INTELLIGENT MICROCLIMATE CONTROL SYSTEMS IN SMART ENVIRONMENTS

Dr.Sci. N. Aksak[1][0000-0001-8372-8432], **Ph.D. M. Kushnaryov**[2][0000-0002-3772-3195], **Yu. Shelikhov**[3][0009-0009-8970-6571]
Kharkiv National University of Radioelectronics, Ukraine
EMAIL: [1]nataliia.axak@nure.ua, [2]maksym.kushnarov@nure.ua, [3]yurii.shelikhov@nure.ua

Abstract. *This дослідження addresses the design and deployment of intelligent microclimate control systems across smart environments, including residential/commercial buildings, enclosed industrial spaces, and city-farms. We present a unified Edge–Transport–Cloud architecture with an event-driven data bus, time-series storage, and human–machine interfaces, alongside a multi-agent model that formalizes agent roles (climate, devices, safety, messaging) and safety invariants. The work surveys and integrates AI methods for forecasting and optimization: supervised ML/DL for short-term state prediction and comfort indices (e.g., VPD/PMV), Model Predictive Control (MPC), and Reinforcement Learning (RL), with a focus on Q-learning for policy synthesis under uncertainty. Special attention is given to intelligent ventilation (DCV), energy modeling, and evaluation criteria (tracking accuracy, time-in-band, energy use, reliability). Case studies span smart homes, closed spaces, and city-farms, illustrating how models are embedded into a microservice-based IoT platform and outlining practical deployment issues: sensor calibration, safety wrappers, secure channels (TLS), and human-in-the-loop operation. Overall, the work bridges theory and practice, demonstrating how combining IoT infrastructure with AI enables resilient comfort and resource efficiency.*

Keywords. *Intelligent systems; IoT; cloud computing; multi-agent systems; agents; machine learning, distributed computing; Q-learning; controlled environment; microclimate.*

UDC 681.5
DOI https://doi.org/10.36059/978-966-397-538-2-16

УДОСКОНАЛЕНА ДИНАМІЧНА ПРОГНОЗУЮЧА МОДЕЛЬ ПРОДУВКИ КИСНЕВОГО КОНВЕРТЕРА

Ph.D. Ю. Маріяш[1][0000-0002-0812-8960], **Ph.D. О. Степанець**[2][0000-0002-0812-8960]
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна
EMAIL: [1]y.mariiash@kpi.ua, [2]o.stepanets@kpi.ua

Анотація. *У цій роботі було розроблено динамічну модель режиму продувки в процесі кисневої печі, що є ключовим питанням для підвищення енерго- та ресурсо-ефективності сучасного виробництва сталі. Було розглянуто дуттєвий режим киснево-конвертерної плавки як технологічний об'єкт керування, виконано аналіз проблематики регулювання параметрів дуття в умовах нестаціонарності швидкості зневуглецювання металу. Під час продувки конвертерної ванни система керування вирішує завдання синхронізації процесів рафінування та нагріву металу при надійному дуттьовому режимі, а в кінці продувки – завдання визначення моменту її припинення. Встановлено, зміна ступеня окиснення вуглецю до CO_2 у порожнині конвертера залежить від зміни швидкості зневуглецювання яка, в свою чергу, залежать від відстані фурми до рівня спокійної ванни. Процес зміни швидкості зневуглецювання від зміни відстані фурми до рівня спокійної ванни є нестаціонарним, описується диференційним рівнянням першого порядку, стала часу якого залежить від періоду продувки; досліджено вплив інтенсивності подачі дуття на швидкість зневуглецювання металу. Перехідний процес зміни ступеня окиснення вуглецю до CO_2 від зміни положення пневмоклапану дуття кисню описується диференційним рівнянням третього порядку; отримана модель режиму продувки киснево-конвертерного процесу у вигляді керованої канонічної форми дискретної моделі в просторі станів в залежності від зміни відстані фурми до рівня спокійної ванни та інтенсивності дуття, яка використана в якості прогнозуючої моделі модельно-прогнозуючого регулятора.*

Ключові слова: *прогнозуюча модель, керування, модель в просторі станів, кисневий конвертер.*

1. Технологічні особливості керування режимом дуття киснево-конвертерного процесу

Киснево-конвертерна плавка відзначається складністю фізико-хімічних процесів, протікає з великою швидкістю і при високій температурі, характеризується багаторежимністю функціонування й великою розмірністю розв'язувальних задач. Якість одержуваної сталі визначається її складом і температурою. Конвертер можна розглядати як хімічний реактор, у якому відбуваються реакції окиснення різних елементів і процеси перерозподілу домішок і теплоти між металом та шлаком, що утворюється. Дослідження технологічних закономірностей проводили за даними конвертерного цеху ПАТ "Арселор-Міталл" Кривий Ріг (КМЗ) з конвертерами ємністю 160 тон. У конвертерах переплавляли переробний чавун з вмістом (%) силіцію 0,4…1,0; мангану 0,3…0,6; сірки 0,02…0,07; фосфору 0,02…0,15. Температура чавуну коливалась в діапазоні 1200…1400 ˚С [1]. В завалку завантажували металевий брухт у кількості 0…30 % від маси чавуну. Рідкий чавун із міксера подавали у 140 т ковшах. Інтенсивність подання кисню становила 2,5…3,0 м3/(т×хв). Сортамент марок сталі характеризувався вмістом вуглецю 0,09…0,40 % і температурою випуску 1580…1630 ˚С. Виплавка сталі є інтенсивним

процесом, тому оператор конвертера фізично не має можливості опрацювати великий об'єм інформації, вибрати найкращий режим та оперативно втрутитись у хід технологічно процесу плавки [2]. При ручному управлінні хід продувки часто відхиляється від оптимального, порушується процес шлакоутворення, у результаті чого шлак або звертається, або спінюється, що призводить до виносів та викидів. Тільки 45 – 50 % плавок, а іноді і менше, випускають при ручному управлінні з першої спроби. Одним з основних параметрів режиму дуття є інтенсивність продувки, від якої залежить хід процесів окиснення домішок і шлакоутворення [3]. Однак підвищення інтенсивності продувки призводить до зменшення окиснення заліза і переходу його в шлак (рис. 1), що пов'язано зі збільшенням механічного перемішування ванни та прискоренням розвитку вторинних реакцій окиснення домішок за рахунок оксидів заліза. Особливо це виявляється наприкінці продувки за низької швидкості зневуглецювання. Ступінь допалювання оксиду карбону (II) в порожнині конвертера (рис. 2) підвищується зі зростанням інтенсивності продування, що пов'язано з перерозподілом потоку кисню, який вивільняється від зменшення окиснення заліза [4].

