

УДК 661.68:669

<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2021.03>

Дерев'яно І.В., Жаданос О.В.

Дослідження теплоенергетичних процесів виробництва карбіду кремнію в печі опору

Derevyanko I.V., Zhdanos O.V.

Research of thermal energy processes during silicon carbide production in the resistance furnace

Мета. Карбід кремнію є одним з найважливіших штучних неорганічних матеріалів, який широко використовується для виробництва абразивних інструментів, високотемпературних нагрівачів, вогнетривкої кераміки та в металургії. Основна маса карбіду кремнію виробляється у печах опору. Однією з проблем процесу виробництва карбіду кремнію є недостатній моніторинг теплового стану робочого простору печі, що не завжди дозволяє вибрати раціональні електричні режим роботи і, відповідно, отримувати матеріал відповідної якості. Одним із методів вирішення проблеми є комп'ютерне моделювання теплового стану печі опору. Тому метою даної роботи є розробка комп'ютерної моделі теплового стану реакційної зони печі опору, що надалі дозволить розробити технологічні рекомендації щодо режимів ведення процесу отримання карбіду кремнію. Також розробка математичної моделі динаміки теплового стану печі опору відкриває нові можливості задля вдосконалення існуючих систем автоматизованого управління, що є дуже важливим з точки зору реалізації парадигми Індустрія 4.0 на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України.

Методика. Розроблено теплофізичну модель процесу виробництва карбіду кремнію в печі опору. Методом кі-нцевих різниць виконано розрахунок динаміки теплового стану робочої зони печі.

Результати та наукова новизна. На підставі результатів моделювання визначено розміри зон утворених продуктів вуглецевотермічного відновлення кремнезему за рахунок тепла, що виділяється при пропусканні електричного струму через kern печі, визначений температурний фронт протікання відновлювальних реакцій.

Практична цінність. Розроблена модель дозволить оцінити вплив динаміки потужності, що підводиться, на розміри зон продуктів відновлення, отримати аналітичні залежності зміни теплового стану реакційної зони печі та надалі розробити технологічні рекомендації щодо ведення процесу виробництва карбіду кремнію та вдосконалення автоматизованої системи управління печі. Запропоновано структуру управління тепловим режимом печі опору та управляючого обчислювального комплексу на базі техніки фірми Siemens.

Ключові слова. Карбід кремнію, піч опору, теплофізична модель, температурні зони, фронт відновлювальних реакцій, вторинні матеріали, автоматизована система управління

Abstract

The goal. Silicon carbide is one of the most essential artificial inorganic materials widely used to produce abrasive instruments, high-temperature heaters, fireclay ceramics, and metallurgy. The most amount of silicon carbide produces in the resistance furnaces. One of the issues of the silicon carbide production process is the lack of supervisory of thermal state in the furnace working space, which does not always allow for select rational electrical modes and accordingly get the material of appropriate quality. One of the methods to solve this issue is computer modeling the thermal state of the resistance furnace. Therefore, the goal of this research is the development of a computer model of the thermal state in the reaction zone of the resistance furnace, that further allows the development of technological recommendations concerning modes of conducting the process of obtaining silicon carbide. In addition, the development of a mathematical model of the dynamics of the thermal state of the resistance furnace opens up new opportunities for improving the existing automated control systems, which is very important from the point of view of the implementation of the Industry 4.0 paradigm at the enterprises of the mining and metallurgical complex of Ukraine.

Methodology. The thermophysical model of the silicon carbide production process in the resistance furnace was developed. By finite difference method, the dynamics of the thermal state of the reaction zone in the furnace are computed.

Results and scientific novelty. Zones of the existence of products of carbothermic reduction of silica due to the heat generated when an electric current is passed through the furnace core are sized up by results of modeling, and the temperature front of the progress of the reductive reactions was detected.

Practical value. The developed model allows for evaluating the influence of supplied power dynamics on the reduction products size zones, obtaining the analytical dependences of changes in the thermal state of the reaction furnace zone, and thereafter developing the technological recommendations concerning silicon carbide production process performance and improvements for the furnace automated control system. The structure of control of the thermal modes of the resistance furnace and the control computer complex based on Siemens technology is proposed.

Keywords. Silicon carbide, resistance furnace, thermophysical model, temperature zones, front of reducing reactions, secondary materials, automated control system

Вступ. Карбід кремнію є одним з найважливіших штучних неорганічних матеріалів, який широко використовується для виробництва абразивних інструментів, високотемпературних нагрівачів, вогнетривкої кераміки та металургії [1]. Більшість виробленого світовою промисловістю карбіду крем-

нію отримують способом, запропонованим Ачесоном наприкінці позаминого століття [2]. Сутність способу полягає у вуглецевотермічному відновленні кремнезему за рахунок джоулевого тепла, що виділяється при проходженні електричного струму через kern печі. Принципова схема самохі-

Дерев'яно І.В.,	
Жаданос О.В.	

