

І.Л. Шилович, к.т.н., доц.

К.О. Шумивода, аспірант

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вплив монооксиду вуглецю на тепловий баланс промислової печі при виробництві карбіду кремнію

Дослідження стосується процесів утворення та утилізації монооксиду вуглецю в печах Ачесона при виробництві карбіду кремнію. Однією з ключових проблем є значні обсяги CO, що утворюється як побічний продукт хімічної реакції, та недостатнє використання його енергетичного потенціалу. Існуючі конструкції печей передбачають лише факельне спалювання CO на виході з бічних каналів, що забезпечує обмежений рівень регенерації теплоти. Оптимізація енергетичного балансу виробництва SiC можлива завдяки дослідженню кількісних характеристик утворення CO та пошуку шляхів його ефективного використання.

Об'єктом дослідження є процес утворення монооксиду вуглецю та його вплив на енергетичний баланс печі Ачесона. Метою роботи є оцінка обсягів CO, визначення його теплових характеристик і встановлення частки в загальному енергоспоживанні виробництва.

Для досягнення поставленої мети виконано експериментальні виміри температур у робочому просторі печі, проведено аналіз реакцій утворення CO, складено матеріальний баланс та виконано розрахунки енергетичного потенціалу газу. На підставі порівняння розрахункових і експериментальних даних визначено кількість CO на одиницю маси SiC та оцінено можливість його утилізації.

Результати показали, що утворений у процесі виробництва обсяг CO еквівалентний 40 % від підведеної електроенергії, проте існуюча система утилізації забезпечує використання лише 12–14 % цього потенціалу. Зроблено висновок про доцільність розробки технічних рішень для ефективної регенерації теплоти CO з метою підвищення енергоефективності виробництва та зменшення витрат електроенергії.

Ключові слова: карбід кремнію; піч Ачесона; монооксид вуглецю; енергетичний баланс; утилізація CO; теплота згоряння; енергоефективність; матеріальний баланс; абразивні матеріали.

Вступ. Зростаючі за останні роки обсяги виробництва металевої продукції висувають задачу збільшення кількості якісних абразивних матеріалів, що використовуються в металообробці. Головною складовою абразивних матеріалів і інструментів є карбід кремнію. З літератури [1–3] відомо, що сировиною для виробництва карбіду кремнію SiC є оксид кремнію SiO₂, або простіше – звичайний пісок, кремнезем. Утворення SiC відбувається шляхом хімічної реакції заміщення згідно з рівнянням [1]:



Як вуглець в реакції (1) в промислових печах використовується подрібнений нафтовий кокс, що має високу хімічну реакційну здатність. Вихідні матеріали попередньо перемішуються у певній пропорції і завантажуються в піч. Для нагріву цієї робочої суміші (шихти) до температур ендотермічної реакції (1) в промислових печах Ачесона використовується електричний струм 4...12 кА. Струм пропускають через графітований кокс, який формують у вигляді паралелепіпеда, розташованого між торцями печі по повздовжній центральній осі, як це показано на рисунку 1.

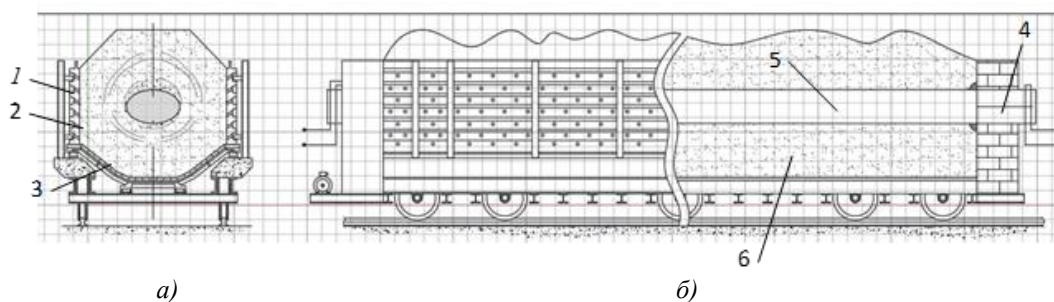


Рис. 1. Конструкція печі: а) поперечний перетин; б) повздовжній вид

Піч змонтована на рухомій платформі для забезпечення технологічних операцій завантаження сировиною і робочого режиму печі. Робоча зона печі огорожена стінками з жаростійкого бетону 1. В бічних стінках виконані отвори у вигляді наскрізних каналів 2, для евакуації газоподібних продуктів реакції утворення карбіду кремнію (монооксид вуглецю CO). Нижня частина печі також виконана з плит жаростійкого бетону 3. В торцях печі встановлені графітові електроди 4. Між внутрішніми поверхнями торцевих електродів вздовж печі розташований kern 5 з графітованого коксу.

