

variable number of steps (eras). Recognition images should be scaled to a size of 28x28 (784 cells in a one-dimensional representation), so the number of neurons in the input and hidden layers was assumed to be 800. Image processing (filtering, scaling, etc.) was performed using the OpenCV library. For recognition, each image of the digit was converted to a size of 28x28 and fed to the input of a pre-trained neural network. To more accurately and reasonably configure the recognition model, the Keras-tuner package was tested. Development of work with the Keras-tuner package was performed on simple regression-type models with several inputs and 1-3 outputs. The possibility of significant optimization of the model behavior is established. After optimizing the model, the recognition accuracy of test images (several images of buckets) was about 100%

The information technology highlighting the area of interest in photos containing handwritten digits for further recognition is worked out. The possibility of optimization of deep learning neural networks built with the help of Keras library is shown. A simple model with tight, fully hidden layers and optimization of model parameters with Keras Tuner package has been found to provide sufficient recognition accuracy.

Keywords: Keras, TensorFlow, MNIST, python, deep learning, neural networks, digit recognition

Стаття надійшла 16.12.2019

Рецензент: к.т.н. Молчанова В.С.

УДК 669.162.22

Щербаков С.В., Черевко О.О., Якименко О.І., Єфімов С.О.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ЗНЕВУГЛЕЦЮВАННЯ

Кисневий конвертер є одним з найбільш важливих металургійних об'єктів автоматизації. Удосконалення його управління необхідно для отримання сталі з заданими температурою і складом при максимальній економічності плавки. Однак задача повної автоматизації процесу є вкрай складною і вимагає знання закономірностей впливу на технологічний процес безлічі факторів: фізико-хімічних, газо-гідродинамічних та інших, до теперішнього часу недостатньо досліджених.

Фізико-хімічну основу виробництва сталі в конвертері складають процеси окислення домішок чавуну, і в першу чергу окислення вуглецю. Незважаючи на великий обсяг досліджень, присвячених проблемі окислення вуглецю металу, значна кількість питань у цій галузі залишається мало вивченою. Відомо наукова теорія про те, що зневуглецювання при низькому вмісті вуглецю контролюється переважно його масовим переносом, до кінця не пояснює всіх особливостей процесу. У зв'язку з цим постало завдання проведення додаткових наукових досліджень динаміки окислення вуглецю, особливо при його низькій концентрації.

В роботі розглянуті методики, що описують процес зневуглецювання конвертерної сталі. Побудована модель розрахунку швидкості зневуглецювання і динаміки вмісту вуглецю у ванні конвертера під час продувки. Встановлено, що розроблена динамічна модель окислення вуглецю адекватна процесам, що протікають у ванні конвертера. Модель дозволяє безперервно по ходу продувки здійснювати контроль і регулювання найбільш важливих параметрів металу за допомогою управління кисневою фурмою, визначати швидкості зневуглецювання, зміни температури і окислення заліза ванни, а також ступінь допалювання CO в CO₂ в порожнині конвертера.

Ключові слова: кисневий конвертер, продувка, газів, що відходять, зневуглецювання, непрямі методи, балансові рівняння, експеримент, комп'ютерне моделювання

Постановка проблеми. Відомі труднощі зупинення продувки при заданому вмісті вуглецю стимулювали посилену увагу дослідників до розробки методів оцінки цього параметра. Вимога мінімального запізнювання обумовлює відмову від принципово можливого способу механізованого відбору проби металу з конвертера без припинення продувки і подальшого її аналізу. Успіху в рішенні цієї задачі можна очікувати головним чином у вимірі поза конвертером параметрів, що побічно характеризують вміст вуглецю у ванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поточний вміст вуглецю в металі і швидкість його видалення з металеві ванни можуть бути знайдені, якщо відомий склад і кількість газів, що виходять з конвертера. Дійсно, якщо скласти баланс вуглецю конвертерної плавки, то його прибуткова частина буде складатися з вуглецю чавуну, сталевому брухту і недопалу вапна, а видаткова – з вуглецю газів, що відходять (CO і CO_2), і вуглецю металеві ванни. Знаючи кількість вуглецю, внесеного в систему, і кількість, що покинуло ванну з газами, що відходять, можна знайти масу залишку вуглецю у ванні і визначити його процентний вміст [1].

