УДК 004.942 : 004.023
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-4

Тімур ЖЕЛДАК
кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, zheldak.t.a@nmu.one
***ORCID:** 0000-0002-4728-5889*
***Scopus Author ID:** 55602208300*

Ілля ЗІБОРОВ
аспірант кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, ziborov.il.k@nmu.one
***ORCID:** 0000-0002-3118-387X*

Бібліографічний опис статті: Желдак, Т., Зібров, І. (2022). Самонавчання підсистеми оператора конвертера в процесі рафінації сталі в складі СППР керування металургійним виробництвом. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 32–40. doi: https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-4

САМОНАВЧАННЯ ПІДСИСТЕМИ ОПЕРАТОРА КОНВЕРТЕРА В ПРОЦЕСІ РАФІНАЦІЇ СТАЛІ В СКЛАДІ СППР КЕРУВАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИМ ВИРОБНИЦТВОМ

Інформаційна система підтримки прийняття рішень, яка в реальному режимі часу може забезпечувати операторів конвертерного цеху металургійного підприємства рекомендаціями щодо ведення технологічного процесу, може значно допомогти знизити виробничі витрати і підвищити рентабельність виробництва. Актуальною вбачається розробка такої інформаційної системи на основі самонавчання – з використанням досвіду попередніх вдалих плавок.

***Метою роботи** є розробка алгоритму навчання підсистеми керування плавкою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у контурі управління кисневим конвертером. Дана підсистема автоматизує дії оператора, оптимізує процес за економічним критерієм, а також зменшує вплив на результат людського фактору, що призводить до покращення економічних показників виробництва.*

***Методологія** забезпечення рішення полягає у формуванні рекомендацій підсистеми оператора конвертера на основі вибору і усереднення кращих з прецедентів з пам'яті, найближчих за нормалізованою метрикою. Остання включає як бажані характеристики готової сталі, так і контрольовані збурення, до яких віднесені початкові умови ведення плавки. Вектори збурень і керованих змінних розділені на ті, що визначають відстань до прецедентів, і ті що є критеріями оптимальності рішення.*

***Наукова новизна** отриманих у роботі результатів полягає в запропонованому алгоритмі самонавчання, який на відміну від відомих раніше підходів використовує не всю сукупність навчальних прикладів з бази даних попередніх плавок, а лише «найкращі» за зведеним зовнішнім критерієм серед обмеженої підмножини найближчих до поточної плавки за нормалізованою метрикою умов ведення плавки. Запропоновані вигляд зовнішнього критерію та метрика порівняння плавок у нормалізованому просторі.*

***Висновки**. Застосування запропонованого алгоритму самонавчання підсистеми оператора конвертера інтегрованої СППР металургійного виробництва дозволяє за умови наявності достатньої кількості прикладів у базі даних попередніх плавок, що охоплюють поточне замовлення, зменшити собівартість виплавленої сталі на 2,5–3,8 %.*

***Ключові слова*:** *металургія, інформаційна система, самонавчання, керування, технологія, оператор, сценарій.*

Timur ZHELDAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the System Analysis and Control Department, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho av., Dnipro, Ukraine, 49005, zheldak.t.a@nmu.one
***ORCID:** 0000-0002-4728-5889*
***Scopus Author ID:** 55602208300*

Illia ZIBOROV
Postgraduate Student at the System Analysis and Control Department, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho av., Dnipro, Ukraine, 49005, ziborov.il.k@nmu.one
***ORCID:** 0000-0002-3118-387X*

To cite this article: Zheldak, T., Ziborov, I. (2022). Samonavchannia pidsystemy operatora konvertera v protsesi rafinatsii stali v skladi SPPR keruvannia metalurhiinym vyrobnytstvom [Self-learning of the converter operator subsystem in the steel smelting process as part of the metallurgical production managing DMSS]. I*nformation Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 32–40. doi: https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-4

SELF-LEARNING OF THE CONVERTER OPERATOR SUBSYSTEM IN THE STEEL SMELTING PROCESS AS PART OF THE METALLURGICAL PRODUCTION MANAGING DMSS

The decision-making support information system, which can provide the BOF operators with recommendations for conducting the technological process in real time at the metallurgical enterprise, can significantly help reduce production costs and increase the profitability. The development of the aforementioned information system, basing on self-learning and using the experience of some previous successful melts is considered to be relevant.