Реакція (1) відповідає сумарному ефекту отримання карбіду кремнію і не відображає окремі стадії протікання цієї реакції. Теоретично, згідно з літературними даними, реакція (1) має певні стадії [4], які характеризуються певним фазовим станом реагентів. З літературних джерел [2, 3] відомо, що розрахунковий теоретичний температурний рівень реакції лежить у діапазоні 1850...2050 К. Реальні температури в робочій зоні печі, де відбувається хімічна реакція утворення карбіду кремнію за різними джерелами [5], перевищують 2500 °С. Зрозуміло, що в процесі нагрівання електричним струмом постачається теплота, необхідна для протікання ендотермічної реакції утворення карбіду кремнію. Ця кількість теплоти дорівнює $\Delta H = -69,5$ кДж/моль [4].

Утворення оксиду вуглецю за реакцією (1) визначає особливості експлуатації промислових печей. По-перше, як відомо монооксид вуглецю є отруйною речовиною [5], що викликає необхідність його нейтралізації; по-друге, монооксид вуглецю є горючою речовиною, теплота згоряння якої, згідно з реакцією (2), дорівнює 283,5 кДж/моль (12,63 МДж/м³):



Практика експлуатації печей Ачесона виробництва карбіду кремнію включає технологічну операцію знешкодження монооксиду вуглецю шляхом прямого спалювання окремих потоків, що виходять назовні через канали 2 (рис. 1). Окремі факели на зрізі каналів 2 утворюють своєрідний теплозахисний бар'єр, що певною мірою зменшує втрати теплоти з середини печі назовні.

Виходячи із зазначеного, **метою** цього дослідження є оцінка впливу енергетики утворення і утилізації монооксиду вуглецю на тепловий баланс печі.

Експериментальні дослідження. При обстеженні промислової печі Ачесона виробництва карбіду кремнію спостерігалось явище, що показано на рисунку 2. Фото (рис. 2) отримано авторами статті безпосередньо на промисловому підприємстві і демонструє випал CO у вигляді окремих факелів на виході з каналів у бічних стінках печі. Як зрозуміло з рисунків, принципово монооксид вуглецю утилізується як шкідлива речовина, але його енергетичний потенціал як палива не використовується.