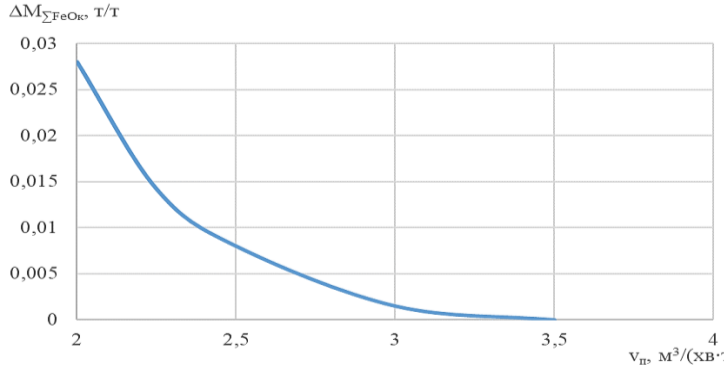

Рисунок 1. Вплив інтенсивності продування на питому масу оксидів заліза в шлаці

За експериментальними даними для 160-тонного кисневого конвертера складено залежність між інтенсивністю продувки і зміною основності кінцевого шлаку (рис. 3). Зі збільшенням інтенсивності продувки основність шлаку зменшується. З підвищенням інтенсивності продувки, знижується масова частка оксидів заліза в шлаку, отже, підвищується вміст мангану в металі.

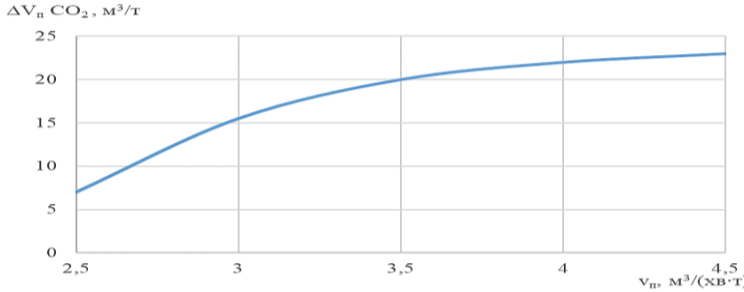

Рисунок 2. Вплив інтенсивності продування на підвищення питомого об'єму CO_2 у порожнині конвертера

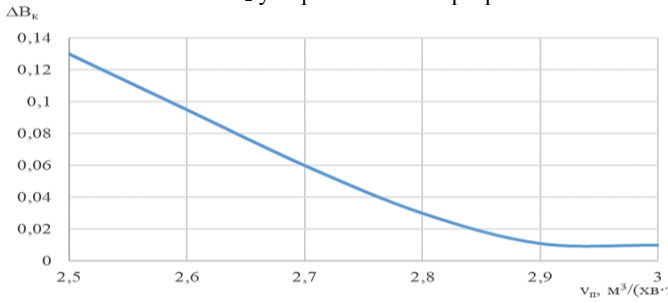

Рисунок 3. Вплив інтенсивності продування на основність кінцевого шлаку

Залежність між інтенсивністю продувки і зміною масової частки мангану в кінцевому металі зображено на рис. 4.

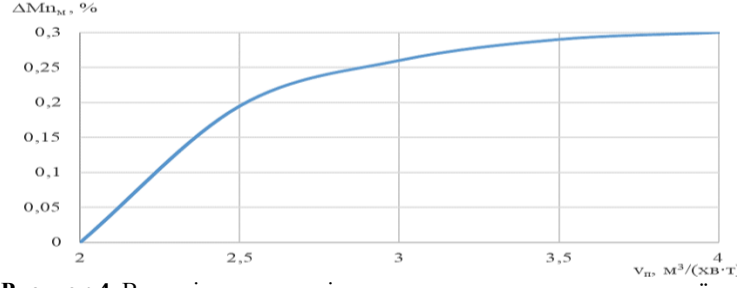

Рисунок 4. Вплив інтенсивності продування на приростання масової частки мангану в кінцевому металі

Залежність зношення футерівки, що визначається за складом оксиду магнію в кінцевому шлаку (останній переходить у шлак лише із футерівки), від інтенсивності продувки для 130-тонного конвертера зображено на рис. 5.

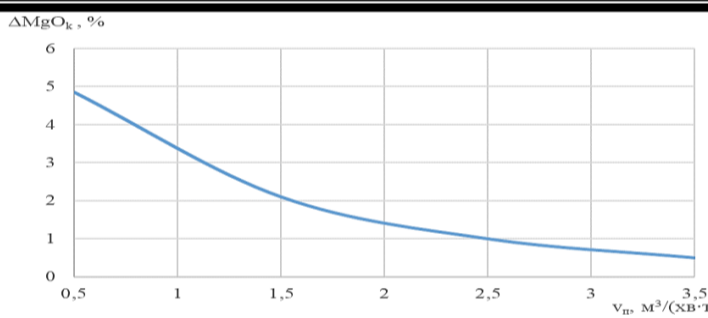

Рисунок 5. Вплив інтенсивності продування на масову частку оксиду магнію в кінцевому шлаці

З підвищенням інтенсивності продувки зношення футерівки зменшується, що пов'язано зі скороченням як тривалості продувки, так і контактування вогнетривів з агресивним шлаком і високотемпературним факелом. Характер залежності зміни питомої на 1т виплавленої сталі маси плавикового шпату від інтенсивності продувки (рис. 6) зумовлюється розріджувальним впливом на кінцевий шлак флюсу. Аналогічно впливає на кінцевий шлак підвищення в ньому вмісту оксидів заліза.

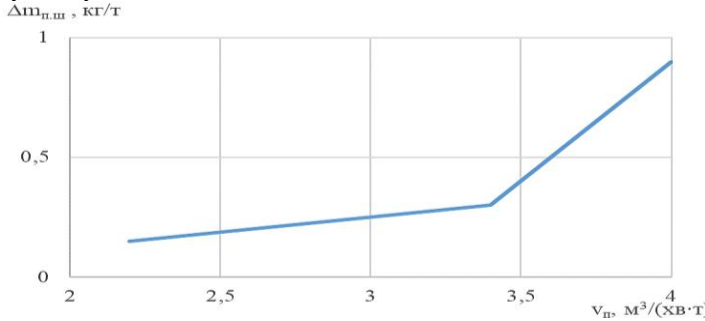

Рисунок.6 Вплив інтенсивності продування на питому масу на 1 т виплавленої сталі плавикового шпату

Однак значення останнього зменшується у разі збільшення інтенсивності продувки, що компенсується уведенням плавникового шпату. Тому підвищення інтенсивності продувки зумовлює збільшення ступеня допалювання CO в порожнині конвертера, масової частки мангану в металі наприкінці продувки і витрат плавикового шпату та зменшення оксидів заліза в кінцевому шлаку, його основності та зношення футерівки.

Висота розміщення фурми над рівнем спокійної ванни також впливає на хід процесів окиснення домішок і шлакоутворення. Збільшення масової частки оксидів заліза в кінцевому шлаку, що перераховані в еквівалентне значення

оксиду заліза (II), зі збільшенням висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни (рис. 7) зумовлене зниженням швидкості масоперенесення при зменшені глибини реакційної зони.