***The purpose of the work** is to develop a learning algorithm for the smelting control subsystem of the intelligent decision-making support system in the BOF control circuit. The subsystem automates the operator's actions, optimizes the process according to an economic criterion, and reduces the influence of the human factor on the result. The last one leads to the improvement of production economic indicators.*

***The methodology** of providing a solution consists of the recommendation formation for the BOF operator subsystem, based on the selection and averaging of the best precedents from memory, which are the closest according to the normalized metric. The metric includes both the desired characteristics of the finished steel and controlled disturbances, particularly the initial conditions of melting. The vectors of disturbances and controlled variables are divided into two groups. The first group is to determine the distance to precedents, and the second one is to form the criterion for the optimality of the solution.*

***The scientific novelty** of the results obtained in the work consists in the proposed self-learning algorithm. The algorithm, in contrast to previously known approaches, does not use the entire set of training examples from the previous melt database, but only the "best" ones according to a consolidated external criterion. Best examples are a limited subset of closest melts in history to the current melt according to a normalized metric condition. The external criterion form and the metric of the melt comparison in the normalized space are proposed.*

***Conclusions**. The application of the proposed self-learning algorithm of the converter operator's subsystem of the integrated metallurgical production DMSS allows reducing the molten steel cost by 2.5–3.8 %. The result is possible if there are a sufficient number of examples in the database of some previous melts, covering the current order.*

***Key words:** metallurgy, information system, self-learning, management, technology, operator, scenario.*

Актуальність проблеми. Понад 70 % світового виробництва сталі припадає на конвертерне виробництво (World Steel Association, 2016). Металевий брухт і гарячий чавун завантажуються в конвертер, а струмінь кисню з надзвуковою швидкістю впорскується зверху фурму на поверхню металевої ванни. Під дією кисню всі решта елементів у металевій ванні окислюються та утворюють менш щільний шар шлаку. Вапно (вапняк) додається для запобігання зносу вогнетривкої футеровки та сприяння утворенню шлаку.

У оператора киснево-конвертерного цеху, що керує процесом продувки, час для прийняття управлінських рішень про збільшення/зменшення інтенсивності продувки, підняття/опускання фурми, закінчення продувки тощо вкрай обмежений. Час продувки в 100-350 тонних конвертерах не перевищує 20–25 хвилин, а тривалість усієї плавки в конвертерах ємністю 100–350 тон (з наступними операціями повалки та розкислення) становить близько 40–50 хвилин (Демидов, 2014; Чернятевич А.Г., 2012). Відповідно оператор працює, спираючись на власний досвід, при цьому кількість можливих помилок в його роботі залежить від фізичного та морального стану оператора, виконання цехом плану виробництва тощо. Найбільш характерними наслідками помилок оператора є отримання параметрів, що виходять за інтервал, необхідний для даної марки сталі, підвищена витрата кисню та присадок, перевищення температури готової сталі. Як наслідок, за статистикою (Чернега, 2006), до 40 % плавок вимагають корекції після завершення процесу.

Процес рафінації сталі в конвертері обмежено автоматизований, його протікання суттєво залежить від знань і досвіду оператора.

Без інформаційної системи, яка може постійно допомагати операторам у прийнятті рішень щодо керування процесом, деякі складні взаємодії між змінними процесу можуть бути пропущені, що зрештою призводить до неоптимальної роботи. Отже, інформаційна система підтримки прийняття рішень, яка в реальному режимі часу може забезпечувати операторів конвертерного цеху рекомендаціями щодо ведення процесу, може значно допомогти знизити виробничі витрати і підвищити рентабельність виробництва. Актуальним вбачається розробка такої інформаційної системи на основі самонавчання – з використанням досвіду попередніх вдалих плавок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно (Богушевський, 2008) головним завданням керування конвертерною плавкою є одержання сталі заданої марки за вмістом вуглецю. За великим рахунком, це завдання зводиться до правильності визначення часу припинення продування. Але подібний «одно-координатний» підхід дуже спрощений, оскільки зазвичай немає прямої інформації про вміст вуглецю у ванні по ходу продування. Швидкість вигоряння вуглецю така, що на заключному етапі продування одна зайва хвилина відповідає переходу до іншої марки сталі (Васильев, 2009). Додатковим фактором, що ускладнює подібний «прямий» розрахунок, є суттєва нелінійна залежність вигоряння вуглецю не тільки від часу продування, а й від температури розплаву (Графов, 2011).