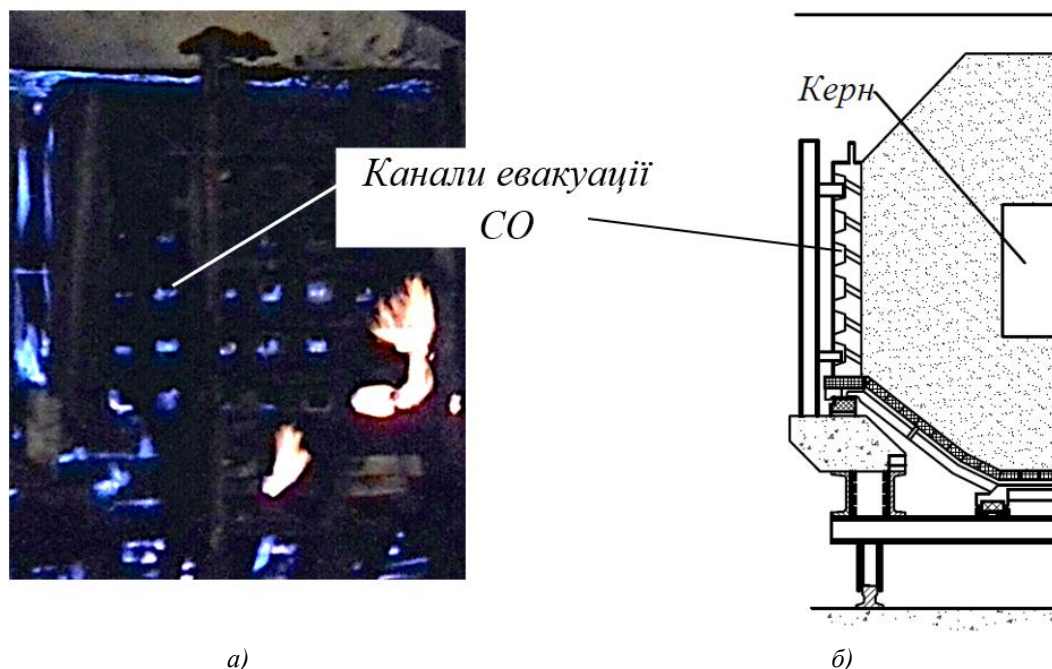


Рис. 2. Утилізація монооксиду вуглецю в промисловій печі: а) факели CO, що згоряє на виході з бічних стінок печі; б) ½ поперечного перетину печі

Базовими експериментальними дослідженнями під час обстеження печі Ачесона були виміри температури в робочому просторі печі. Для вимірів температури використовувалися термопари в захисних чохлах з жаростійкої сталі. В результаті вимірів були отримані розподіли температур у площині

поперечного перетину печі. Такі розподіли були отримані для 3-х різних поперечних перетинів печі. Приклад схеми розташування термопар і розподілу температур для одного з поперечних перетинів печі показаний на рисунках 3–4. Нумерація термопар (5, 6, 7) відповідає графікам температури на рисунку 4.

На графіках слід вирізнити такі характерні ділянки:

- стрімке зростання температури в безпосередній близькості до керна (до 1500 °С/год) від підключення печі до електроживлення (термопара 5);
- ізотермічні ділянки ($t \approx 100$ °С) з наступним зростанням температури; (термопари 6, 7), що пояснюється процесом випаровування води із сипучої шихти.

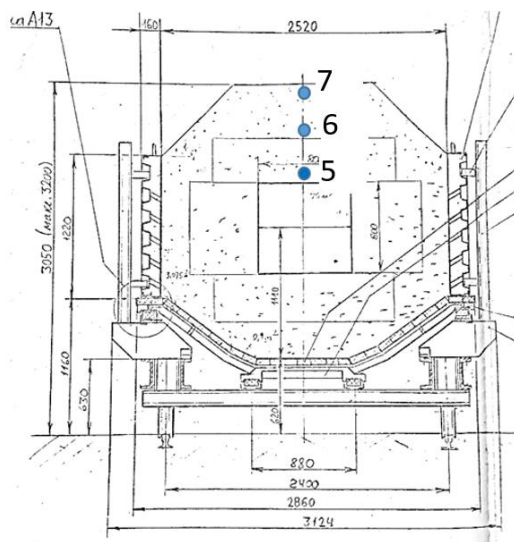


Рис. 3. Схема розташування термопар № 5, 6, 7 в перетині печі

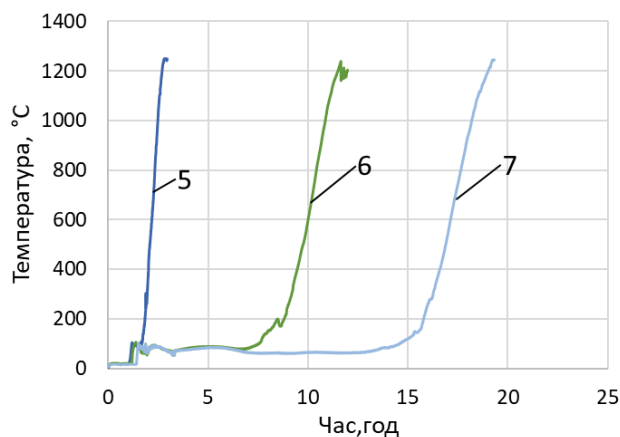


Рис. 4. Температури для термопар № 5, 6, 7 в перетині печі

Важливим висновком із аналізу отриманих даних є те, що в завантаженій шихті навіть у периферійних зонах, що прилягають до зовнішніх огорожень, температури досягають 600...1000 °С.

Оцінка енергетичного потенціалу монооксиду вуглецю.