дної печі опору представлена рис. 1.

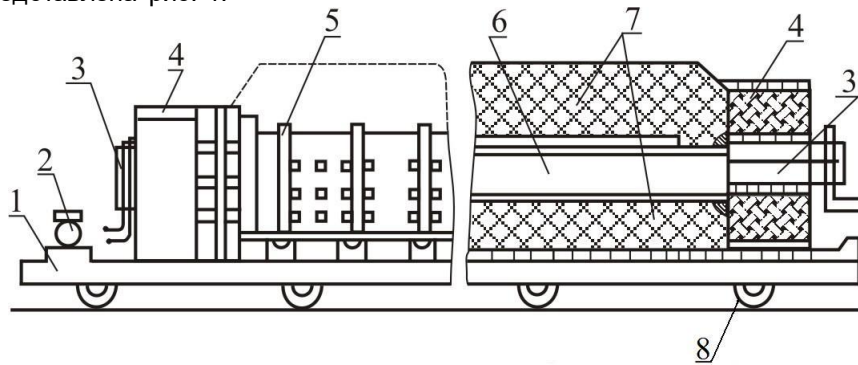


Рисунок 1. Самохідна електропечь опору для одержання карбіду кремнію: 1 – візок; 2 – механізм пересування печі; 3 – електродні вузли; 4 – торцеві стінки з вогнетривкої цегли; 5 – стійки кріплення бокових щитів; 6 – робочий електроопір (керна); 7 – шихта; 8 – колісна пара

Процес виробництва SiC дуже енергомісткий потребує великих енергетичних витрат 7300...7600 кВт·год/т. За даними [3, 4] частка електричної енергії в структурі собівартості абразивного карбіду кремнію становить 50...60%, при завантаженні шихтових матеріалів 60...70 т, вихід товарної продукції становить 10,5...11,5 т (15...19%). Тому забезпечення максимального виходу продукту при раціональній витраті електричної енергії є важливим виробничим завданням.

Найбільш точні способи керування енергетичним процесом одержання SiC можна було б здійс-

нити на підставі прямих вимірювань температури реакційної зони печі. Однак, висока температура і агресивне середовище унеможливають застосування прямих методів контролю температури, заснованих на використанні термопар або пірометрів. Непрямі методи, що базуються на вимірі електроопору керна або сигналів акустичної емісії, не знайшли промислового застосування внаслідок високих похибок. Тому управління процесом здійснюється за емпірично встановленими графіками динаміки введення потужності [3] (рис 2).

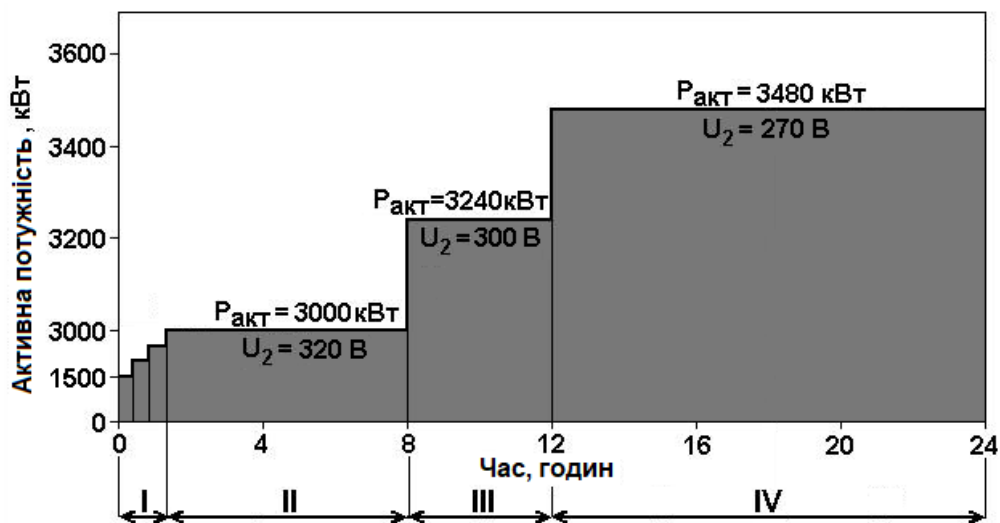


Рисунок 2. Динаміка потужності, що вводиться по ходу процесу отримання карбіду кремнію: I (0-1,5 год.) – набір потужності 1500-3000 кВт; II (1,5-8 год.) – потужність 3000 кВт; III (8-12 год.) – потужність 3240 кВт; IV (12-24 год.) – потужність 3480 кВт