Крім балансу вуглецю, існує й інший метод, розроблений Філіпповим С.І. та Купріяновим А.А. [2, 3], що дозволяє за даними аналізу газів, що відходять, оцінити вміст вуглецю у ванні, причому саме в тому інтервалі низьких концентрацій вуглецю, де метод балансу не дає позитивних результатів. Підставою для цього методу служать особливості кінетики реакції зневуглецювання, що зумовлюють різке зниження швидкості цієї реакції при зменшенні концентрації вуглецю.

Аналогічні результати були отримані раніше Баптізманським В.І. [4] і Меджибожським М.Я. [5], що виходили з теоретичних уявлень про розподіл кисню між металом і шлаком. Це свідчить про спільність закономірностей окислення вуглецю при низькому вмісті його у ванні в різних сталеплавильних процесах.

Метою даної роботи є пошук рішень по оптимізації процесу конвертерної плавки з урахуванням залежності швидкості зневуглецювання конвертерної ванни від витрат кисню на продувку.

Виклад основного матеріалу. Окислення вуглецю при продувці киснем зверху відбувається нерівномірно як в обсязі ванни, так і по ходу плавки. Найбільш інтенсивно вуглець окислюється в районі первинної реакційної зони під фурмою (куди кисень надходить в першу чергу), що сприяє, особливо при одноструменевій фурмі, місцевому спучуванню ванни, виплеску і фонтануванню рідких фаз. Середня швидкість окислення вуглецю прямо пропорційна кількості кисню, що подається в конвертер. По ходу плавки швидкість окислення вуглецю сильно змінюється, і максимальна швидкість вигорання вуглецю досягається в середині плавки. На початку продувки, при низьких температурах металу, швидкості окислення вуглецю невеликі. У цей період відбувається окислення Si та Mn і накопичення кисню в шлаку в формі оксидів заліза. При досягненні температури ванни $1350 - 1400$ °C починається інтенсивне зневуглецювання. Зростання швидкості зневуглецювання супроводжується відновленням оксидів заліза з шлаків. В кінці продувки маловуглецевої сталі у міру зменшення вмісту вуглецю в металі (особливо при $[C] < 0,2$ %) швидкість його окислення знижується в зв'язку з кінетичними і термодинамічними особливостями процесу зневуглецювання, і, відповідно, збільшується вміст розчиненого кисню в металі і оксидів заліза в шлаку.

Витрати кисню на окислення одиниці вуглецю в різні періоди процесу коливаються в досить широких межах. Кількість кисню, що витрачається на окислення 0,01 % вуглецю в 1 т сталі, при різних концентраціях вуглецю у ванні приведено в таблиці 1 [1].

Таблиця 1 – Витрати кисню на окислення вуглецю

Вміст вуглецю, %	0,9 – 1,0	0,3 – 0,6	0,1 – 0,25	0,05 – 0,1	< 0,05
Витрати кисню, м ³	0,03 – 0,06	0,04 – 0,06	0,04 – 0,07	0,47	1,25 – 1,8

Теоретична кількість кисню для реакції окислення *C* до *CO* становить: 1,33 кг кисню на 1 кг вуглецю або 0,93 м³ кисню на 1 кг вуглецю. Фактично при вмісті вуглецю нижче 0,2 – 0,1 % витрати кисню на одиницю вуглецю, що окислюється, різко збільшуються, тому що ефективність його використання (на реакцію окислення вуглецю) знижується. Ефективність використання кисню при вмісті вуглецю від 0,4 % і вище становить 100 %, а при його вмісті 0,025 % тільки 2 % [3].

Окислення вуглецю, на відміну від інших домішок ванни, можна контролювати, не маючи безпосереднього доступу до конвертера. Продуктами окислення вуглецю є газоподібні оксиди *CO* і *CO₂*, що залишають конвертер і транспортуються потім по системі відведення і очищення. Контроль витрат і складу газів в цій системі дозволяє, хоча і з деяким запізненням, визначити швидкість та інші характеристики реакції зневуглецювання.

Перш ніж перейти до встановлення необхідної кількості вимірювань в димовому тракті, наведемо підстави цього методу контролю. Його ідея полягає в зведенні балансу газів, що надходять в димовий тракт з конвертера і атмосфери.