Аналіз утворення монооксиду вуглецю в сипучій коксовій суміші описаний в роботах [6–8]. Зокрема, в роботі [8], що стосується проблем утворення монооксиду вуглецю внаслідок хімічної реакції окислення при дефіциті кисню в сипучому шарі вуглецевих матеріалів промислових печей випалу, наведено експериментальні дані, що свідчать про стрімке зростання кількості CO в діапазоні температур від 400 і до 1000 °С. Ці дані необхідно враховувати при аналізі можливого утворення CO поза реакційною зоною з температурами 2500 °С.

Таким чином, у печах виробництва карбіду кремнію варто брати до уваги два механізми утворення CO: а) в результаті реакції (1); в результаті реакцій окислення коксу при відповідних температурах за стадіями:





Тепловий ефект сумарної реакції, що враховує стадії (3) і (4) становить 220 кДж/кмоль. Така хімічна реакція прямого окислення вуглецю (коксу) до монооксиду реалізується в шихтових матеріалах в середині печі, оскільки, як показали дослідження, рівень температур відповідає вимогам хімічної реакції і за умови обмеженої кількості окисника. Зрозуміло, що в сипучому матеріалі шихти кількість повітря обмежена, тому реакції (3) і (4) мають місце в середині печі.

Кількість повітря, що заповнює порожнечу в сипучому шарі шихти визначається з простого співвідношення:

$$V_a = V_0 - V_k - \left(\frac{M_c}{\rho_c} + \frac{M_s}{\rho_s} + \frac{M_o}{\rho_o} \right), \quad (4)$$

де V_0 – повний об'єм шихтових матеріалів, м³; V_k – об'єм ядра, м³; M_c – маса коксу, кг; ρ_c – густина коксу, кг/м³; M_s – маса піску, кг; ρ_s – густина піску, кг/м³; M_o – маса оборотної шихти, кг; ρ_o – густина оборотної шихти, кг/м³.

Повний об'єм шихтових матеріалів V_0 можна оцінити як добуток площі поперечного перетину шихтових матеріалів і довжини робочого простору печі. Як видно з рисунка 3, поперечний перетин шихтових матеріалів має просту геометричну форму і досить сталі розміри, що встановлюється регламентом завантаження печі. Аналогічні розрахунки дозволяють визначити і об'єм ядра V_k , поперечний перетин якого має чіткі визначені границі. Маса складових шихти M_c і M_s задаються технологічною інструкцією і суворо витримуються при завантаженні. Густина піску і коксу як фізичних тіл визначається згідно з довідковими матеріалами, наприклад [9], відповідно до якого: густина піску $\rho_s = 2650$ кг/м³, густина нафтового коксу $\rho_c = 1750$ кг/м³.

На підставі вказаних вихідних даних щодо геометрії і мас речовин, що завантажуються в піч, виконано числову оцінку об'єму, що займає повітря в сипучому матеріалі шихтових матеріалів: при робочому об'ємі печі $V_0 = 69,5$ м³ кількість повітря, що займає порожнечу в шихтовій заливці, становить від 14 до 15 м³. Отже, кількість активного окиснювача (кисню) складе не більше 3,5 м³.

Таким чином, кількість CO, що може утворитися в об'ємі печі шляхом прямої реакції окислення коксу киснем повітря, не перевищить 6 м³. А кількість коксу, що може вступити в реакцію окислення і буде вилучений з технологічного процесу отримання карбіду кремнію, становить 3...3,5 кг. Літературні дані [1], а також технологічна інструкція промислового підприємства дозволяють оцінити масу завантаженої шихти у 70...80 т. Отже, отримана числова оцінка кількості CO і втрат коксу при прямому окисненні складає незначну частку в матеріальному балансі процесу виробництва карбіду кремнію і може бути відкинута в подальшому аналізі.

Що ж стосується кількості CO, що утворюється згідно з реакцією (1), то вона визначається з матеріального балансу виробничого процесу.

$$M_{\Sigma} = M_{SiO_2} + M_{OC}, \quad (5)$$

де M_{SiO_2} , M_{OC} – відповідно маси завантаженого в реакційну зону печі кремнезему (піску) і коксу, кг.