Основним критерієм управління енергетичним режимом у цьому випадку є характеристика шихтових матеріалів та вид одержуваного карбіду кремнію. Для розробки раціональних технологічних режимів виробництва SiC за методом Ачесона потрібна інформація про процеси формування теплового поля печей і параметри хімічних реакцій, що ініціюються цим полем, тому доцільно для

отримання інформації про ці процеси використовувати математичне моделювання. Також розробка математичної моделі динаміки теплового стану печі опору відкриває нові можливості задля вдосконалення існуючих систем автоматизованого управління, що є дуже важливим з точки зору реалізації парадигми Індустрія 4.0 на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України [5].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Дослідженню теплоенергетичних процесів у печах опору присвячено ряд робіт, наприклад [6, 7], у яких наведено методологію побудови математичних моделей цього процесу та отримано відповідні моделі. Однак слабкість обчислювальних засобів суттєво ускладнювала модельні дослідження та обробку отриманих результатів. Сучасний рівень математичного моделювання та розвитку ПЕОМ дозволяє зняти зазначені обмеження.

Мета і завдання досліджень. Метою даного дослідження є розробка комп'ютерної моделі теплового стану реакційної зони печі опору, що надалі дозволить розробити технологічні рекомендації щодо ведення процесу отримання карбіду кремнію.

Теплофізична модель процесу. З точки зору математичного моделювання піч опору для виробництва карбіду кремнію є складним енерготехнологічним та теплофізичним об'єктом. В процесі отримання карбіду кремнію основним джерелом тепла виступає електрична енергія. Електроживлення печі здійснюється від однофазного трансформатора (рис. 3).

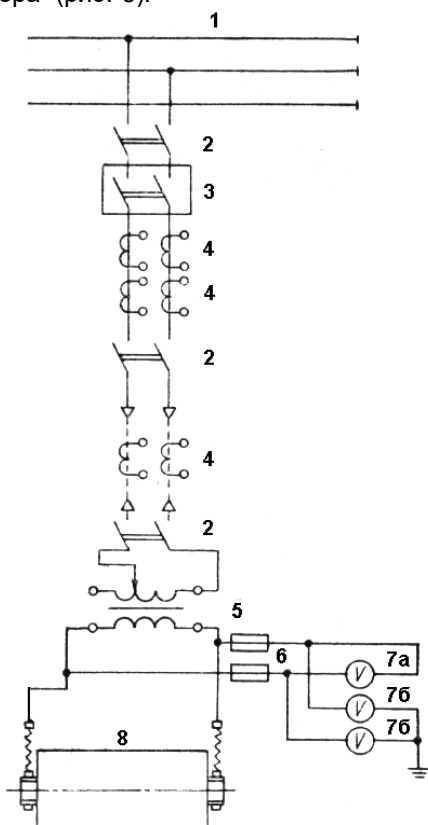


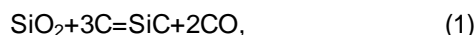
Рисунок 3 Принципова електрична схема включення печі опору для одержання карбіду кремнію потужністю 4000 кВ·А: 1 – шини високої напруги (10 кВ); 2 – повітряні роз'єднувачі (тип РВФ-10/600); 3 – масляний вимикач (тип ВМГ-10, 10/600); 4 – вимірювальні трансформатори струму (тип ТПЛ-10-0.5/Р-400); 5 – пічний трансформатор; 6 – плавкі запобіжники; 7 – вольт-

метри (типу Е-378) для вимірювання лінійної (а) та фазної (б) напруги; 8 – піч опору

Пічний трансформатор типу ЕОЦН 8200 – 10 має встановлену потужність 4000 кВ·А, допустиму силу струму в обмотці високої напруги з урахуванням перегріву ≤ 400 А. Напруга з високого боку 10,5-11 кВ, з низькою 408-206 В (17 ступенів зміни напруги).

Тепловий потік, що утворився в керні перетином 0,6×0,8 метра, поширюється з внутрішніх зон печі від керна в зовнішні зони. За рахунок прогрівання реакційної шихти процес карбідоутворення починається в прикерновому шарі, а потім поширюється на периферійні зони.

Сумарна реакція процесу взаємодії кварцового піску з вуглецем нафтового коксу має вигляд:



$$\Delta G = 555\,615 - 322,11 \cdot T, \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta G = 0, \text{ якщо } T = 1725 \text{ К.}$$

У печі опору виділяють чотири температурні зони [7, 8]:

1. $T < 1452^\circ\text{C}$. При цих температурах взаємодія компонентів відсутня склад вихідних і кінцевих продуктів практично збігається.

2. $1452^\circ\text{C} < T < 2609^\circ\text{C}$. При надлишку вуглецю в продуктах реакції основним продуктом, що містить кремній є карбід кремнію, а при дефіциті вуглецю відновлення SiO_2 йде тільки до газоподібного моноксиду кремнію.