З конвертера під час продувки виділяються *CO* і *CO₂*, а також незначна кількість інших газів. З навколишньої атмосфери в димовий тракт надходить повітря, частина кисню якого витрачається на допалювання *CO* і *CO₂*, що виділяються з конвертера. Зробимо наступні припущення:

- 1) повітря складається тільки з кисню та азоту в об'ємному співвідношенні 21:79;
- 2) кисень повітря витрачається тільки на допалювання *CO* до *CO₂*;
- 3) з конвертера вільний кисень не виділяється.

Згідно реакції між киснем і окисом вуглецю на допалювання кожного кубометра *CO* потрібно 0,5 м³ кисню. Отже, баланси газів *CO* та *CO₂*, що виділяються з конвертера, можна записати в такий спосіб [6]:

$$v_{CO} = v_{o.z.} \frac{CO_{o.z.}}{100} + 2 \left(0,21v_g - v_{o.z.} \frac{O_{2o.z.}}{100} \right), \quad (1)$$

$$v_{CO_2} = v_{o.z.} \frac{CO_{2o.z.}}{100} - 2 \left(0,21v_g - v_{o.z.} \frac{O_{2o.z.}}{100} \right). \quad (2)$$

У цих балансових рівняннях використані такі позначення:

$v_{o.z.}$ – витрати газів, що відходять, приведені до нормальних умов, м³/хв;

v_{CO} – витрати окису вуглецю, що виділяється з конвертера, приведені до нормальних умов, м³/хв;

v_{CO_2} – витрати вуглекислого газу, приведені до нормальних умов, м³/хв;

v_g – витрати повітря, що підсмоктується в димовий тракт, приведені до нормальних умов, м³/хв;

$CO_{o.z.}$ – вміст *CO* у відхідних газах, %;

$CO_{2o.z.}$ – вміст *CO₂* у відхідних газах, %;

Інформаційні технології

$O_{o.z.}$ – вміст O_2 в газах, %.

Комбінуючи рівняння (1) і (2), отримаємо

$$v_{CO} + v_{CO_2} = \frac{CO_{o.z.} + CO_{2o.z.}}{100}. \quad (3)$$

З іншого боку, оскільки при спалюванні 1 кг-атома вуглецю утворюється 22,4 м³ CO або CO_2 , або їх суміші, швидкість окислення вуглецю може бути виражена через витрати конвертерних газів як

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{12}{22,4} (v_{CO} + v_{CO_2}), \quad (4)$$

де $\frac{dC}{d\tau}$ – швидкість окислення вуглецю в конвертері, кг/хв.

Таким чином, знаючи витрати газів, що відходять, і концентрацію в них CO і CO_2 , можна знайти швидкість окислення вуглецю в конвертері за формулою:

$$\frac{dC}{d\tau} = 0,00536 v_{o.z.} (CO_{o.z.} + CO_{2o.z.}). \quad (5)$$

Інтегруючи вираз (5) за часом продувки, отримаємо кількість вуглецю, який покинув ванну до моменту часу τ :

$$\Delta C = 0,00536 \int_0^{\tau} v_{o.z.} (CO_{o.z.} + CO_{2o.z.}) d\tau. \quad (6)$$

Якщо масу металу на початку продувки позначити через G_0 і в момент τ через G_τ , а вміст вуглецю відповідно через C_0 і C_τ , то

$$\Delta C = \frac{G_0 C_0 - G_\tau C_\tau}{100} \quad (7)$$

і

$$\Delta C = \frac{1}{G_\tau} [G_0 C_0 - 0,536 \int_0^{\tau} v_{o.z.} (CO_{o.z.} + CO_{2o.z.}) d\tau]. \quad (8)$$

Отже, при прийнятих припущеннях для оцінки поточного вмісту вуглецю у ванні необхідно знати:

- 1) вміст вуглецю в шихті;
- 2) кількість металеві шихти;
- 3) концентрації CO і CO_2 в відведених газах;
- 4) витрати газів, що відходять;
- 5) поточну масу металеві ванни.