Проведені раніше дослідження (Желдак, 2012) показали, що комплексна задача керування плавкою передбачає отримання в момент закінчення плавки (підняття фурми) не тільки заданого вмісту вуглецю, але і необхідної температури сталі. Забезпечується це як правильним вибором режимів продування, правильним розрахунком кількості охолоджувачів. Останнє особливо актуально при великій інтенсивності продування, коли конвертер працює в режимі з обмеженням на час плавки, адже тоді охолодження частково здійснюється за рахунок присадок руди, брухту та вапняку по ходу продування, а також внаслідок зміни висоти розташування кисневої фурми (Мокринський, 2005).

За останні роки було розроблено кілька динамічних моделей конвертерного виробництва. Зокрема, (Jalkanen, 2006) розробив для оператора конвертерного цеха симулятор CONSIM 5, в якому передбачається, що всі реакції відбуваються в одній зоні, а кисень поділяється відповідно до його спорідненості до певного елемента. Модель враховує шлакоутворення, енергетичний баланс, плавлення та зневуглецювання брухту. Інша динамічна модель процесу, створена (Sarkar, 2015) передбачає, що реакції окислення відбуваються лише в зоні емульсії, між елементами, розчиненими в краплях, і FeO в шлаку. Кисень розподіляється між елементами у верхній частині металевої ванни відповідно до їх концентрації. Модель не включає енергетичний баланс, і припускає, що температура зростає лінійно весь час продувки.

Іншу динамічну модель для конвертерної плавки представили (Lytvynyuk, 2014). Згідно з нею, весь кисень, що подається, використовується для утворення оксиду заліза, а всі інші реакції окислення відбуваються через реакцію з FeO. Швидкість реакцій, що протікають у металевій ванні і в шлаку в першу чергу залежить від кінетики масообміну. Для енергетичного балансу передбачається, що шлакова і металева ванна мають однакову температуру. Дана модель забезпечує точне прогнозування складу шлаку, хімічний склад сталі та температуру в кінці продування.

Також були розроблені декілька динамічних моделей, що базуються переважно на емпіричних взаємозв'язках. Зокрема, (Kattenbelt, 2008) використовують ступінчасті зміни висоти фурми та швидкості подачі кисню при моделюванні основного продування. Проаналізувавши реакцію металевої ванни на ступінчасті зміни висоти фурми, швидкості потоку кисню та додавання охолоджувача (у авторів – залізна руда), автори пропонують відійти від суто хімічного опису процесів, замінивши їх емпіричними зв'язками.

Дуже повна динамічна модель динаміки зневуглецювання в кисневому конвертері розроблена в (Dogan, 2011). Ця динамічна модель враховує окислення вуглецю в двох зонах: як у шлаку, так і зоні продувки. В другому випадку вуглець у металевій ванні безпосередньо реагує з киснем, а в емульсійній зоні вуглець у металевих краплях окислюється FeO в шлаку. Припускається, що температура металевої ванни та шлаку зростає лінійно під час продування. В (Rout, 2018) продовжено дослідження (Dogan, 2011), яке доповнено формулами окислення марганцю, фосфору та кремнію, що дозволяє спрогнозувати склад шлаку в будь-який момент продувки. Також автори наголошують, що модель рафінації сталі має враховувати енергетичний та тепловий баланси в конвертері.

В роботі (Dering, 2021) запропоновано додаток мовою Python, що оснований на динамічній моделі процесу рафінації сталі. Модель використовую гібридний підхід, коли початкові стани описуються системою диференціально-алге-

браїчних рівнянь, а подальші стани розглядаються з певною дискретизацією. Як зазначають автори, запропонований додаток потенційно може допомогти виробникам сталі значно знизити виробничі витрати, одночасно досягаючи цільових показників виробництва та якості.

Мета дослідження: розробка алгоритму навчання підсистеми керування плавкою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у контурі управління кисневим конвертером задля автоматизації дій оператора, оптимізації процесу за економічним критерієм, а також зменшення впливу на результат людського фактору, що в свою чергу призводить до покращення економічних показників виробництва.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети пропонується розділити контрольовані параметри технологічного процесу на статичні та динамічні, а також на керовані та некеровані. До статичних характеристик технологічного процесу конвертерної плавки слід зарахувати величини, які підсистема керування плавкою отримує від підсистеми шихтування плавки (маса і температура шлаку, склад шлаку, масу чавуну, сталевого брухту та вапна (вапняку) тощо). Водночас ключовими координатами, впливаючи на які можна покращити техніко-економічні показники готової продукції, є динамічні характеристики протікання процесу плавки. До останніх слід віднести масу і температуру металу, склад і температуру конвертерних газів, висоту фурми над рівнем ванни і витрату кисню, а також час продувки.