3. $2609^\circ\text{C} < T < 2927^\circ\text{C}$. У цьому температурному інтервалі основним продуктом відновлення є кремній.

4. $T > 2927^\circ\text{C}$. У цій області температур всі продукти реакцій, що містять кремній при будь-якому співвідношенні вихідних компонентів можуть перебувати тільки в газоподібному стані.

Піч працює в не стаціонарному тепловому режимі в результаті чого теплові втрати непостійні і збільшуються з часом. Температурні умови печі визначають процес утворення карбіду кремнію, а теплові втрати є критерієм правильності вибору тривалості виробництва.

Таким чином, на динаміку теплового стану печі впливають такі фактори: енергія, що виділяється на керні печі, витрати енергії внаслідок ендотермічних реакцій, наявність значної кількості газів, що відходять, теплопередачі в навколишнє середовище. З урахуванням розташування керна по всій довжині печі приймаємо припущення про рівномірне виділення енергії із поверхні керна. При оцінці динаміки теплового стану футерування печі вважаємо, що теплові потоки спрямовані тільки в осьовому напрямку. Тому в даній статті розглядається двовимірний модель теплопередачі в об'ємі печі та одновимірний модель теплопередачі в шмотній футеровці через днище і бічні стінки.

Тоді диференціальні рівняння теплопровідності для робочого простору печі (2) та футерування

$$C_{ш}(T_{ш}) \cdot \rho_{ш} \frac{\partial T_{ш}}{\partial \tau} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{ш}(T_{ш}) \frac{\partial T_{ш}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_{ш}(T_{ш}) \frac{\partial T_{ш}}{\partial y} \right] - C_{газ} \cdot \rho_{газ} \cdot v_{ф}(\tau) \cdot T_{газ} \right) - \frac{\rho^0}{\nu \cdot \mu} \cdot Q_{SiC} \frac{d\eta}{d\tau} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{ф}(T_{ф}) \cdot \rho_{ф} \cdot \frac{\partial T_{ф}}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{ф}(T_{ф}) \frac{\partial T_{ф}}{\partial x} \right) && \text{для стінок печі} \\ C_{ф}(T_{ф}) \cdot \rho_{ф} \cdot \frac{\partial T_{ф}}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{ф}(T_{ф}) \frac{\partial T_{ф}}{\partial y} \right) && \text{для днища печі} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де $C_{ш}(T_{ш}), C_{ф}(T_{ф}), C_{газ}$ – питомі теплоємності шихтових матеріалів, футерування та відпрацьованого газу, $\rho_{ш}, \rho_{ф}, \rho_{газ}$ – щільності, $\lambda_{ш}(T_{ш}), \lambda_{ф}(T_{ф})$ – коефіцієнти теплопровідності шихтових матеріалів та футерування, $v_{ф}(\tau)$ – швидкість фільтрації газу, $T_{газ}$ – температура газу, ρ^0 – початкова концентрація шихтових матеріалів, ν, μ – стехіометричний коефіцієнт та молекулярна вага вихідних шихтових матеріалів, Q_{SiC} – тепловий ефект реакції утворення карбиду кремнію, η – глибина перетворення вихідних матеріалів.

У зв'язку з тим, що відома потужність, що виділяється на керні, для межі керн – простір печі задаються граничні умови 2-го роду [9]:

$$-\lambda_{ш}(T_{ш}) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) = q_s(\tau), \quad (4)$$

де $q_s(\tau)$ – питома потужність, що виділяється на керні (рис. 2).

На межах робочої зони печі та футерування граничні умови 4-го роду можуть бути представлені виразом:

$$\left. \begin{aligned} T_{ш.зовн} &= T_{ф.внут} \\ \lambda_{ш}(T_{ш}) \cdot \left(\frac{\partial T_{ш}}{\partial n} \right)_{n_{ш.зовн}} &= \lambda_{ф}(T_{ф}) \cdot \left(\frac{\partial T_{ф}}{\partial n} \right)_{n_{ф.внут}} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де $T_{ш.зовн}$ – температура зовнішньої поверхні шихти, $T_{ф.внут}$ – температура внутрішньої поверхні футерування печі.

Так як верхня частина печі відкрита і з поверхні відбувається видалення газу - продукту реакції, на межі верхньої поверхні робочої зони печі та навколишнього середовища приймаємо граничні умови 3-го роду:

$$-\lambda_{ш}(T_{ш}) \frac{\partial T}{\partial y} = (\alpha_{навк1} + c_{газ} \cdot \rho_{газ} \cdot v_{ф}(\tau)) \cdot (T_{ш.зовн} - T_{навк}), \quad (6)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі в докілья з верхньої поверхні печі, $T_{навк}$ – температура навколишнього середовища.