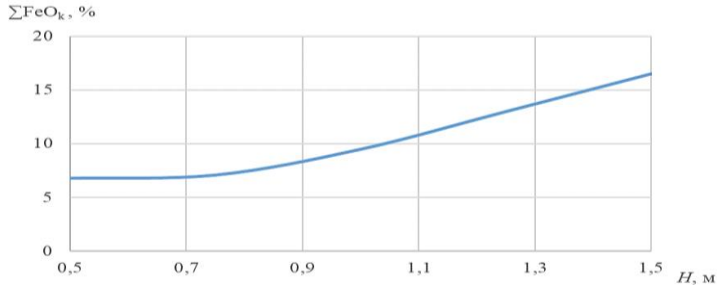

Рисунок 7. Вплив висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни на окисненість кінцевого шлаку

Ступень допалювання CO до CO_2 в порожнині конвертера залежить від висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни (рис. 8, де штрихова лінія – область нетехнологічної продувки). Ефективність допалювання оксиду карбону (II) в порожнині конвертера збільшується у разі підвищення висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни, що пов'язано з великим потоком кисню у верхній зоні агрегату [5]. Залежність $\Delta B_к = f(H)$ (рис. 9) пояснюється збільшенням масової частки оксидів заліза у шлаку в разі зростання висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни, що сприяє поліпшенню умов шлакоутворення. Наближення залежності до рівня насичення пов'язано з повним засвоєнням добавок вапна за підвищення значень висоти розміщення фурми.

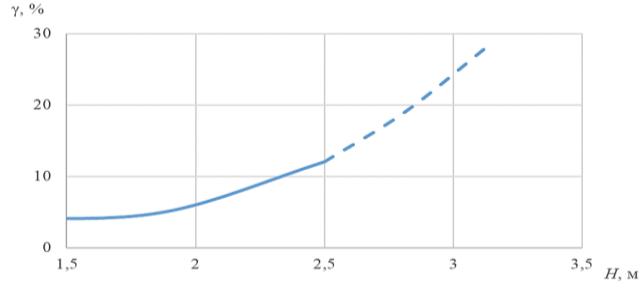

Рисунок 8. Вплив висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни на ступінь допалювання CO до CO_2 у порожнині конвертера

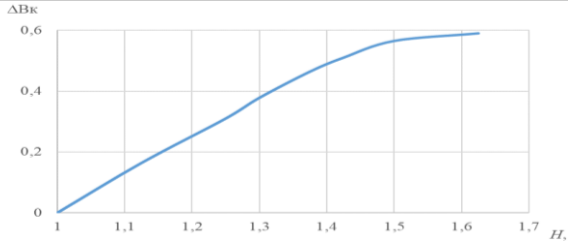

Рисунок 9. Вплив висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни на зміну основності кінцевого шлаку

Фізико-хімічна природа залежності між зміною маси плавикового шпату на плавку і висотою розміщення фурми над рівнем спокійної ванни (рис. 10) пояснюється процесом формування рідкотекучості шлаку, яка забезпечується, крім добавок плавикового шпату, також зростанням масової частки оксидів заліза в шлаку. Що вища висота розміщення фурми, то більше міститься оксидів заліза в шлаку, тобто для підтримання такої самої рідкотекучості шлаку потрібна менша витрата плавикового шпату.

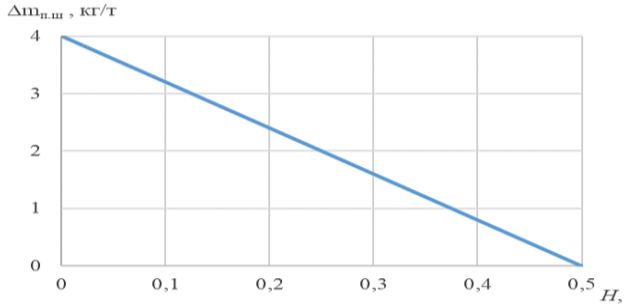

Рисунок 10. Вплив висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни на зміну питомої маси плавикового шпату

Зростання масової частки оксидів заліза в шлаку з підвищенням висоти розміщення фурми можна пояснити залежність між цим параметром і зміною масової частки мангану в металі наприкінці продувки (рис. 11). Як уже зазначалось, стійкість футерівки можна оцінювати за масою оксиду магнію в шлаку. Залежність зміни масової частки оксиду магнію в кінцевому шлаку від висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни зображено на рис. 12.

Що нижча висота розміщення фурми, то більше зношення футерівки конвертера, оскільки струмені дуття розмивають днище. Крім того, виникають технологічні труднощі наведення високоосновного шлаку. Зі збільшенням висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни поліпшуються умови процесу шлакоутворення, підвищується основність шлаку і, як наслідок, знижується зношення футерівки.

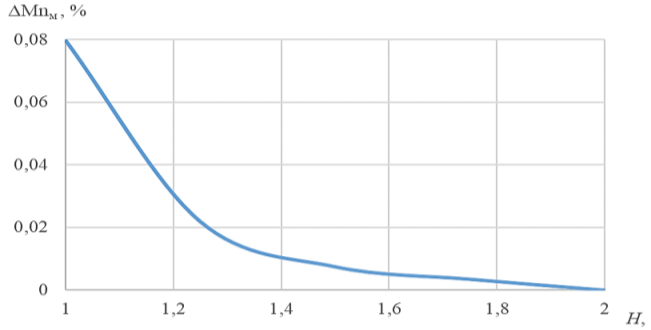

Рисунок 11. Вплив висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни на зміну масової частки мангану наприкінці продувки

Отже, підвищення розміщення фурми над рівнем спокійної ванни призводить до збільшення основності та окиснення кінцевого шлаку, ступеня допалювання CO в порожнині конвертера, зменшення масової частки мангану в металі наприкінці продувки, витрат плавикового шпату й зношення футерівки.

Використання частини утвореного конвертерного газу в якості палива в порожнині конвертера для розплавлення металевого брухту дозволить збільшити частку брухту (рис. 13) у шихті, що в результаті призведе до зниження собівартості киснево-конвертерної сталі. Враховуючи, що гази, які відходять з конвертера, складаються приблизно з 90 % CO і 10 % CO_2, а питома теплота згоряння CO становить 12,7 МДж/м^3, великі резерви в збільшенні частки брухту криються в підвищенні ступеня згоряння CO в порожнині конвертера [6]. Реакція горіння CO в порожнині конвертера (спалахує при t>700 °C) екзотермічна $CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2 + Q$, теплова енергії якої дає можливість розплавити більше металобрухту та знизити частку чавуну.

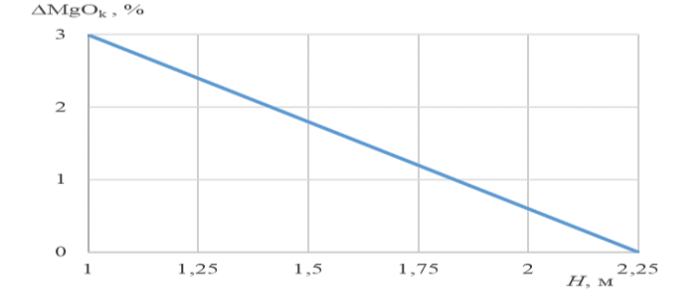

Рисунок 12. Вплив висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни на зміну масової частки оксиду магнію в кінцевому шлаці

Рисунок 13. Залежність питомої (на тонну сталі) маси рідкого чавуну від питомої маси лому

Найбільш розповсюдженим способом збільшення ступеня допалювання CO у порожнині конвертера є регулювання відстані фурми над рівнем спокійної ванни. Ступінь згоряння CO в порожнині конвертера визначають параметри режиму дуття, зокрема відстань фурми від рівня спокійної ванни [7]. Регулюючи відстань, можна забезпечити оптимальну кількість тепла, що виділяється в конвертері від окиснення CO до CO_2. Дослідження показали, що при використанні системи керування для одноярусної фурми, яка спрямована на регулювання CO_2, його вміст в середньому можна підвищити до 12,7 %, що дає можливість збільшити частку брухту у шихті на 2,7 %. Найкращі ж результати можна отримати при застосуванні двоярусної фурми, в цьому випадку можна максимально підвищити кількість CO_2 до 25 %, та відповідно брухту у шихті на 5,3 %, не порушуючи умови шлакоутворення.