Представимо технологічний процес плавки схематично у вигляді об'єкта управління, як показано на рисунку 1 (Желдак, 2011).

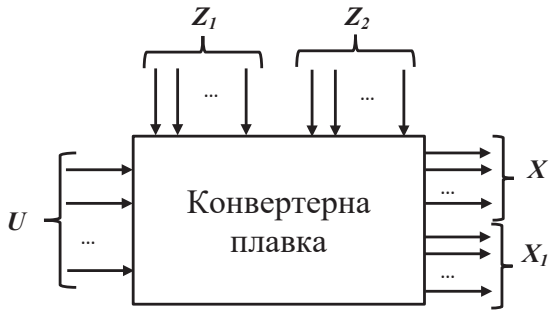

Рис. 1. Конвертерна плавка як об'єкт управління

У даному представленні керуючі величини об'єднані у вектор U. Оператор може керувати під час плавки інтенсивністю подачі кисню, висотою фурми, додавати охолоджуючі речовини (окатиші, вапняк тощо) чи інтенсифікатори. Також до вектору керування входить час продувки.

Збурення, які можна виділити в даному процесі, поділяються на два вектори: Z_1 – контрольовані збурення (вміст у чавуні кремнію, марганцю, сірки, фосфору, температура чавуну, вміст кисню в дутті, інтервал часу між плавками тощо) і Z_2 – неконтрольовані збурення (якість сипких матеріалів, склад, розміри та температура брухту, маса і склад міксерного шлаку, що потрапляє в конвертер і т. д.).

Результатом управління є параметри технологічного циклу, які також пропонується розділити на два вектори: X – технологічні характеристики одержаної сталі (її кількість, хімічний склад і температура на повалці) та X_1 – параметри, що визначають економічні показники технологічного процесу (кількість використаного кисню, час продування, кількості використаних охолоджувачів та присадок).

Від відстані наконечника фурми до рівня ванни залежить ступінь засвоєння кисню ванною, температурний та шлаковий режими плавки. Водночас, як було показано в попередніх розділах, надмірний перегрів ванни, висока основність розплаву та суттєвий викид металу в шлак призводять до значного скорочення терміну роботи футеровки, його зупинки на профілактику, а відтак підвищення собівартості продукції.

Висота фурми, час введення охолоджувачів та їх об'єми, а також інтенсивність подачі кисню є головними динамічними параметрами, управління якими дозволяє вирішити два основні завдання: забезпечити отримання сталі необхідної марки незалежно від випадкових вхідних факторів і разом з тим мінімізувати витрату кисню та присадок у процесі продування, тим самим зменшивши собівартість одержуваної сталі.

Пропонується здійснити це шляхом моделювання поведінки реального оператора з урахуванням результатів його попередніх дій. Для цього в базі даних «Плавки», яка фіксує проведення попередніх плавок, відшукуються всі протоколи, які відповідають поточним початковим умовам шихтування та завданню на вид сталі, що має бути виготовлений. Числові дані на вході описують, крім масових, також хімічні характеристики чавуну та брухту, використаного на плавку, та готової сталі, яка має бути отримана. Формат вхідних даних модулю описує фрагмент розрахункової таблиці на рисунку 2.

Наведені на рис. 2 величини разом з масовими показниками шихтування створюють вектор контрольованих збурень Z, а параметри готової сталі – вектор цільових змінних внаслідок керування X^*.

	C	Si	Mn	S	P	t
Чавун рідкий	4.3	0.8	0.7	0.035	0.05	1290
Чавун в чушках	4.2	0.8	0.7	0.035	0.05	
Брухт чавуну	4.25	0.9	0.65	0.035	0.05	
Брухт (10% Кремнію)	0.2	10	0.5	0.200	0.05	
Брухт сталевий	0.2	0.1	0.5	0.040	0.025	Тпрост
Шихта загалом	4.045	0.765	0.734	0.049	0.051	29

Готова сталь	C	Mn	S	P	t	Маса
	0.18	0.15	0.03	0.009	1630	59

Рис. 2. Вхідні дані підсистеми керування плавкою

В базі даних попередніх плавок відшукуються протоколи, які мають найменшу зважену відстань до поточного Z та $X*$ в просторі координат. Критерій близькості D вираховується за нормованою метрикою

$$D=\alpha\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{z_i-z_i^0}{z_i^0}\right)^2+\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{x_j^*-x_j^{*0}}{x_j^{*0}}\right)^2\to min, \quad (1)$$