Для межі футерування – навколишнє середовище граничні умови 3-го роду матимуть вигляд:

$$-\lambda_{ф} \cdot \left(\frac{\partial T_{ф}}{\partial n} \right)_{n_{ф.навк}} = \alpha_{окр2} \cdot (T_{ф.зовн} - T_{навк}), \quad (7)$$

де α_2 – коефіцієнт тепловіддачі у навколишнє середовище від подини та стінок печі.

При вирішенні поставленої задачі приймаємо припущення, що в початковий момент часу температура всередині печі та її футерування дорівнює температурі навколишнього середовища.

Результати дослідження та їх обговорення. Розрахунки динаміки теплового стану реакційної зони печі виконували методом кінцевих різниць з використанням ПЕОМ. Результати моделювання подано на рис. 4, 5.

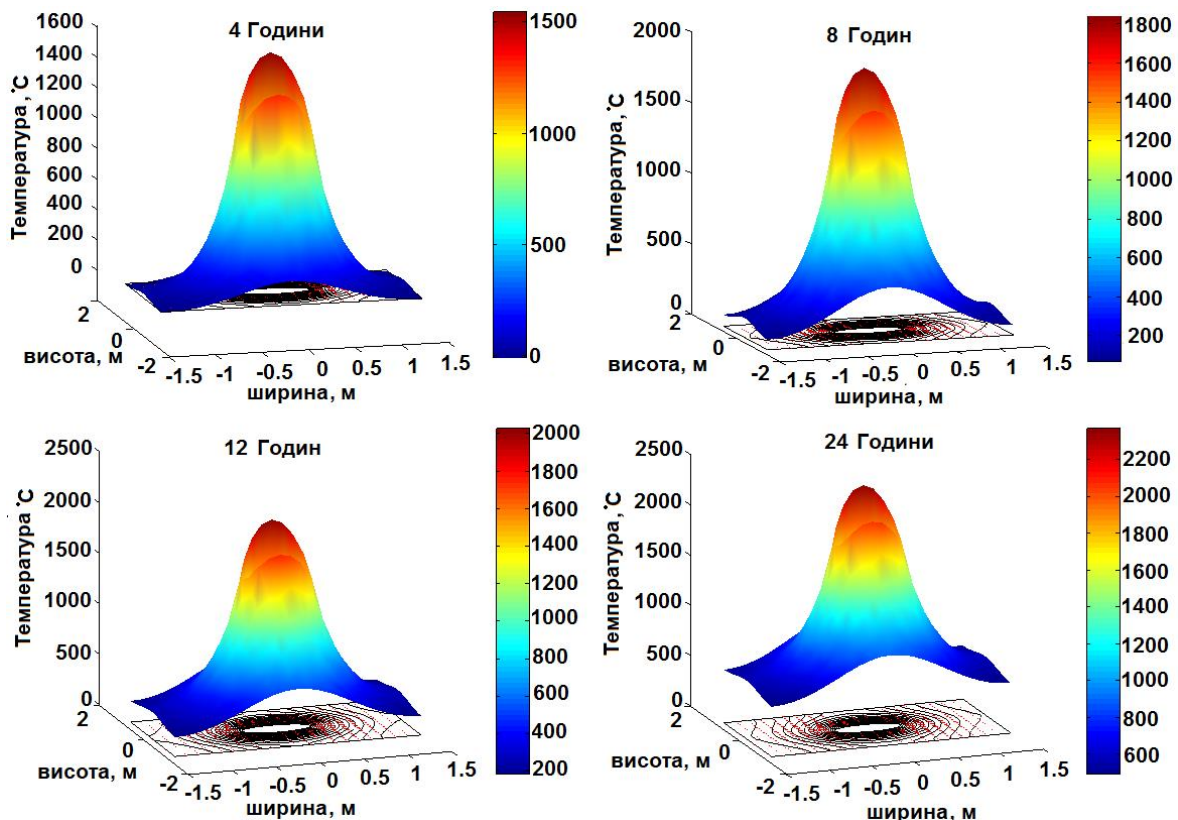


Рисунок 4. Розподіл температурного поля в поперечному перерізі печі опору після 4, 8, 12 і 24 годин нагріву