Природно, що в разі повного допалювання CO в димовому тракті до CO_2 (а така ситуація спостерігається в більшості діючих конвертерів) не вимагається вимірювання концентрації CO , і всі рівняння спрощуються шляхом виключення членів, які містять CO .

Експериментальними і теоретичними дослідженнями показано існування двох різних ділянок на кінетичній кривій окислення вуглецю при взаємодії металевого розплаву з газоподібним окислювачем. При високих концентраціях вуглецю швидкість його окислення залежить виключно від інтенсивності подачі кисню в зону реакції. Після досягнення певної концентрації вуглецю, названої «критичною», швидкість його окислення різко зменшується. Це відбувається внаслідок того, що при низьких концентраціях вуглецю дифузія його в зону реакції стає лімітуючою ланкою процесу. Отже, для цієї частини кінетичної кривої справедливий вираз [1]:

Інформаційні технології

$$-\frac{d[C]}{d\tau} = \alpha([C] - [C]_n), \quad (9)$$

де α – коефіцієнт пропорційності, що враховує розміри поверхні реагування та швидкість масопереносу вуглецю в залізі;

$[C]$ – концентрація вуглецю в обсязі металевої фази;

$[C]_n$ – концентрація вуглецю на поверхні реагування.

Вважаючи, що при малих вмістах вуглецю в обсязі концентрація його в поверхневому шарі досить низька, отримана простіша форма рівняння:

$$-\frac{d[C]}{d\tau} = \alpha[C]. \quad (10)$$

Зменшення швидкості окислення вуглецю в останній стадії продувки в конвертері добре відоме на практиці. Воно чітко виявлено в узагальнених даних [1]. Якщо ці дані не показують безпосередньо існування критичної концентрації вуглецю, то це пояснюється лише тим, що швидкість окислення вуглецю визначалася розрахунком за результатами аналізу проб, відібраних під час повалок конвертера. У цьому випадку швидкість зневуглецювання виявляється усередненою в інтервалі між двома повалками. До того ж використання даних багатьох плавок неминує згладжує узагальнену криву. Якщо ж звернутися до безперервних записів швидкості зневуглецювання окремих плавок, що стало можливим з розвитком методів аналізу газів, що відходять, то в більшості випадків на них фіксується перелом в області низьких концентрацій вуглецю.

Нехтування концентрацією вуглецю на поверхні реагування все ж погіршує адекватність математичного опису. Тому доцільно уточнити роль величини $[C]_n$ у цій залежності. Залучення відомостей про поверхневі властивості вуглецю в розчині заліза не може дати відповіді на це питання. Перш за все наявні в літературі дані досить суперечливі. Велика їх частина свідчить про слабку поверхневу активність вуглецю. Дослідження показують складний характер впливу вуглецю на поверхневі властивості рідкої сталі. У найцікавішому в даному випадку інтервалі концентрацій вуглецю 0 – 0,4 % спостерігається спочатку зниження (до 0,15 % C), а потім зростання поверхневого натягу зі збільшенням вмісту вуглецю.

Знижена, в порівнянні з об'ємною, концентрація вуглецю на поверхні реагування є наслідком не тільки і не стільки адсорбційних явищ, скільки самого факту витрачання вуглецю на цій поверхні. Більш плідний підхід полягає в прийнятті допущення про рівновагу вуглецю з його окисом в реакційній зоні. Такий висновок впливає з застосування принципів термодинаміки незворотних процесів [1]. Маючи дані про вміст кисню (або закису заліза) і температури в зоні реакції, рівноважну концентрацію вуглецю неважко обчислити по відомим співвідношенням.

Відомості про характер залежності швидкості окислення вуглецю від його концентрації (особливо в інтервалі низьких концентрацій) можна отримати і без модельних уявлень, використовуючи баланс кисню і деякі емпіричні залежності. Складемо баланс кисню в інтервалі плавки між двома досить низькими концентраціями вуглецю, допустивши, що кисень витрачається тільки на окислення вуглецю і заліза, а також накопичується в металевій ванні [6]. Тоді

$$I_{O_2} \tau = 9,33 \cdot 1,15([C]' - [C]') + 7,00([O]'' - [O]') + 2,00 \cdot 0,87(\Delta Fe'' - \Delta Fe'), \quad (11)$$

де I_{O_2} – інтенсивність подачі кисню, м³/хв на 1 т сталі;

τ – тривалість інтервалу, хв;

$[C]'$, $[C]''$ – концентрації вуглецю у ванні на початку і кінці інтервалу відповідно, %;

$[O]'$, $[O]''$ – концентрації кисню в ванні на початку і кінці інтервалу відповідно, %;

$\Delta Fe'$, $\Delta Fe''$ – кількість окисленого заліза на початку і кінці інтервалу відповідно, % від маси чавуну.