де α – ваговий коефіцієнт початкових умов, який врівноважує вектори Z та та $X*$ в просторі координат; n – кількість елементів вектору початкових умов; m – кількість елементів вектору що описує готову сталь; z_i – числове значення $i-$тої координати початкових умов попередньої плавки (зразка), $i=i=\overline{1,n}$; z_i^0 – числове значення $i-$тої координати початкових умов поточної плавки; x_j^* – значення $j-$того параметру готової сталі для плавки-зразка, $j=\overline{1,m}$; x_j^{*0} –значення $j-$того параметру готової сталі для поточної плавки (приймаються граничні згідно ДСТУ).

На практиці до вектора Z слід віднести запаси охолоджуючих речовин основних типів (їх шість), час очікування конвертера після попередньої плавки, зважений хімічний склад шихти (5 складових), температуру чавуну та масу шитування. При цьому різна розмірність координат не має значення, адже вони нормуються через наявність поточної координати в знаменнику.

Коефіцієнт α має приймати значення більше 1, якщо виплавляється традиційна марка сталі, прецедентів виготовлення якої (в тому числі вдалих) в базі даних плавок велика кількість. В цьому випадку друга складова в (1) фактично має перетворюватись на 0, адже нас цікавлять вдалі приклади з пам'яті виплавки саме такої марки сталі, яка задана. Якщо ж виплавляється нова сталь, вдалих випадків виготовлення якої в базі даних плавок мало або вони відсутні, слід приймати $\alpha=0,1..0,25$, аби підтягувалися протоколи плавок, у яких була отримана сталь з максимально близькими параметрами (вектор X^*).

Серед найближчих аналогів обираються ті протоколи попередніх плавок, які мають найменшу нормовану відстань за (1) та найкращі економічні показники – вектор X_1. Кращими вважаються: якомога менша витрата кисню, менше відхилення від планового часу продувки, відсутність додувок, відсутність перевищення кількості охолоджувачів, відсутність порушення умови основності шлаку. Згортка економічних критеріїв має вигляд

$$C=c_1V_{O2}^{'}+c_2t'+c_3N_dt_d+\sum_{k=1}^{p}\left(c_{4k}m_k^{'}\right)+c_5pH^{'}\to min, \quad (2)$$

де c_i – приведена до грошової оцінки вартість додаткових витрат на плавку за $i-$тою причиною, грн, $i=\overline{1,5}$; $V_{O2}^{'}$ – понаднормова витрата кисню, м^3; t' – перевищення запланованого часу продувки, сек; N_d – кількість додувок; t_d – загальний час додувок, сек; m'_k – маса додаткових витрати охолоджувача $k-$того виду, тон, $k=\overline{1,p}$; p – кількість доступних видів охолоджувачів, зазвичай $p=3\ldots6$; $pH^{'}$ – відхилення основності шлаку від заданого значення.

В «ідеального» аналогу з бази даних плавок критерій (2) дорівнює 0.

Як показано в (Богушевський, 2014), відхилення хімічного складу чи температури готової сталі від заданих значень також збільшує собівартість, тому оцінка «кращих» зразків ведення плавок з бази даних виконується за рівноважною згорткою відповідності за нормалізованими відносно математичного очікування значеннями векторів Z, X та X_1:

$$F=c_{st}M_{st}D+C\to min \quad (3)$$

де c_{st} – вартість 1 тони готової сталі, грн; M_{st} – розрахункова маса плавки, тон.

Якщо декілька попередніх плавок мають однакову якість за (3), вони всі беруться до розгляду, інакше за зразок обирається обмежена підмножина найкращих варіантів ведення плавки в минулому, для яких показник за (3) не перевищує заданого порогового рівня. Останній встановлюється емпіричним шляхом

і зменшується з накопиченням в пам'яті великої кількості вдалих прецедентів.

Сценарій поведінки оператора конвертера будується як усереднений за найкращими відібраними зразками з пам'яті вектор вигляду, представленого у таблиці 1.

Якщо в якості зразків обираються сценарії з різною кількістю зміни висоти фурми, зміни рівня подачі кисню та кількості внесень охолоджувачів, приймається сценарій з більшою кількістю моментів за базовий, а у сценарій з меншою кількістю зміни керуючих впливі вносяться рядки, які не містять дій.