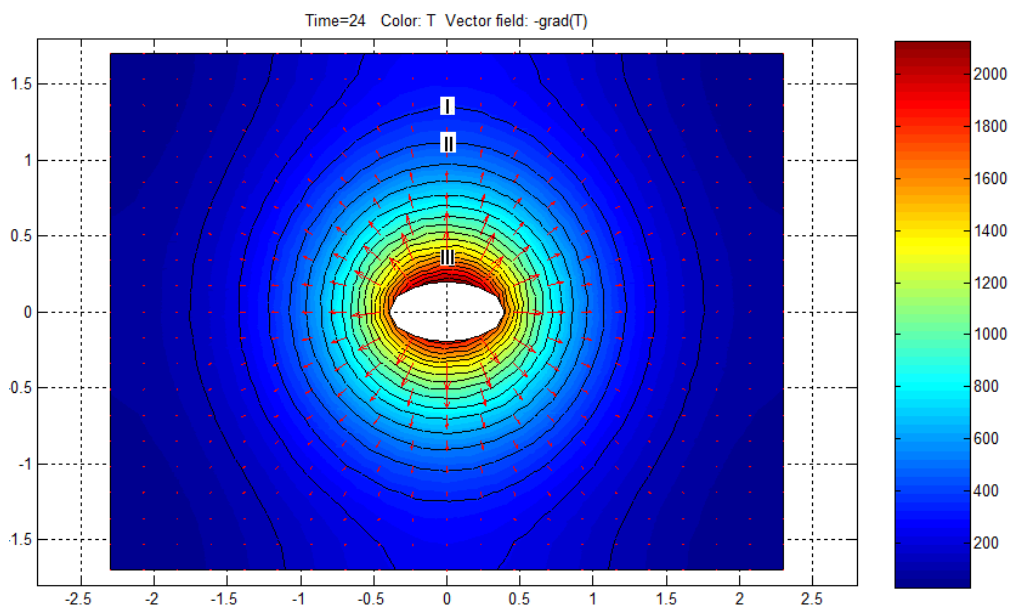


Рисунок 5. Розподіл температурного поля за перерізом реакційної зони печі опору після 24 годин нагрівання: Зона I – область утворення проміжних продуктів реакції відновлення кремнезему вуглецем (силосикон і зростки – 40...60% SiC); Зона II – зона аморфу, кристали – SiC (70...85% SiC); Зона III – великокристалічний абразивний – SiC (92...98% SiC); Зона II – зона аморфу, представлена кристалами – SiC (70...85% SiC); Зона III – великокристалічний абразивний α – SiC (92...98% SiC)

Зональний розвиток відновлювальних процесів зумовлює утворення крім карбіду кремнію проміжних продуктів відновлювальних реакцій:

Зона I – область утворення проміжних продуктів реакції відновлення кремнезему вуглецем.

Представлена силосиконом та зростками, що містять 40...60% SiC.

За результатами моделювання встановлено розміри існування зон продуктів вуглецевотермічного відновлення кремнезему за рахунок тепла,

що виділяється при пропусканні електричного струму через kern печі, позначений температурний фронт протікання відновлювальних реакцій. Встановлено, що зона силіксікону та зростків (I) має товщину в нижніх та бічних частинах 60 мм, а у верхній частині – 190 мм. Зона аморфу (II), представлена кристалами β – SiC має розміри відповідно 250 мм і 340 мм. Область великокристалічного карбїду кремнію (III) у нижній та бічній частині має незначну товщину – 120 мм, а у верхній частині – до 300 мм. Несиметричність зон викликана наявністю висхідних потоків розігрітих газів,

що прогрївають верхні горизонти шихтового завантаження. Отримані розміри зон відповідають даним промислових плавок.

Структура автоматизованої системи управління процесом виробництва карбїду кремнію в печі опорю. Структура управління тепловим режимом печі опорю представлена на рис. 6. На підставі результатів розрахунків (блок «Теплофізична модель») ПІД регулятор видає керуючий вплив на трансформатор печі на підставі чого змінюються електричні режими роботи.

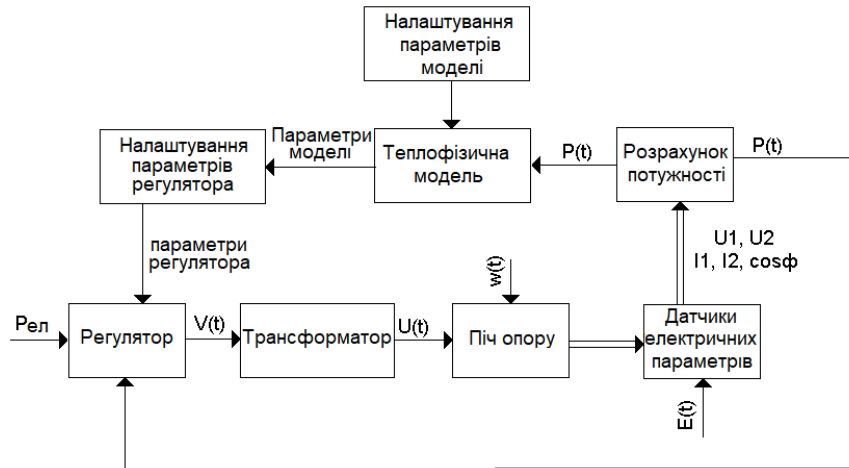


Рисунок 6. Структура управління тепловим режимом печі опорю: Рел – електрична потужність, що подається; $V(t)$ – керуючий вплив регулятора, $U(t)$ – вторинна напруга, $w(t)$ – збурення, $E(t)$ – вектор похибки датчика, $U1, U2, I1, I2, \cos\phi$ – електричні параметри, $P(t)$ – електрична потужність

