2) \cdot 0{,}76 = 0{,}912 \text{ т.}$$

Розрахунок ефективності вкладень у модернізацію обладнання та технологію плавки карбіду кремнію.

Розрахунковий коефіцієнт ефективності капіталовкладень:

$$Е_р = Е_{річна}/К = 20592000/4576000 \sim 4{,}5.$$

Термін окупності капітальних вкладень, років: 4,5.

# ВИСНОВКИ

У магістерській роботі комплексно розглянуто енерговитратний технологічний процес виробництва зеленого карбіду кремнію в електричних печах опору (типу Ачесона). Аналіз поточного стану систем керування електропічними агрегатами на вітчизняних підприємствах виявив суттєве відставання від сучасних світових стандартів. Зокрема, існуючі регламенти часто ігнорують динаміку фізико-хімічних перетворень, що призводить до значних непрямих втрат енергії.

Дослідження показало, що критичним фактором неефективності є неконтрольована дисоціація компонентів шихти та вихід газоподібного монооксиду кремнію ($SiO_2$ у газоподібній фазі та продукти його окислення). Це не лише погіршує екологічні показники, але й означає пряму втрату сировини та енергії, витраченої на її нагрів.

Для реалізації поставлених завдань розроблено математичну модель теплових та електричних процесів у печі опору. Модель враховує нелінійну залежність теплофізичних властивостей матеріалів від температури та геометрію реакційної зони. Проведено перевірку моделі на адекватність шляхом порівняння розрахункових даних із реальними показниками промислових плавок. Результати підтвердили, що розроблена модель коректно відтворює динаміку температурних полів і є придатною для проведення чисельних експериментів з оптимізації виробництва зеленого карбіду кремнію.

Ключовим науково-практичним результатом роботи стала пропозиція використовувати параметр обсягу виділення $SiO_2$ (втрат кремнію) як зворотний зв'язок для розрахунку режиму роботи печі. Встановлено кореляцію між підведеною потужністю та інтенсивністю газовиділення. Розроблено оригінальний алгоритм керування потужністю джерела живлення: при перевищенні критичного рівня викидів SiO2 система автоматично коригує (обмежує) введення потужності, запобігаючи "перегріву" реакції та марній втраті сировини.

Отримано нові графіки введення електричної потужності та динаміки нагріву по зонах печі, які узгоджені з кривою обсягів викидів $SiO_2$. Це дозволяє вести плавку в енергоощадному режимі.

Для технічної реалізації методу проведено аналіз ринку та обґрунтовано вибір промислового газоаналізатора, здатного працювати в агресивних умовах цеху виробництва карбіду кремнію (висока запиленість, температура).

Розрахунок техніко-економічного обґрунтування показав доцільність впровадження запропонованої системи. Термін окупності капітальних вкладень (придбання газоаналізатора, контролерів, налагодження) становить 4,5 роки, що є прийнятним показником для важкої промисловості. Окрім економічного ефекту, впровадження методу забезпечує зниження техногенного навантаження на довкілля.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gupta G. S., Raj P., Tiwari K. An analysis of heat distribution in the production of silicon carbide in Acheson furnaces // Journal of Materials Processing. – 2019. – Vol. 29. – Article 10.1016.

2. Matizamhuka W. R**.** Gas transport mechanisms and the behaviour of impurities in the Acheson furnace for the production of silicon carbide // Heliyon. – 2019**. –** Vol. 5**.** – Article e01495.

3. Transient thermal modeling of Acheson process for manufacturing silicon carbide / I. R. Chaudhuri, P. Maity, B. Sarangi, A. K. Pal // Metallurgical and Materials Transactions B. 2006. Vol. 37, no. 6. P. 997–1007.

4. Бондаренко В. І., Козлов А. М. Електротермічні процеси і установки : навч. посіб. — Київ : Вища школа, 2016. — 352 с.

5. Кривенко О. В. Енергоефективність промислових електропечей. — Харків : НТУ «ХПІ», 2018. — 214 с.