Вектори однакової довжини усереднюються з урахуванням вагових коефіцієнтів, зворотно пропорційних відстані сценарію-зразка від початкового стану поточної плавки в просторі станів вектора X

$$t_i^{'} = \sum_{l=1}^{v}\left(\frac{t_{il}}{F_l}\right) / \sum_{l=1}^{v} F_l^{-1}, \qquad (4)$$

$$W_i^{'} = \sum_{l=1}^{v}\left(\frac{W_{il}}{F_l}\right) / \sum_{l=1}^{v} F_l^{-1}, \qquad (5)$$

де t'_i – зважений час виконання $i-$тої дії, сек; W'_i – зважений числовий показник виконання $i-$тої дії у відповідних одиницях виміру; t_{il} –час виконання $i-$тої дії в сценарії $l=\overline{1,v}$, сек; W_{il} – числовий показник виконання $i-$тої дії в сценарії $l=\overline{1,v}$; v – кількість «кращих» сценаріїв, відібраних за (3); F_l – значення зведеного критерію оптимальності $l-$того сценарію.

Послідовність рекомендацій щодо дій оператора виводиться на інтерфейс користувача робочого місця оператора. Як було зазначено, оператор може не дотримуватись порад СППР, а виконувати плавку спираючись на власний досвід і враховуючи неконтрольовані збурення (вектор змінних Z_1). В кожному випадку, протокол ведення плавки і її результати зберігаються в БД «Плавки».

Запропонований підхід був реалізований на одному з підприємств Дніпропетровщини. В якості тестової вибірки були обрані 196 послідовних плавок, виконаних на двох конвертерах протягом шести змін в вересні 2021 року. В ході експериментальної перевірки виплавлялася сталь марок 3пс (84 плавки), 5сп (62 плавки) та ст45 (40 плавок).

В таблиці 2 наведені вимоги до хімічного складу названих марок сталі та цільові значення, що приймалися за бажані в складі вектору X^* у формулі (1). В якості бажаних значень вектору економічних показників плавки приймалися мінімальні спостережені показники серед множини v відібраних для порівняння «найближчих» за початковими даними протоколів. Значення v становило від 4 до 7 сценаріїв-прикладів, при цьому більші значення зустрічаються у випадках повторюваних за (1) та (3) плавок.

Таблиця 1

Приклад вектору, що описує сценарій ведення плавки оператором конвертера

№ елемента	Позначення	Значення	Сенс елемента
U1	t_Σ	800	загальний час продувки – 800 секунд
U2	N_f	8	кількість змін висоти фурми – 8
U3	N_{O2}	5	кількість змін рівня подачі кисню – 6
U4	N_t	6	кількість моментів внесення охолоджувачів – 6
U5	t_{1f}	0	перший час зміни висоти фурми, сек
U6	H_{1f}	4.20	перша висота фурми, м
U7	t_{2f}	120	другий час висоти фурми, сек
U8	H_{2f}	3.50	друга висота фурми, м
…	…	…	…
U17	t_{Nf}	645	останній час зміни висоти фурми, сек
U18	H_{Nf}	1.96	остання висота фурми, м
U19	t_{1O2}	0	перший час зміни подачі кисню, сек
U20	V_{1O2}	1380	перший рівень подачі кисню, м³/хв
U21	t_{2O2}	249	другий час зміни подачі кисню, сек
U22	V_{2O2}	1330	другий рівень подачі кисню, м³/хв
…	…	…	
U27	t_{NO2}	660	останній час зміни подачі кисню, сек
U28	V_{NO2}	1380	останній рівень подачі кисню, м³/хв
U29	T_{Nt1}	69	Час першого введення охолоджувача, сек
U30	V_{Nt1}	10	Об'єм охолоджувача, що вводиться, т
U31	M_{Nt1}	m1	тип охолоджувача, що вводиться (m1 – вапно ГГ)
…	…	…	
U44	T_{Nt1}	730	Час останнього введення охолоджувача, сек
U45	V_{Nt1}	0.1	Об'єм охолоджувача, що вводиться, т
U46	M_{Nt1}	m7	тип охолоджувача, що вводиться (m7 – вугілля)

Таблиця 2

Вимоги до хімічного складу марок сталі, розглянутих в експерименті

Марка сталі	Хімічний склад за ДСТУ																			
	C		S		P		Si		Mn		Ni		Cr		Cu		As		N	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Ст3пс	0,14	0,22	0	0,05	0	0,04	0,05	0,15	0,4	0,65	0	0,3	0	0,3	0	0,3	0	0	0	0
Ст5сп	0,28	0,37	0	0,05	0	0,04	0,15	0,3	0,5	0,8	0	0,3	0	0,3	0	0,3	0	0,08	0	0,01
Ст45	0,42	0,5	0	0,035	0	0,03	0,17	0,37	0,5	0,8	0	0,3	0	0,25	0	0,3	0	0	0	0