2 Розробка прогнозуючої моделі режиму продувки киснево-конвертерного процесу

У сучасних умовах розвитку металургійного виробництва актуальними являються задачі по розробці ресурсозберігаючих технологічних режимів виплавки сталі, теоретичних і практичних аспектів нових енергозберігаючих способів продувки сталеплавильної ванни технологічним газом та підвищення ефективності теплової роботи печей [8]. Одним із шляхів зниження витратних показників є утилізація фізичної та хімічної енергії газів, які відходять із конвертера, а саме допалювання CO до CO_2. Керування режимом продувки ККП потребує вимірювання масової частки CO_2 та інтенсивності продувки. В силу технологічних особливостей процесу вміст CO_2 розраховують по

балансовому рівнянню вмісту газів у дутті, повітрі та газоході. Кількість газів у газоході (1) визначається по балансовому рівнянню [9] вмісту аргону та азоту:

$$\begin{cases} Ar_г v_г = Ar_п v_п + Ar_д v_д \\ N_{2г} v_г = N_{2п} v_п + N_{2д} v_д, \end{cases} \quad (1)$$

де v – витрати газів, м^3/хв; “г”, “п”, “д” – індекси відповідно газоходу, повітря і дуття.

З (1) виразимо витрати газів у газоході (2) та повітря (3):

$$v_г = \frac{Ar_п N_{2д} - Ar_д N_{2п}}{Ar_п N_{2г} - Ar_г N_{2п}} v_д \quad (2)$$

$$v_п = \frac{Ar_г N_{2д} - Ar_д N_{2п}}{Ar_п N_{2г} - Ar_г N_{2п}} v_д \quad (3)$$

Гази, що відходять із конвертера, які складаються в основному із CO і CO_2, в газоході змішуються з повітрям. Реакція окиснення CO до CO_2 є екзотермічною реакцією $CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2 + Q$. При цьому частково витрачається кисень (4) повітря, підсмоктаний у газохід. Складемо баланс по кисню:

$$O_{2п} v_п = O_{2г} v_г + v_{O_2 р}, \quad (4)$$

де $v_{O_2 р}$ – витрати кисню на реакцію окиснення CO, м^3/хв.

Витрати кисню (5) на реакцію окиснення (6) при цьому складають:

$$v_{CO р} = 2v_{O_2 р} = 2(O_{2п} v_п - O_{2г} v_г). \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_{CO_2} + v_{CO_р} = CO_{2г} v_г \\ v_{CO} - v_{CO р} = CO_г v_г. \end{cases} \quad (6)$$

Із системи (6) знаходимо (7):

$$\begin{cases} v_{CO_2} = CO_{2г} v_г - v_{CO р} \\ v_{CO} = CO_г v_г + v_{CO_р}. \end{cases} \quad (7)$$

Використовуючи (1) – (7), знаходимо коефіцієнт (8) допалювання CO в CO_2 у порожнині конвертера:

$$\gamma = \frac{v_{CO_2 к}}{v_{CO к} + v_{CO_2 к}} = \frac{CO_{2г} v_г - v_{CO р}}{(CO_г + CO_{2г}) \times v_г}. \quad (8)$$

Підставляючи (2) в (8) отримуємо (9):

$$\gamma = \frac{CO_{2г}\left(\frac{Ar_п N_{2д} - Ar_д N_{2п}}{Ar_п N_{2г} - Ar_г N_{2п}} v_д\right) - v_{CO р}}{(CO_г + CO_{2г}) \times \left(\frac{Ar_п N_{2д} - Ar_д N_{2п}}{Ar_п N_{2г} - Ar_г N_{2п}} v_д\right)} \quad (9)$$

Математична модель динамічного контролю продувки, заснована на врахуванні розподілу дуттьового кисню між металом, шлаком і конвертерним газом – представляє собою систему диференційних рівнянь, що характеризує матеріальний і тепловий баланс в конвертері і газоході охолоджувача

конвертерних газів. При створенні динамічної моделі процесу нехтуємо градієнтами керуючих параметрів, вважаючи, що просторова неоднорідність в ванній як по хімічному складі, так і по температурі внаслідок інтенсивного перемішування відсутня. Основний вклад в масообмін і енергетику процесу вносять термохімічні реакції окиснення вуглецю і заліза ванни. Вважаємо, що конвертерний газ як продукт зневуглецювання ванни складається з CO та CO_2. У робочому просторі конвертера оксид вуглецю частково спалюється в діоксид. Ця реакція, як і реакція горіння заліза, приводить до зменшення коефіцієнта засвоєння кисню вуглецем ванни і знижує його швидкість вигоряння. З врахуванням вище сказаного виразимо швидкість зневуглецювання ванни через об'ємну витрату кисню дуття (10):

$$\frac{dG_c}{d\tau} = 10^{-3}\frac{2{\cdot}12}{22{,}4}\cdot\left[v\gamma_1(1-\gamma_2) - 10^3\frac{22{,}4}{2{\cdot}12}(1-\gamma_{CO})\frac{dG_c}{d\tau} - 10^3\frac{22{,}4}{2{\cdot}56}\frac{dG_{Fe}}{d\tau}\right], \quad (10)$$

де $\frac{dG_c}{d\tau}$ – масова швидкість зневуглецювання ванни, т/хв; v – інтенсивність подачі дуття, м^3/хв; γ_1 – коефіцієнт, що характеризує чистоту дуття; γ_2 – коефіцієнт, що характеризує втрати дуття; γ_{CO} – масова доля карбону ванни, що окислюється до CO в порожнині конвертера за рахунок кисню дуття; $\frac{dG_{Fe}}{d\tau}$ – масова швидкість окиснення заліза ванни, т/хв. Виразимо швидкість зневуглецювання (11), враховуючи, що $\gamma_{CO_2} = 1 - \gamma_{CO}$ та $v_{O_2Fe} = 10^3\frac{22{,}4}{2{\cdot}56}\frac{dG_{Fe}}{d\tau}$:

$$\frac{dG_c}{d\tau} = 10^{-3}\frac{2{\cdot}12}{22{,}4}\frac{v\gamma_1(1-\gamma_2)-v_{O_2Fe}}{1+\gamma_{CO_2}}, \quad (11)$$

де v_{O_2Fe} – інтенсивність витрати кисню на окиснення заліза ванни, м^3/хв; γ_{CO_2} – масова доля карбону ванни, що окислюється до CO_2 в порожнині конвертера за рахунок кисню дуття. Інтенсивність витрати кисню на окиснення заліза ванни визначається залежністю (12):

$$v_{O_2Fe} = 10m_ч\gamma_{шл}\frac{16}{72}\frac{22{,}4}{32}\gamma_{FeO}\tau_n^{-1}, \quad (12)$$

де $m_ч$ – маса чавуну, т; $\gamma_{шл}$ – частка шлаку від маси металу; γ_{FeO} – вміст окису заліза в шлаку, %; τ_n – середня тривалість продувки, хв.