6. Левченко В. П., Савченко М. І. Електричні печі опору. — Київ : Техніка, 2014. — 296 с.

7. Жуйков В. Я. Енергозбереження в електротермічних установках. — Київ : ІЕЕ НАН України, 2017. — 188 с.

8. Бабенко О. М., Руденко С. С. Методи зниження енергоспоживання електропечей опору // Енергетика та електрифікація. — 2019. — № 4. — С. 32–38.

9. Сінчук О. М. Промислова електротермія : підручник. — Дніпро : НМетАУ, 2015. — 410 с.

10. Ковальчук Л. І. Оптимізація режимів нагріву в печах опору // Вісник НТУ «ХПІ». — 2020. — № 2. — С. 45–51.

11. IEC 60519-1:2015. Safety in electroheat installations — General requirements. — Geneva : IEC, 2015. — 72 p.

12. Плахотнік О. В. Автоматизація електротермічних процесів. — Київ : Кондор, 2018. — 264 с.

13. Бойко В. С., Даниленко О. П. Аналіз теплових втрат у печах опору // Технічна електродинаміка. — 2017. — № 6. — С. 89–94.

14. Кузнецов С. В. Енергозберігаючі технології в промисловості. — Харків : Факт, 2016. — 320 с.

15. Мельник Л. Г. Основи енергоефективності. — Суми : Університетська книга, 2019. — 346 с.

16. Rombaut M., Dubois J. Energy efficiency in industrial electric furnaces // Applied Thermal Engineering. — 2018. — Vol. 134. — P. 284–292.

17. Fitzer E., Heine M. Carbon materials for resistance furnaces // Journal of Materials Science. — 2016. — Vol. 51. — P. 6235–6248.

18. Kalogirou S. Industrial energy systems and efficiency improvement. — London : Academic Press, 2017. — 512 p.

19. Шевченко О. Л. Вплив теплоізоляційних матеріалів на ККД електропечей // Промислова теплотехніка. — 2021. — № 1. — С. 56–61.

20. European Commission. Best Available Techniques (BAT) for energy efficiency. — Brussels, 2019. — 430 p.

21. Федоренко Г. А. Моделювання теплових процесів у печах опору. — Львів : Львівська політехніка, 2020. — 198 с.

22. IEEE Std 3007.3-2012. Recommended practice for energy efficiency in industrial facilities. — New York : IEEE, 2012. — 98 p.

23. Каплун В. О. Підвищення енергоефективності електротермічних агрегатів промислових підприємств. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. — 256 с.

24. Гончаренко О. Є., Тимошенко В. М. Сучасні методи керування режимами електропечей опору // Наукові праці ДонНТУ. — 2020. — № 1. — С. 64–70.

25. Morin C., Leprince D. Optimization of resistance furnace thermal performance // Energy Conversion and Management. — 2019. — Vol. 198. — P. 111832.

26. Bejan A. Advanced engineering thermodynamics. — 4th ed. — Hoboken : Wiley, 2016. — 912 p.

27. Ткаченко С. Й. Методи теплового аналізу електротермічних установок. — Вінниця : ВНТУ, 2019. — 184 с.

28. International Energy Agency. Energy efficiency in industry. — Paris : IEA, 2020. — 154 p.

29. Шидловський А. К., Праховнік А. В. Енергозбереження та енергоефективність у промисловості. — Київ : Наукова думка, 2018. — 412 с.

30. Кулик О. А. Підвищення коефіцієнта корисної дії електропечей опору шляхом оптимізації теплообміну // Електротехніка і електромеханіка. — 2021. — № 5. — С. 39–45.

32. Rahman M. M., Hasan M. M. Thermal efficiency improvement of electric resistance furnaces // Journal of Cleaner Production. — 2020. — Vol. 276. — P. 124197.

33. Нікітін В. І. Теплоізоляційні матеріали для електротермічних установок. — Одеса : ОНПУ, 2017. — 168 с.