Для порівняння результатів застосування розробленої підсистеми оператора конвертерного цеха з попереднім режимом роботи було обрано для порівняння по 100 випадкових плавок для кожної з марок сталі, проведених без використання порад. Результати оцінювались за складовими додаткових витрат у натуральному та грошовому еквіваленті. Порівняння результатів ілюструє таблиця 3, де дані експерименту позначені як «з СППР», а дані щодо ведення аналогічних плавок у минулому – як «без СППР».

Отримані в результаті експериментів результати свідчать про те, що використання підсистеми оператора конвертера, що навчається на найбільш близьких прикладах з бази даних попередніх плавок дозволяє уникнути випадків отримання сталі, яка не відповідає заданій марці за хімічним складом; зменшити відсоток плавок з порушенням основності в середньому на 42 %, плавок з перевищенням температури – на 79 %; зменшити середні витрати охолоджувача на плавку на 6 %, а середню витрату кисню на плавку – на 4 %; зменшити кількість додувок в 2,88 рази, а середній час плавки – на 19 %.

Як наслідок перелічених позитивних явищ, середня собівартість сталі на розглянутих плавках із застосуванням підсистеми оператора конвертера із самонавчанням зменшилась на 2,5 % – для сталі Ст45, а для сталі Ст3пс – на 3,8 %.

Таблиця 3

Порівняння результатів застосування розробленої підсистеми з веденням плавок без порад оператору

Показник	Ст3пс		Ст5сп		Ст45	
	Без СППР	З СППР	Без СППР	З СППР	Без СППР	З СППР
Кількість плавок	100	84	100	62	100	40
Середній час плавки, сек	1321	1081	1299	1055	1381	1060
Кількість додувок, %	14	5,95	19	6,45	21	7,5
Середня витрата охолоджувачів на плавку, тон	6,55	6,98	6,69	5,11	6,31	6,01
Середня витрата кисню на плавку, тис. м^3	210,44	202,20	199,27	191,84	219,99	208,86
Плавок з перевищенням температури, %	22	5,95	27	4,84	23	2,5
Плавок з порушенням основності, %	6	3,57	4	1,62	3	2,5
Порушення хімічного складу готової сталі	4	0	1	0	0	0
Середня собівартість 1 тони сталі, грн*	9114,4	8768,0	9086,3	8831,9	8996,3	8771,4

** – в цінах березня-липня 2021 року.*

Висновки і перспективи подальших досліджень. В роботі запропонований алгоритм навчання підсистеми керування плавкою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у контурі управління кисневим конвертером. Дана підсистема автоматизує дії оператора, оптимізує процес за економічним критерієм, а також зменшує вплив на результат людського фактору, що призводить до покращення економічних показників виробництва. Алгоритм навчання полягає у виборі та усередненні кращих з прецедентів попередніх плавок, найближчих до поточної за нормалізованою метрикою. Остання включає як бажані характеристики готової сталі, так і початкові умови ведення плавки.

Запропонований алгоритм самонавчання на відміну від відомих раніше використовує не всю сукупність навчальних прикладів з бази даних попередніх плавок, а лише «найкращі» за зведеним зовнішнім критерієм серед обмеженої підмножини найближчих до поточної плавки за нормалізованою метрикою умов ведення плавки. Запропоновані вигляд зовнішнього критерію та метрика порівняння плавок у нормалізованому просторі.

Застосування запропонованого алгоритму самонавчання підсистеми оператора конвертера інтегрованої СППР металургійного виробництва дозволяє за умови наявності достатньої кількості попередніх плавок, що охоплюють поточне замовлення, зменшити собівартість виплавленої сталі на 2,5–3,8 %.

ЛІТЕРАТУРА:

1. World Steel Association. Fact Sheet: Steel and Raw Materials. 2016. URL: https://www.worldsteel.org/publications/fact-sheets.html (accessed on 27/03/2019).

2. Демидов В.А. Производство конвертерной стали. Технологическая инструкция. ТИ-233-СТ. КК-02-2014. Днепропетровск: ПАО «Евраз – ДМЗ им. Петровского», 2014. 95 с.