Величини γ_{FeO} (13) та γ_{CO_2} (14) є функціями від відстані фурми до рівня спокійної ванни:

$$\gamma_{FeO} = 16{,}34H - 5{,}63 \quad (13)$$

$$\gamma_{CO_2} = [10{,}2(H-1{,}5)^2 + 3{,}1]10^{-2}, \quad (14)$$

де H – положення фурми над рівнем спокійної ванни, м.

Для 160 тонного конвертера при частці шлаку 0.1 та середньою тривалістю продувки 20 хв $v_{O_2Fe} = 10 \cdot 160 \cdot 0{,}1 \cdot \frac{16}{72}\frac{22{,}4}{32}\gamma_{FeO}\frac{1}{20} = 1{,}244\gamma_{FeO}$. Підставимо (13) і (14) в (11). Для інтенсивності подачі дуття 400 м^3/хв, чистоті дуття кисню 0.99 та втратах 0.01 отримаємо залежність швидкості зневуглецювання (рис. 14) від положення фурми над рівнем спокійної ванни (15):

$$\frac{dG_c}{d\tau} = \frac{427{,}55 - 21{,}78H}{102(H-1{,}5)^2 + 1031}. \quad (15)$$

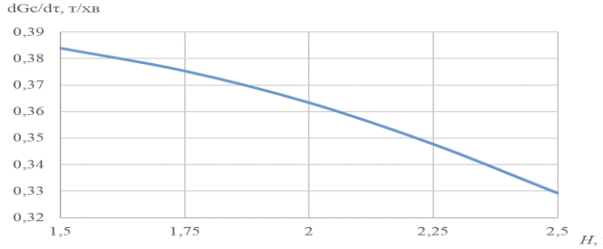

Рисунок 14. Вплив висоти розміщення фурми над рівнем спокійної ванни на зміну швидкості зневуглецювання

Перехідний процес зміни швидкості зневуглецювання $v_c = \frac{dG_c}{d\tau}$ від зміни відстані фурми до рівня спокійної ванни H описується диференційним рівнянням (16):

$$T_{v_c}^H \frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t) = k_{v_c}^H H(t), \quad (16)$$

де $k_{v_c}^H$ – коефіцієнт передачі по каналу відстань фурми до рівня спокійної ванни – швидкість зневуглецювання, $\frac{m}{хв \cdot м}$; $T_{v_c}^H$ – стала часу, с. Значення коефіцієнта передачі знайдемо зі залежності (2.15) $k_{v_c}^H = \frac{\Delta v_c}{\Delta H} = \frac{(0{,}329 - 0{,}383)\frac{m}{хв}}{(2{,}5-1{,}5)м} \approx -0{,}054\frac{m}{хв \cdot м}$. При знаходженні $T_{v_c}^H$ виникають труднощі, що пов'язані з перехідними процесами у вимірювачі швидкості зневуглецювання. Тому для визначення постійної часу використовували імпульсні характеристики та аналіз акустичних коливань через вимірювання тиску газів у перехідному газоході конвертера. Величина постійної часу нестаціонарна (рис. 15) та залежить від періоду плавки, залежність описана функцією Гауса третього порядку ($R^2 = 0.989$) (17):

$$T_{v_c}^H(\tau) = 7{,}05 \cdot e^{-\left(\frac{\tau - 8{,}47}{2{,}9}\right)^2} + 6{,}61 \cdot e^{-\left(\frac{\tau - 15{,}57}{2{,}6}\right)^2} + 11{,}48 \cdot e^{-\left(\frac{\tau - 9{,}78}{6{,}0}\right)^2}, \quad (17)$$

де τ – час від початку продувки, хв.

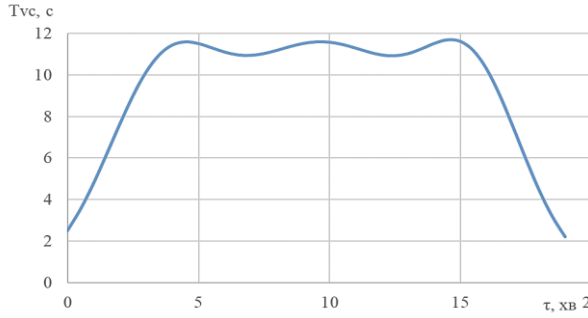

Рисунок 15. Залежність сталої часу $T_{v_c}^{H}$ від часу з початку продувки

Зміна швидкості зневуглецювання приводить до зміни ступеня окиснення вуглецю до CO_2 у порожнині конвертера. Цей процес також можна описати диференційним рівнянням першого (18) порядку виду:

$$T_{\gamma CO_2}^{v_c} \frac{d\gamma_{CO_2}(t)}{dt} + \gamma_{CO_2}(t) = k_{\gamma CO_2}^{v_c} v_c(t), \tag{18}$$

де $k_{\gamma CO_2}^{v_c}$ – коефіцієнт передачі по каналу швидкість зневуглецювання – ступінь окиснення вуглецю до CO_2, $\frac{хв}{т}$; $T_{\gamma CO_2}^{v_c}$ – стала часу, с.

Значення коефіцієнта передачі знайдемо зі залежності (11): $k_{\gamma CO_2}^{v_c} = \frac{\Delta\gamma_{CO_2}}{\Delta v_c} = \frac{0{,}133-0{,}0565}{(0{,}329-0{,}363)\frac{т}{хв}} \approx -2{,}25\frac{хв}{т}$, згідно результатів дослідження [10] отримано $T_{\gamma CO_2}^{v_c} \approx 2{,}15\ с.$

Перехідний процес зміни ступеня окиснення вуглецю до CO_2 від зміни відстані фурми до рівня спокійної ванни H утворений послідовним з'єднанням (16) та (18) та описується диференційним рівнянням (19):

$$T_{1\gamma CO_2}^{H}(\tau)\frac{d^2\gamma_{CO_2}(t)}{d^2t} + T_{2\gamma CO_2}^{H}(\tau)\frac{d\gamma_{CO_2}(t)}{dt} + \gamma_{CO_2}(t) = k_{\gamma CO_2}^{H} H(t), \tag{19}$$

$$k_{\gamma CO_2}^{H} = k_{v_c}^{H} \cdot k_{\gamma CO_2}^{v_c} = \left(-0{,}054\frac{т}{хв\cdot м}\right)\cdot\left(-2{,}25\frac{хв}{т}\right)\cdot 100\% = 12{,}15\frac{\%}{м};$$