Підкреслимо, що утворення CO відбувається в хімічних реакціях, що на виході дають кристалічний і аморфний карбід кремнію. Таким чином, з простого матеріального балансу хімічних реакцій отримання SiC, SiC (аморф) витікає, що кількість монооксиду вуглецю, що утворюється в усіх реакціях, що мають місце в печі, дорівнює:

$$M_{CO} = M_{\Sigma} - M_{SiC} - M_{SiCO} - M_{am}. \quad (6)$$

З іншого боку, для перевірки правильності числової оцінки доцільно скористатися матеріальним балансом у правій частині рівняння хімічної реакції (1), звідки знаходимо кількість CO при відомому значенні кінцевої маси злитку SiC. У виробництві маса злитку є кінцевим результатом технологічного процесу і завжди контролюється. З меншою точністю оцінюється кількість аморфного карбіду кремнію. Але на підставі літературних даних [1, 4, 5, 12] і власних спостережень кількість супутніх хімічних продуктів знаходиться в наступній пропорції до основного товарного карбіду кремнію: сілосікон і домішки – не більше 7 %; аморфний карбід кремнію – до 40 %.

Враховуючи згадане вище відносно складових кінцевого продукту реакції (1), при утворенні 40 кг SiC кількість CO становить 44,8 м³ (приведених до н.у.). Отже, еквівалент утворення певного об'єму CO на одиницю маси кінцевого продукту SiC становить: $k = 1,12$ м³/кг

Тобто, при відомій масі кінцевого продукту (злитку SiC) кількість CO знайдемо, як:

$$V_{CO} = M_{SiC} \times k, \text{ кг.} \quad (7)$$

В практиці виробництва карбіду кремнію кількість карбіду кремнію M_{SiC} становить 11000...14000 кг. Ці дані можна отримати перерахунком кількості витрат енергії на кампанію печі [4] по відношенню до відомої величини теплоти реакції. Враховуючи сказане, об'єм CO, що утворюється протягом технологічного процесу становить $V_{CO} = (12,3...15,7) \times 10^3$ м³. Теплота, що може бути отримана при ефективному спалюванні цієї кількості монооксиду вуглецю, дорівнює:

$$Q = V_{CO} \times Q_H^p = (155 \dots 198) \times 10^3 \text{ МДж,} \quad (7)$$

де $Q_n^p = 12,63 \text{ МДж/м}^3$ теплота згоряння СО.

Перерахунок в еквівалентні одиниці кількості енергії дає величину $Q = (43,1 \dots 54,8) \times 10^3 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

В енергетичному балансі печі виробництва карбіду кремнію отримана величина досягає значення близько 30 % від підведеної електроенергії, що по суті являє собою потенціал енергозбереження. Існуючий на виробництві метод утилізації СО шляхом спалювання на виході з каналів у бічних стінках печі не забезпечує ефективної регенерації теплоти в печі.

Частково теплота, що виділяється на зовнішній поверхні бічних стінок за рахунок спалювання СО дає певний ефект регенерації теплоти, створюючи специфічний тепловий бар'єр на шляху теплового потоку від зовнішньої поверхні печі до навколишнього середовища. Калориметрія вказаного явища в ході експериментальних досліджень має оціночний характер з огляду на технічні складнощі проведення подібних вимірів на діючій печі, що підключена до системи електроживлення.

На підставі проведених вимірів температури за допомогою інфрачервоного пірометра отримано, що кількість теплоти від згоряння СО, що безпосередньо повинно забезпечувати часткову регенерацію, становить не більше 12...14 % від повного потенціалу енергозбереження.

Висновки. В результаті проведених експериментальних досліджень отримані актуальні розподіли температури в робочій зоні промислової печі, що суттєво доповнюють попередні дослідження авторів [1, 4, 5], які містили лише розрахункові температурні поля, отримані шляхом математичного моделювання, або виконані на лабораторній установці. На підставі аналізу експериментальних температур реакційної зони печі і розрахунків обґрунтовано можливість утворення СО шляхом хімічної реакції прямого окислення коксу киснем з повітря, що заповнює пори шихтових матеріалів у печі, що не враховується при описі технологічного процесу, відомого з літератури [1, 5, 12].

Розрахунковим шляхом виконано оцінку енергетичного потенціалу СО і його частку в енергетичному балансі печі, що створює сучасне бачення науково-технічної проблеми енергозбереження цього промислового агрегату і дає підстави для внесення змін у перелік статей енергобалансу, що наводиться в літературі [1, 4].