Коефіцієнтом 1,15 врахований прийнятий постійним і рівним 15 % ступінь допалювання CO до CO_2 ; коефіцієнт 0,87 дає можливість переходу від розмірності «% від маси чавуну» до розмірності «% від маси сталі».

У диференціальній формі рівняння (11) запишеться як

$$I_{O_2} \tau = -10,7d[C] + 7,00d[O] + 1,74d\Delta Fe. \quad (12)$$

Згідно з даними балансових плавок [2], кількість заліза, що виноситься з конвертера у вигляді дисперсного пилу, становить приблизно 1,5 % від маси чавуну, тому:

$$\Delta Fe = \frac{0,095}{C_{cm}} + 1,75 \quad (\text{при } C_{cm} < 0,20). \quad (13)$$

Диференціюючи емпіричне рівняння для ΔFe (13), отримаємо:

$$d\Delta Fe = -\frac{0,095}{[C]^2} d[C]. \quad (14)$$

Зв'язок між концентраціями вуглецю і кисню в конвертерній ванні отриманий шляхом обробки експериментальних даних. Результати обробки характеризуються наступним рівнянням:

$$d[O] = -\frac{0,0030}{[C]^2} d[C]. \quad (15)$$

Підставляючи величини (14) і (15) в рівняння (12) і вирішуючи його щодо швидкості окислення вуглецю, отримаємо [7]:

$$-\frac{d[C]}{d\tau} = \frac{I_{O_2}}{10,7 + \frac{0,186}{[C]^2}}. \quad (16)$$

Вираз (15) показує, що зв'язок швидкості окислення вуглецю з його концентрацією може бути прийнятий лінійним тільки при концентрації вуглецю нижче 0,15 – 0,20 %. Але він може бути застосований і для якісного опису процесу зневуглецювання і при більш високих концентраціях вуглецю, якщо не брати до уваги можливість окислення інших домішок (кремнію, марганцю, фосфору), і якщо єдиним джерелом постачання кисню є дуття. В цьому випадку у міру збільшення концентрації вуглецю роль другого члена в знаменнику

стає досить малою і швидкість зневуглецювання прагне до величини $\frac{I_{O_2}}{10,7} = 0,0934I_{O_2}$,

близької до стехіометричного співвідношення між кількостями вуглецю, що окислюється, і введеного кисню.

На підставі описаних аналітичних залежностей розроблена програмна модель процесу зневуглецювання конвертерної ванни для системи автоматичного керування витратами кисню на продувку. В алгоритмі роботи програми враховується критична точка швидкості вигорання вуглецю в кисневому конвертері. Поки концентрація вуглецю в сталі більше 0,4 % програма веде розрахунок за балансовим методом, як тільки концентрація вуглецю падає нижче цієї критичної точки, всі розрахунки проводяться відповідно до виразу (16). Аналіз результатів обчислень показав відповідність експериментальним даним в допустимих межах критеріїв оцінки точності моделювання.

ВИСНОВКИ

Виконано аналіз методів визначення залишкового вмісту вуглецю в сталі в процесі конвертерної плавки.

На підставі розглянутих аналітичних методів непрямой оцінки реалізована програмна модель прогнозування процесу зневуглицювання з розрахунком часу продувки та інших технологічних параметрів.