де

$$T_{1\gamma CO_2}^{H}(\tau) = T_{v_c}^{H} T_{\gamma CO_2}^{v_c} = 15{,}16 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-8{,}47}{2{,}9}\right)^2} + 14{,}21 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-15{,}57}{2{,}6}\right)^2} + 24{,}68 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-9{,}73}{6{,}0}\right)^2} [c];$$

$$T_{2\gamma CO_2}^{H}(\tau) = T_{v_c}^{H} + T_{\gamma CO_2}^{v_c} = 7{,}05 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-8{,}47}{2{,}9}\right)^2} + 6{,}61 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-15{,}57}{2{,}6}\right)^2} + 11{,}48 \cdot e^{-\left(\frac{\tau-9{,}73}{6{,}0}\right)^2} + 2{,}15\,[c].$$

Представимо процес (19) у вигляді керованої канонічної форми моделі в просторі станів (20):

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, & 1 \\ -\frac{1}{T_{1\gamma CO_2}^{H}(\tau)}, & -\frac{T_{2\gamma CO_2}^{H}(\tau)}{T_{1\gamma CO_2}^{H}(\tau)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_{1\gamma CO_2}^{H}(\tau)} \end{bmatrix} H(t), \\ \gamma_{CO_2}(t) = \begin{bmatrix} k_{\gamma CO_2}^{H} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (20)$$

Відомо, що швидкість зневуглецювання металу також визначається інтенсивністю подачі дуття [6]. На початку продувки при високій масовій долі вуглецю швидкість його окиснення змінюється від зміни інтенсивності подачі кисню в зону реакції, так як зневуглецювання протікає в основному в зоні контакту дуттьової струї з ванною. В кінці продувки, коли масова доля вуглецю у ванній досягає так званого «критичного» рівня, швидкість зневуглецювання знижується, оскільки лімітуючою ланкою процесу стає дифузія окиснюваного елемента в зоні реакції. У відповідності з уявленнями про два кінетичні періоди процесу окиснення вуглецю, перший описується рівнянням (21):

$$-\frac{dC}{d\tau} = \frac{K_1 \cdot \eta \cdot v}{G_M}, \quad (21)$$

де $\frac{dC}{d\tau}$ – швидкість зневуглецювання ванни, %/хв; K_1 – коефіцієнт, що характеризує перший кінетичний період, $\frac{m \cdot \%}{м^3}$; η – коефіцієнт, що залежить від об'ємної долі кисню в дутті і ступені його використання на зневуглецювання; v – об'ємна витрата кисневого дуття, м^3/хв; G_M – маса металевої ванни, т.

У другому кінетичному періоді, який наступає при рівномірності дифузійних потоків вуглецю і кисню, швидкість зневуглецювання описується рівнянням (22):

$$-\frac{dC}{d\tau} = \frac{\beta S C}{V_M}, \quad (22)$$

де β – коефіцієнт масопереносу вуглецю у ванній, м/хв; S – поверхня, на якій відбувається процес окиснення вуглецю, м^2; C – масова доля вуглецю в ванній, %; V_M – об'єм металевої ванни, м^3. Встановлена залежність ступеня засвоєння кисню ванни від інтенсивності дуття. Дослідження були проведені на 130-тоному конвертері при продувці через чотирьохсоплову фурму з кутом

нахилу осі сопла до вертикалі 13^0. Залежність середньої швидкості окиснення вуглецю від питомої витрати кисню ($\sigma = 0{,}012\frac{\%}{кг}$, R>0.95) зображена на рисунку 16.

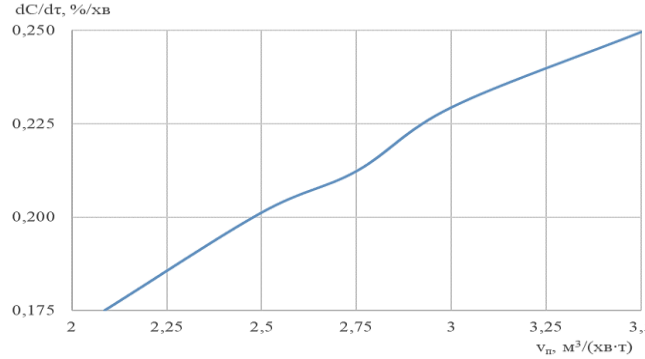

Рисунок 16. Вплив інтенсивності продування на швидкість зневуглецювання ванни

Перехідний процес зміни швидкості зневуглецювання v_c від інтенсивності дуття кисню можна описати диференційним рівнянням першого порядку виду (23):

$$T_{v_c}^{v}\frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t) = k_{v_c}^{v}v(t), \qquad (23)$$

де $k_{v_c}^{v}$ – коефіцієнт передачі по каналу витрата кисню – швидкість зневуглецювання, $\frac{m}{м^3}$; $T_{v_c}^{v}$ – стала часу, с. Значення динамічних властивостей знайдемо із досліджень описаних вище (рис. 14). Для 160т конвертера отримуємо $k_{v_c}^{v} = \frac{\Delta v_c}{\Delta v} = \frac{(0{,}367-0{,}322)\frac{m}{кг}}{(480-400)\frac{м^3}{кг}} \approx 0{,}56\frac{кг}{м^3}$; $T_{v_c}^{v} \approx 3{,}7\ с.$ Перехідний процес зміни ступеня окиснення вуглецю до CO_2 від зміни інтенсивності дуття кисню утворений послідовним з'єднанням (18) та (23) та описується диференційним рівнянням (24):

$$T_{v_c}^{v}T_{\gamma CO_2}^{v_c}\frac{d^2\gamma_{CO_2}(t)}{d^2t} + \left(T_{v_c}^{v} + T_{\gamma CO_2}^{v_c}\right)\frac{d\gamma_{CO_2}(t)}{dt} + \gamma_{CO_2}(t) = k_{\gamma CO_2}^{v}v(t), \qquad (24)$$

$$k_{\gamma CO_2}^{v} = k_{v_c}^{v}\cdot k_{\gamma CO_2}^{v_c} = \left(0{,}56\frac{кг}{м^3}\right)\cdot\left(-2{,}25\cdot 10^{-3}\frac{кг}{кг}\right)\cdot 100\% =$$

де $-0{,}126\frac{(\%\cdot кг)}{м^3}$.

ТОУ інтенсивності дуття кисню кисневого конвертера утворений фізичним з'єднанням пневмоклапана та витратоміра, що представляє ємкість кисню, яка створює опір потоку речовини. Об'єкт, вхідною величиною якого

є положення пневмоклапану, а вихідною – витрата кисню, описується диференційним рівнянням першого порядку (25):

$$T_v^{u_{O_2}} \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = k_v^{u_{O_2}} u_{vo_2}(t), \quad (25)$$

де u_{vo_2}– положення пневмоклапану, %; $k_v^{u_{O_2}}$ – коефіцієнт передачі по каналу положення пневмоклапану – інтенсивність дуття, $\frac{м^3}{(хв \cdot \%)}$; $T_v^{u_{O_2}}$ – стала ,с. Коефіцієнт передачі: $k_v = \frac{\Delta v}{\Delta u_{vo_2}} = \frac{600 \frac{м^3}{хв}}{100\%} = 6 \frac{м^3}{(хв \cdot \%)}$. З довідника [11] стала часу об'єкту $T_v^{u_{O_2}} = 1{,}2\ c$.