Оцінка існуючої практики утилізації СО шляхом простого спалювання за межами печі свідчить про мінімальний ефект часткової регенерації теплоти і фактично не використовує значний енергетичний потенціал СО (не більше 12...14 % від повного потенціалу енергозбереження). Отримані в цьому дослідженні дані щодо енергетичного потенціалу мають сприяти перспективним подальшим дослідженням та інженерним розробкам, що спрямовані на створення систем керованої утилізації енергопотенціалу цього газу. Акцент необхідно зробити на технічних рішеннях про відведення СО в окремі камери згорання з подальшим перетворенням отриманої теплоти в електроенергію або її використанням для підігріву шихтових матеріалів. Це відкриває можливості інтеграції допоміжних енергетичних контурів у конструкцію печей Ачесона, що знизить загальні витрати електроенергії на виробничу кампанію. Реалізація подібних технічних рішень у майбутньому може забезпечити суттєве підвищення енергоефективності виробництва карбіду кремнію, зменшити екологічний вплив і сприяти розвитку більш сталих технологій у галузі матеріалознавства.

Список використаної літератури:

1. Kumar P.V. Study of formation of silicon carbide in the Acheson Process / P.V. Kumar, G.S. Gupta // Steel Research International: a journal for steel and related materials. – 2002. – Vol. 73, № 2. – P. 31–38.
2. Vangskasen J. Metal-producing Mechanisms in the Carbothermic Silicon Process / J.Vangskasen. – Trondheim : NTNU, 2012. – 111 p.
3. Kadkhodabeigi M. Modeling the Tapping Process in the Submerged Arc Furnaces Used in High Silicon Alloys Production / M.Kadkhodabeigi, H.Tveit, S.T. Johansen // ISIJ International. – 2011. – P. 12–22.
4. Gupta G.S. An Analysis of Heat Distribution in the Production of SiC Process / G.S. Gupta, P.Raja, K.Tiwari // 14th Global Congress on Manufacturing and Management (GCM-2018). – 2019. – P. 64–70.
5. Derevyanko I.V. Mathematical Modeling of Heat Power Processes of Silicium Carbide Production in Acheson Furnace / I.V. Derevyanko, A.V. Zhadanos // Metallurgical and Mining Industry. – 2010. – Vol. 2, № 5. – P. 330–335.
6. Matizamhuka W.R. Gas transport mechanisms and the behaviour of impurities in the Acheson furnace for the production of silicon carbide / W.R. Matizamhuka // Heliyon. – 2019. – Vol. 5, № 4. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01535.
7. Іваненко О.І. Розробка заходів зі зниження викидів монооксиду вуглецю димових газів печей випалювання під час виробництва електродів / О.І. Іваненко, М.Д. Гомеля, С.М. Панов // Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки. Хімічні технології. – 2020. – Т. 31 (70), № 4. – С. 170–179.
8. Іваненко О.І. Наукові основи зниження екологічних ризиків забруднення атмосферного повітря підприємствами вуглеграфітового виробництва : дисертація д.т.н. / О.І. Іваненко. – Київ, 2021. – 417 с.
9. The Engineering Toolbox [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.engineeringtoolbox.com>.
10. Effect of Weight Loss on Liquid-Phase-Sintered Silicon Carbide / T.Grande, H.Sommerset, E.Hagen and other // J. Am. Ceram. Soc. – 1997. – Vol. 80, № 4. – P. 1047–1052.
11. Shinoda Y. Super plasticity of Silicon Carbide / Y.Shinoda, T.Nagano, H.Gu // Journal of the American Ceramic Society. – 1999. – Vol. 82, № 10. – P. 2916–2918.
12. Raj P. Silicon carbide formation by carbothermal reduction in the Acheson process: A hot model study / P.Raj, G.S. Gupta, V.Rudolph // Thermochimica Acta. – 2020. – Vol. 687. – P. 178–185.