Перелік використаних джерел:

1. Кудрин, В. А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов / В. А. Кудрин. – М.: Мир, 2003. – 528 с.
2. Куприянов, А. А. Плотность и структурные изменения железа и сплавов железа с углеродом / А. А. Куприянов, С. И. Филиппов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1968. – № 9.
3. Филиппов, С. И. Теория критических концентраций / С. И. Филиппов // Физико-химические основы процессов производства стали. – М.: Наука, 1979. – С. 79–87.
4. Баптизманский, В. И. Проблемы технологии и теории современной конвертерной плавки / В. И. Баптизманский // Сталь. – 1989. – № 9. – С. 18–23.
5. Меджибожский, М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов / М. Я. Меджибожский. – Киев: Вища школа, 1979. – 280 с.
6. Охотский, В. Б. Модели металлургических систем / В. Б. Охотский. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 287 с.
7. Богушевский, В. С. Математическая модель управления дутьевым режимом конвертерной плавки / В. С. Богушевский, В. Ю. Сухенко, Е. А. Сергеева // Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 2011. – № 8. – С. 24–25.

Щербаков С.В., Черевко Е.А., Якименко А.І., Ефимов С.А.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ

Кислородный конвертер является одним из наиболее важных металлургических объектов автоматизации. Усовершенствование его управления необходимо для получения стали с заданными температурой и составом при максимальной экономичности плавки. Однако задача полной автоматизации процесса является крайне сложной и требует знания закономерностей влияния на технологический процесс множества факторов: физико-химических, газо-гидродинамических и других, до настоящего времени недостаточно исследованных.

Физико-химическую основу производства стали в конвертере составляют процессы окисления примесей чугуна, и в первую очередь окисление углерода. Несмотря на большой объем исследований, посвященных проблеме окисления углерода металла, значительное количество вопросов в данной области остается мало изученным. Известная научная теория о том, что обезуглероживание при низком содержании углерода контролируется преимущественно его массопереносом, до конца не объясняет всех особенностей процесса. В связи с этим возникла задача проведения дополнительных научных исследований динамики окисления углерода, особенно при его низкой концентрации.

В работе рассмотрены методики, описывающие процесс обезуглероживания конвертерной стали. Построена модель расчета скорости обезуглероживания и динамики содержания углерода в ванне конвертера во время продувки. Установлено, что

разработанная динамическая модель окисления углерода адекватна процессам, протекающим в ванне конвертера. Модель позволяет непрерывно по ходу продувки осуществлять контроль и регулирование наиболее важных параметров металла при помощи управления кислородной фурмой, определять скорости обезуглероживания, изменения температуры и окисления железа ванны, а также степень дожигания CO в CO₂ в полости конвертера.

Ключевые слова: кислородный конвертер, продувка, отходящие газы, обезуглероживание, косвенные методы, балансовые уравнения, эксперимент, компьютерное моделирование.

Shcherbakov S.V., Cherevko E.A., Yakimenko A.I., Efimov S.A.

MATHEMATICAL MODELING OF CONVERTER SMELTING TAKING INTO ACCOUNT DYNAMICS OF THE DECARBURIZATION PROCESS

The oxygen converter is one of the most important metallurgical objects of automation. Improvement of its control is necessary to obtain steel with a given temperature and composition at maximum efficiency of the heat. However, the task of fully automating the process is extremely complex and requires knowledge of the laws governing the influence of many factors on the technological process: physicochemical, gas–hydrodynamic, and others that have not been sufficiently studied to date.

The physicochemical basis of steel production in the converter is formed by the processes of oxidation of pig iron impurities, and primarily carbon oxidation. Despite the large amount of research devoted to the problem of metal carbon oxidation, a significant number of questions in this area remain little studied. The well–known scientific theory that decarburization at a low carbon content is controlled mainly by its mass transfer does not fully explain all the features of the process. In this regard, the problem arose of conducting additional scientific studies of the dynamics of carbon oxidation, especially at its low concentration.

The work describes the techniques that describe the decarburization process of converter steel. A model for calculating the decarburization rate and the dynamics of the carbon content in the converter bath during purging was built. It has been established that the developed dynamic model of carbon oxidation is adequate to the processes occurring in the converter bath. The model allows continuous monitoring and regulation of the most important parameters of the metal by means of controlling an oxygen lance, determining the rates of decarburization, changes in temperature and oxidation of iron in the bath, as well as the degree of afterburning of CO in CO₂ in the converter cavity.

Keywords: oxygen converter, purge, exhaust gases, decarburization, indirect methods, balance equations, experiment, computer simulation

Рецензент: канд. техн. наук, доц. В.П. Кравченко

Стаття надійшла