Представимо процес (25) у вигляді керованої канонічної форми моделі в просторі станів (26):

$$\begin{cases} [x_1'(t)] = \left[-\frac{1}{T_v^{u_{O_2}}}\right][x_1(t)] + \left[\frac{1}{T_v^{u_{O_2}}}\right] u_{vo_2}(t), \\ v(t) = [k_v^{u_{O_2}}][x_1(t)]. \end{cases} \quad (26)$$

Перехідний процес зміни ступеня окиснення вуглецю до CO_2 від зміни положення пневмоклапану дуття кисню утворений послідовним з'єднанням (24) та (25) та описується диференційним рівнянням (27):

$$T_{1\gamma CO_2}^{u_{O_2}} \frac{d^3 \gamma_{CO_2}(t)}{d^3 t} + T_{2\gamma CO_2}^{u_{O_2}} \frac{d^2 \gamma_{CO_2}(t)}{d^2 t} + T_{3\gamma CO_2}^{u_{O_2}} \frac{d\gamma_{CO_2}(t)}{dt} + \gamma_{CO_2}(t) = k_{\gamma CO_2}^{u_{O_2}} u_{vo_2}(t), \quad (27)$$

$$k_{\gamma CO_2}^{u_{O_2}} = k_{\gamma CO_2}^{v} \cdot k_v^{u_{O_2}} = \left(-0{,}126 \frac{(\%_{CO_2} \cdot хв)}{м^3}\right) \cdot \left(6 \frac{м^3}{(хв \cdot \%_{u_{O_2}})}\right) =$$

де $-0{,}756 \frac{\%_{CO_2}}{\%_{u_{O_2}}}$;

$$T_{1\gamma CO_2}^{u_{O_2}} = T_v^{u_{O_2}} T_{v_c}^{v} T_{\gamma CO_2}^{v_c} = 9{,}55[c];$$

$$T_{2\gamma CO_2}^{u_{O_2}} = T_{v_c}^{v} T_{\gamma CO_2}^{v_c} + T_{v_c}^{v} T_v^{u_{O_2}} + T_v^{u_{O_2}} T_{\gamma CO_2}^{v_c} = 14{,}98[c];$$

$$T_{3\gamma CO_2}^{u_{O_2}} = T_v^{u_{O_2}} + T_{v_c}^{v} + T_{\gamma CO_2}^{v_c} = 7{,}05[c].$$

Представимо процес (27) у вигляді керованої канонічної форми моделі в просторі станів (28):

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \\ x_3'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_{1\gamma CO_2}^{u_{O_2}}} & -\frac{T_{3\gamma CO_2}^{u_{O_2}}}{T_{1\gamma CO_2}^{u_{O_2}}} & -\frac{T_{2\gamma CO_2}^{u_{O_2}}}{T_{1\gamma CO_2}^{u_{O_2}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{1\gamma CO_2}^{u_{O_2}}} \end{bmatrix} u_{vo_2}(t), \\ \gamma_{CO_2}(t) = \begin{bmatrix} k_{\gamma CO_2}^{u_{O_2}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (28)$$

Виконаємо моделювання режиму продувки киснево-конвертерного процесу (рис. 17-20) в середовищі Matlab Simulink. Було обрано алгоритм

вирішення рівнянь ode23s (stiff/mod. Rosenbrock) зі зміною величиною кроку (variable-step). Абсолютна і відносна точність розрахунків – 0,00001. Механізм переміщення фурми опишемо інтегральною ланком першого порядку, швидкість переміщення фурми становить 0,2 м/с.

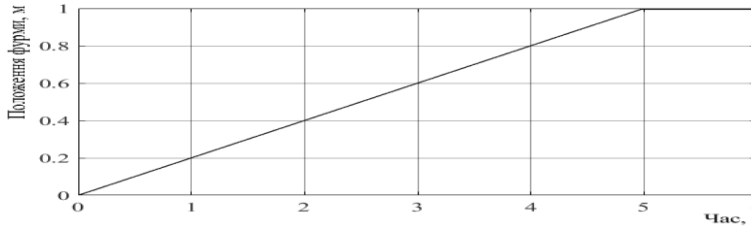

Рисунок 17. Перехідний процес моделі переміщення фурми

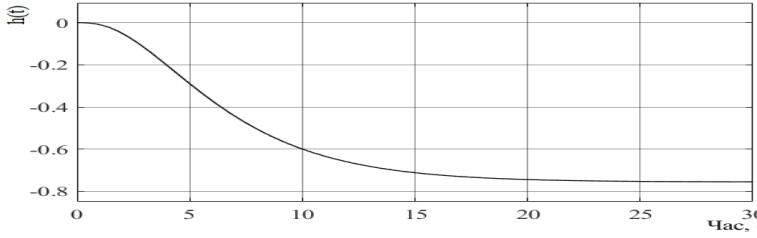

Рисунок 18. Перехідна характеристика системи по каналу зміна положення пневмоклапану кисню – вміст вуглекислого газу

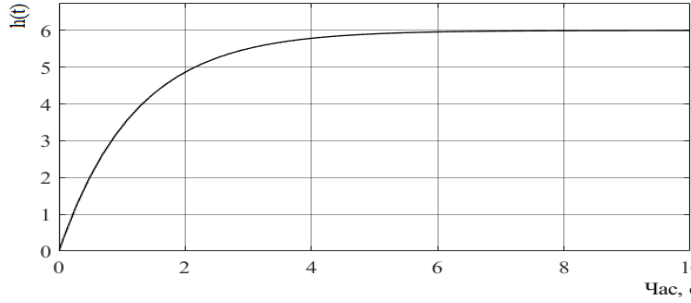

Рисунок 19. Перехідна характеристика системи по каналу зміна положення пневмоклапану кисню – витрата кисню

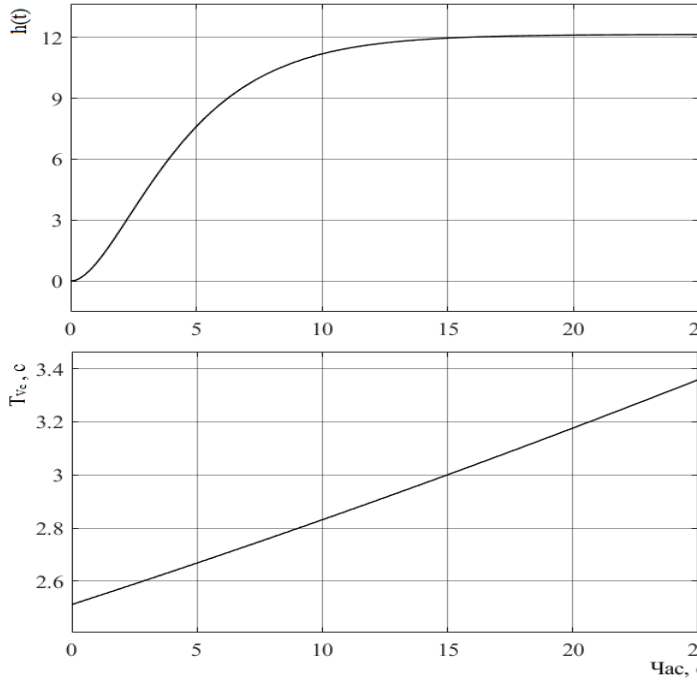

Рисунок 20. Перехідна характеристика системи по каналу зміна положення фурми – вміст вуглекислого газу