References:

1. Kumar, P.V. and Gupta, G.S. (2002), «Study of formation of silicon carbide in the Acheson Process», *Steel Research International: a journal for steel and related materials*, Vol. 73, No. 2, pp. 31–38.
2. Vangskasen, J. (2012), *Metal-producing Mechanisms in the Carbothermic Silicon Process*, NTNU, Trondheim, 111 p.
3. Kadkhodabeigi, M., Tveit, H. and Johansen, S.T. (2011), «Modeling the Tapping Process in the Submerged Arc Furnaces Used in High Silicon Alloys Production», *ISIJ International*, pp. 12–22.
4. Gupta, G.S., Raja, P. and Tiwari, K. (2019), «An Analysis of Heat Distribution in the Production of SiC Process», *14th Global Congress on Manufacturing and Management (GCM-2018)*, pp. 64–70.
5. Derevyanko, I.V. and Zhadanos, A.V. (2010), «Mathematical Modeling of Heat Power Processes of Silicon Carbide Production in Acheson Furnace», *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 2, No. 5, pp. 330–335.
6. Matizanhuka, W.R. (2019), «Gas transport mechanisms and the behaviour of impurities in the Acheson furnace for the production of silicon carbide», *Heliyon*, Vol. 5, No. 4, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01535.
7. Ivanenko, O.I., Homelia, M.D. and Panov, Ye.M. (2020), «Rozrobka zakhodiv zi znyzhennia vykydiv monooksydu vuhletsu dymovykh haziv pechei vypaliuvannia pid chas vyrobnytstva elektrodov», *Vcheni zapysky TNU im. V.I. Vernadskoho. Seriya. Tekhnichni nauky. Khimichni tekhnologii*, Vol. 31 (70), No. 4, pp. 170–179.
8. Ivanenko, O.I. (2021), «Naukovi osnovy znyzhennia ekolohichnykh ryzykiv zabrudnennia atmosferynoho povitria pidpriemstvom vuhlehafitovoho vyrobnytstva», D.Sc. Thesis of dissertation, Kyiv, 417 p.
9. *The Engineering Toolbox*, [Online], available at: <https://www.engineeringtoolbox.com>
10. Grande, T., Sommerset, H., Hagen, E. et al. (1997), «Effect of Weight Loss on Liquid-Phase-Sintered Silicon Carbide», *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 80, No. 4, pp. 1047–1052.
11. Shinoda, Y., Nagano, T. and Gu, H. (1999), «Super plasticity of Silicon Carbide», *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 82, No. 10, pp. 2916–2918.
12. Raj, P., Gupta, G.S. and Rudolph, V. (2020), «Silicon carbide formation by carbothermal reduction in the Acheson process: A hot model study», *Thermochimica Acta*, Vol. 687, pp. 178–185.

Шилович Ігор Леонідович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-9402-1114>.

Наукові інтереси:

- високотемпературні процеси;
- електрофізичні властивості полімерів і полімерних композицій.

E-mail: shil3011@ukr.net.

Шумивода Кирило Олександрович – аспірант кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0009-0008-2023-728X>.

Наукові інтереси:

- високотемпературні процеси;
- механічна обробка твердого матеріалу.

E-mail: kirillsumivoda@gmail.com.

Shylovich I.L., Shumyvoda K.O.

The impact of carbon monoxide on the material and energy balance of silicon carbide production

The research focuses on the mechanisms of carbon monoxide CO generation and its utilization in Acheson furnaces during silicon carbide SiC production. A major issue is the considerable amount of CO formed as a by-product of the carbothermal reduction reaction and the insufficient recovery of its calorific potential. Current furnace designs primarily rely on flare combustion of CO at the outlets of lateral gas channels, which provides only a limited degree of heat recovery. Improvement of the overall energy balance in SiC production requires a detailed quantitative assessment of CO formation and the development of technologies for its efficient utilization.

The object of the study is the process of carbon monoxide formation and its influence on the thermal and energy balance of the Acheson furnace. The aim of the research is to determine the volume of CO produced, evaluate its calorific properties, and quantify its contribution to the total energy input of the process.

To achieve this objective, experimental temperature measurements were conducted within the furnace reaction zone, the kinetics of CO formation were analyzed, material balance calculations were performed, and the energy potential of the evolved gas was estimated. Based on the correlation of experimental and theoretical results, the specific CO yield per unit mass of SiC was determined, and the potential for its recovery was evaluated.

The findings indicate that the CO generated during a production campaign is equivalent to up to 40 % of the supplied electrical energy. However, the current flare-based utilization system allows the recovery of only 12–14 % of this potential. The study concludes that the design and implementation of advanced recovery systems for CO combustion heat are essential to significantly improve the energy efficiency of silicon carbide production and reduce electrical power consumption.

Keywords: silicon carbide; Acheson furnace; carbon monoxide; energy balance; CO utilization; combustion heat; energy efficiency; material balance; abrasive materials.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2025.