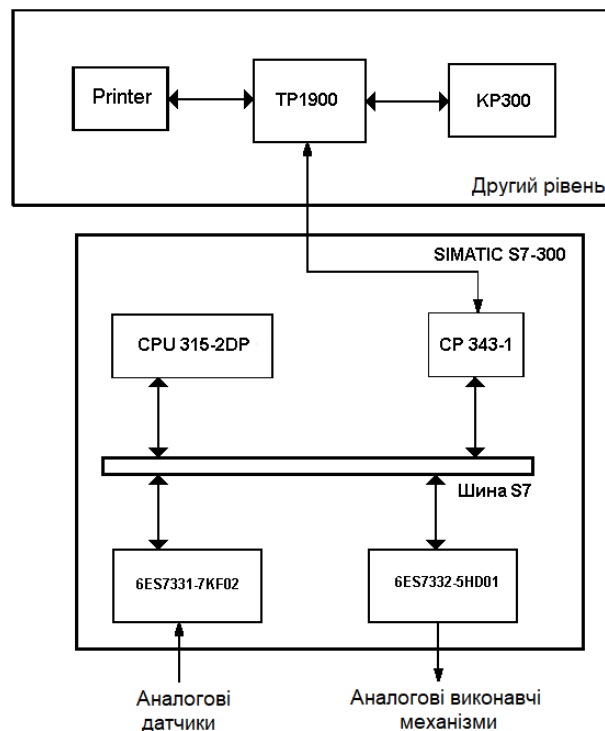


Рисунок 7. Структура управляючого обчислювального комплексу

Таблиця 1

Основні технічні елементи УОК

Позначення	Найменування
Simatic S7 - 300	Програмований мікропроцесорний контролер
CPU 315-2DP	Центральний процесор
CP 343-1	Комунікаційний процесор
6ES7331- 7KF02	Плата введення аналогових даних
6ES7332 - 5HD01	Плата виведення аналогових даних
TP1900	Панель оператору центрального пульта управління
SCX-3205	Лазерний принтер
KP300	Текстовий дисплей локального пульта управління

Приклад реалізації автоматизованої системи управління піччю опору на базі техніки фірми Siemens наведено на рис. 7 та у табл. 1. Запропонований управляючий обчислювальний комплекс (УОК) складається із системи збору даних Simatic S7 – 300 (перший рівень), який за допомогою протоколу PROFIBUS з'єднується з панеллю оператора TP1900 Comfort INOX (АСУ другого рівня). Керуючі сигнали від УОК надходять на виконавчі механізми.

Висновки:

За результатами досліджень проведених в цій роботі розроблено теплофізичну модель процесу виробництва карбіду кремнію в печі опору. Із застосуванням ПЕОМ методом кінцевих різниць виконано розрахунок динаміки теплового стану реакційної зони печі.

Визначено розміри зон існування продуктів вуглецевотермічного відновлення кремнезему, що утворюються за рахунок тепла при проходженні електричного струму через kern печі. Встановлено, що зона силосикону та зростків (I) має товщи-

ну в нижніх та бічних частинах 60 мм, а у верхній частині – 190 мм. Зона аморфу (II), представлена кристалами β – SiC має розміри відповідно 250 мм і 340 мм. Область великокристалічного карбіду кремнію (III) у нижній та бічній частині має незначну товщину – 120 мм, а у верхній частині – до 300 мм. Несиметричність зон викликана наявністю висхідних потоків розігрітих газів, що прогривають верхні горизонти шихтового завантаження. Отримані розміри зон відповідають даним промислових плавок.

Запропоновано структуру управління тепловим режимом печі опору та управляючого обчислювального комплексу на базі техніки фірми Siemens.

Доцільно за допомогою розробленої моделі оцінити вплив динаміки потужності, що підводиться, на розміри зон продуктів відновлення, отримати аналітичні залежності зміни теплового стану реакційної зони печі, що дозволить розробити технологічні рекомендації щодо ведення процесу виробництва карбіду кремнію. Це є подальшим напрямом досліджень.