Було проаналізовано технологічні особливості керування параметрами режиму дуття ККП та розроблено модель в просторі станів даного процесу: встановлено, що одним з основних параметрів режиму дуття є інтенсивність продувки, від якої залежить хід процесів окиснення домішок і шлакоутворення. Однак підвищення інтенсивності продувки призводить до зменшення окиснення заліза і переходу його в шлак та зношення футерівки зменшується, що пов'язано зі скороченням як тривалості продувки, так і контактування вогнетривів з агресивним шлаком і високотемпературним факелом; проаналізовано вплив розміщення фурми над рівнем спокійної ванни, а саме підвищення розміщення фурми призводить до збільшення основності та окиснення кінцевого шлаку, ступеня допалювання CO в порожнині конвертера, зменшення масової частки мангану в металі наприкінці продувки, витрат плавикового шпату й зношення футерівки. Регулюючи відстань, можна забезпечити оптимальну кількість тепла, що виділяється в конвертері від окиснення CO до CO_2. Дослідження показали, що при використанні системи керування, яка спрямована на регулювання CO_2, його вміст в середньому можна підвищити до 12,7%, що дає можливість збільшити

частку брухту у шихті на 2,7 %; встановлено, зміна ступеня окиснення вуглецю до CO_2 у порожнині конвертера залежить від зміни швидкості зневуглецювання яка, в свою чергу, залежать від відстані фурми до рівня спокійної ванни. Процес зміни швидкості зневуглецювання від зміни відстані фурми до рівня спокійної ванни є нестаціонарним, описується диференційним рівнянням першого порядку, стала часу якого залежить від періоду продувки; досліджено вплив інтенсивності подачі дуття на швидкість зневуглецювання металу. Перехідний процес зміни ступеня окиснення вуглецю до CO_2 від зміни положення пневмоклапану дуття кисню описується диференційним рівнянням третього порядку; отримана модель режиму продувки киснево-конвертерного процесу у вигляді керованої канонічної форми дискретної моделі в просторі станів в залежності від зміни відстані фурми до рівня спокійної ванни та інтенсивності дуття, яка використана в якості прогнозуючої моделі модельно-прогнозуючого регулятора. Наведені чисельні значення динамічних властивостей отриманої моделі.

Література

1. Bogushevsky, V., & Skachok, A. (2016). The influence of uncontrolled disturbance actions on control of converter melting. *Metallurgical and Mining Industry*, (5), 128–133

2. Singha, P. (2023). Insights Thermodynamic in Basic Oxygen Steel Making Process. *ISIJ International*, *63*(8), 1343 – 1350. doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2023-087

3. Wang, R., Mohanty, I., Srivastava, A., Roy, T. K., Gupta, P., & Chattopadhyay, K. (2022). Hybrid Method for Endpoint Prediction in a Basic Oxygen Furnace. *Metals*, *12*(5), 801. https://doi.org/10.3390/met12050801

4. Xin, Z., Liu, Q., Zhang, J., & Lin, W. (2025). Analysis of Multi-Zone Reaction Mechanisms in BOF Steelmaking and Comprehensive Simulation. *Materials*, *18*(5), 1038. https://doi.org/10.3390/ma18051038

5. Kačur, J., Flegner, P., Durdán, M., & Laciak, M. (2022). Prediction of Temperature and Carbon Concentration in Oxygen Steelmaking by Machine Learning: A Comparative Study. *Applied Sciences*, *12*(15), 7757. https://doi.org/10.3390/app12157757i

6. Mariiash, Y. I., Stepanets, O. V., & Safonyk, A. P. (2024). Model predictive control for the blowing regime of the steelmaking process. *CEUR Workshop Proceedings*, 3790, 331–341.

7. Nenchev, B., Panwisawas, C., Yang, X., Fu, J., Dong, Z., Tao, Q., Gebelin, J.-C., Dunsmore, A., Dong, H., Li, M., Tao, B., Li, F., Ru, J., & Wang, F. (2022). Metallurgical Data Science for Steel Industry: A Case Study on Basic Oxygen Furnace. *steel research international*. https://doi.org/ 10.1002/srin.202100813

8. Niyayesh, M., & Uygun, Y. (2024). Predicting endpoint parameters of electric arc furnace–based steelmaking using artificial neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14502-x

9. Богушевський, В. С., Зубова, К. М., & Сухенко, В. Ю. (2012). Спосіб керування режиму дуття у кисневому конвертері (Патент України № 71152). НТУУ «КПІ»

10. Stepanets, O., & Mariiash, Y. (2020). MODEL PREDICTIVE CONTROL APPLICATION IN THE ENERGY SAVING TECHNOLOGY OF BASIC OXYGEN FURNACE. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, *10*(2), 70–74. https://doi.org/10.35784/iapgos.931

11. Кравченко, В. П., Койфман, О. О., & Сімкін, О. І. (2023). *Автоматизація технологічних процесів і виробництв у чорній металургії: навчальний посібник*. Одеса: Олді+

IMPROVED DYNAMIC PREDICTIVE MODEL FOR OXYGEN CONVERTER BLOWING

Ph.D. Y. Mariiash[1][0000-0002-0812-8960], **Ph.D. O. Stepanets**[2][0000-0002-0812-8960]
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
EMAIL: [1]y.mariiash@kpi.ua, [2]o.stepanets@kpi.ua

Abstract. *This paper develops a dynamic model of the blowing mode in the oxygen furnace process, which is a key issue for improving the energy and resource efficiency of modern steel production. The blowing mode of oxygen converter smelting was considered as a technological control object, and an analysis of the problems of regulating blowing parameters under conditions of non-stationary metal decarburization rates was performed. During the blowing of the converter bath, the control system solves the problem of synchronizing the processes of refining and heating the metal with a reliable blowing mode, and at the end of the blowing, the problem of determining the moment of its termination. It has been established that the change in the degree of carbon oxidation to CO_2 in the converter cavity depends on the change in the decarburization rate, which, in turn, depends on the distance between the tuyere and the level of the calm bath. The process of changing the decarburization rate from the change in the distance between the tuyere and the level of the calm bath is non-stationary and is described by a first-order differential equation, the time constant of which depends on the blowing period; the influence of the intensity of the blast supply on the metal decarburization rate has been investigated. The transition process of changing the degree of carbon oxidation to CO_2 from changing the position of the oxygen blast pneumatic valve is described by a third-order differential equation; The resulting model of the oxygen converter process purging mode in the form of a controlled canonical form of a discrete model in state space depending on the change in the distance from the tuyere to the level of the calm bath and the intensity of blowing is used as a predictive model of a model-predictive controller.*

Keywords: *predictive model, control, state space model, oxygen converter.*