Бібліографічний опис

1. Карбид кремния: технология, свойства, применение / Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С. и др. / под общ. ред. А.Е. Беляева, Р.В. Конаковой. - Харьков: «ИСМА». 2010. - 532 с. URL: https://corpora.tika.apache.org/base/docs/commoncrawl3_refetched/NG/NGCDBCX2SUPWR6LE5C_EJH7FM76SWNZMM (дата звернення: 15.07.2022).
2. Acheson, E. G. Synthese von SiC während des Schmelzprozesses von Kohlenstoff und Aluminiumsilikaten / E. G. Acheson // British Patent – 17911, 1892; U.S. Pat. 492767, Feb. 28, 1893 [Текст].
3. М.И. Гасик, М.М. Гасик. Электротермия кремния / М.И. Гасик, М.М. Гасик - Днепропетровск, Национальная металлургическая академия Украины, 2011 - 232 с.
4. Gasik, M.I., Kisel'gof, O.L., Ovcharuk, A.N., Derewyanko, I.V. Thermal and kinetic characteristics of process for producing the metallurgical silicon carbide from secondary materials / Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost, 2000, (1), - p.p. 24–26 [Текст]
5. Вища освіта назустріч четвертій промисловій революції: кейси з європейського та українського досвіду. Монографія [під загальною редакцією В. Шатохи]. Дніпро. «Поліграфічна акцидентна фірма», 2021. - 68 с. ISBN 978-966-2394-53-5.
6. Режим доступу - https://hein4.net/ckeditor_files/files/1/case-study_UA_HEIn4.pdf
7. G.S. Gupta, P.V. Kumar Heat-transfer model for the acheson process // Metallurgical and Materials Transactions. 2001. №32. p.p. 1301-1308. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0220-9> (дата звернення: 15.07.2022).
8. Амосов С.Д. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса углетермического восстановления кремнезема: Препринт / С.Д. Амосов, У.И. Гольдшлегер, А.Г. Мержанов. - Отделение химической физики АН СССР, Черногловка, 1985. - 78 с.
9. I.V. Derewyanko, O.I. Polyakov. Studies of polytype silicon carbide produced from recycled materials / Metallurgical and Mining Industry, 2012, Vol. 4, No. 4. p.p. 14-18.
10. URL: <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/14Derewyanko.pdf>

11. (дата звернення: 15.07.2022).
12. I.V. Derevyanko, A.V. Zhadanos. Mathematical Modeling of Heat Power Processes of Silicon Carbide Production in Acheson Furnace. / Metallurgical and Mining Industry, 2010, Vol. 2, No. 5 – p.p. 330-335. URL:<https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/Derevyanko330.pdf> (дата звернення: 15.07.2022).

References

1. Silicon carbide: technology, properties, application / Aheev O.A., Beliayev A.E., Boltovets N.S. and etc. / according to the total ed. A.E. Belyaev, R.V. Konakova.-Kharkiv: «ISMA». 2010. - 532 p. URL: https://corpora.tika.apache.org/base/docs/commoncrawl3_refetched/NG/NGCDBCX2SUPWR6LE5C_EJH7FM76SWNZMM
2. Acheson, E. G. Synthese von SiC während des Schmelzprozesses von Kohlenstoff und Aluminiumsilikaten / E. G. Acheson // British Patent – 17911, 1892; U.S. Pat. 492767, Feb. 28, 1893
3. M.I. Gasik, M.M. Gasik. Electrothermy of Silicon, Dnipropetrovsk, National metallurgical academy of Ukraine, 2011, 487 p.
4. Gasik, M.I., Kisel'gof, O.L., Ovcharuk, A.N., Derevyanko, I.V. Thermal and kinetic characteristics of process for producing the metallurgical silicon carbide from secondary materials / Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost, 2000, (1), - p.p. 24–26
5. Higher education towards fourth industrial revolution: European and Ukrainian cases. Monograph-general edition of V. Shatokha]. Dnipro, 2021. - 68 p. ISBN 978-966-2394-53-5.
6. Access mode - https://hein4.net/ckeditor_files/files/1/case-study_UA_HEIn4.pdf
7. G.S. Gupta, P.V. Kumar Heat-transfer model for the acheson process // Metallurgical and Materials Transactions. 2001. №32. p.p. 1301-1308. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0220-9>
8. S.D. Amosov, U.I. Gol'dshleger, A.G. Merzhanov. Theoretical and Experimental Research of Carbothermic Process of Silicon Reduction, Chernogolovka, Preprint, 1985, 78 p.
9. I.V. Derevyanko, O.I. Polyakov. Studies of polytype silicon carbide produced from recycled materials / Metallurgical and Mining Industry, 2012, Vol. 4, No. 4. p.p. 14-18.
10. URL:<https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/14Derevyanko.pdf>
11. I.V. Derevyanko, A.V. Zhadanos. Mathematical Modeling of Heat Power Processes of Silicon Carbide Production in Acheson Furnace. Metallurgical and Mining Industry, 2010, Vol. 2, No. 5 – p.p. 330-335. URL:<https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/Derevyanko330.pdf>