3. Чернятевич А. Г. Выплавка конвертерной стали. Технологическая инструкция. ТИ-230-С320-12. Днепродзержинск: ПАО «Днепровский металлургический комбинат им. Дзержинского», 2012. – 53 с.

4. Чернега, Д.Ф. Основы металлургического производства металлов и сплавов / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевский, Ю.Я. Готвянский и др. Под ред. Д.Ф. Чернеги, Ю.Я. Готвянского. К:.Висшая школа., 2006 503 с.

5. Богушевський В.С. Виробництво низькосірчанистих марок сталі в конвертерах / В.С. Богушевський, Л.О. Бредун // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: Збірник праць «Фізико-хімічні основи технології металів». К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”. 2008. с. 84–91.

6. Васильев Д.Б. Исследование эффективности замены стального лома железорудными брикетами при выплавке / Д.Б. Васильев, С.В. Куберский, В.М. Кравченко. Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2009. Вып. 28. С. 269–275.

7. Графов А. В. Металлоемкость продукции металлургического производства и оценка эффективности инновационных технологий переработки лома и отходов черных металлов: Монография. Воронеж: Изд-во «Наука–Юнипресс». 2011. 306 с.

8. Желдак Т.А. Математична модель матеріально-теплового балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко. Інформаційні технології в освіті, науці й техніці (ІТОНТ-2012): матеріали міжнар. наук.-практ. конф.: Черкаси, 25-27 квітня 2012 р. Черкаси: ЧДТУ, 2012. т.1. С. 23–24.

9. Мокринский А.В Гидродинамические режимы взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной / А.В. Мокринский, Е.В. Протопов, А.Г. Чернятевич. К: Черная металлургия. 2005. №4. С. 11–17

10. Jalkanen, H. Experiences in physicochemical modelling of oxygen converter process (BOF). Adv. Process. Met. Mater. 2006, 2, 541–554.

11. Kattenbelt, C., Roffel, B. Dynamic Modeling of the Main Blow in Basic Oxygen Steelmaking Using Measured Step Responses. Metall Mater Trans B 39, 764–769 (2008). https://doi.org/10.1007/s11663-008-9184-0

12. Dogan, N.; Brooks, G.A.; Rhamdhani, M.A. Comprehensive model of oxygen steelmaking part 1: Model development and validation. ISIJ Int. 2011, 51, 1086–1092. https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1086

13. Lytvynyuk, Y.; Schenk, J.; Hiebler, M.; Sormann, A. Thermodynamic and Kinetic Model of the Converter Steelmaking Process. Part 1: The Description of the BOF Model. Steel Res. Int. 2014, 85, 537–543. https://doi.org/10.1002/srin.201300272

14. Sarkar, R., Gupta, P., Basu, S. et al. Dynamic Modeling of LD Converter Steelmaking: Reaction Modeling Using Gibbs' Free Energy Minimization. Metall Mater Trans B 46, 961–976 (2015). https://doi.org/10.1007/s11663-014-0245-2

15. Rout, B.K., Brooks, G., Rhamdhani, M.A. et al. Dynamic Model of Basic Oxygen Steelmaking Process Based on Multi-zone Reaction Kinetics: Model Derivation and Validation. Metall Mater Trans B 49, 537–557 (2018). https://doi.org/10.1007/s11663-017-1166-7

16. Dering D. A dynamic optimization framework for basic oxygen furnace operation / D. Dering, C. Swartz, N. Dogan // Chemical Engineering Science, Volume 241, 2021, 116653, https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116653 .

17. Желдак Т.А. Подходы к построению интеллектуальной системы, управляющей кислородным конвертером / Т.А. Желдак, Д.А. Воловенко. *Науковий* вісник Національного гірничого університету. 2011. № 5. С. 133–136.

18. Богушевський В.С. Керування киснево-конвертерною плавкою в замкненому режимі / В.С. Богушевський, С.В. Жук, Є.К. Бондаренко, О.О.Капусняк. *Наукові* вісті НТУУ «КПІ». 2014. № 5. С. 76–83.

19. Бойко В.С. Оптимизация раскисления стали с использованием данных об активности растворенного кислорода / В.С. Бойко, М.Н. Якин, С.А. Коваль, А.В. Стефанец, И.Н. Фентисов, А.А. Годынский, Е.А. Чичкарев // Металл и литье Украины. 2012. № 2–3. С. 12–15.

REFERENCES:

1. World Steel Association (2016). Fact Sheet: Steel and Raw Materials. URL: https://www.worldsteel.org/publications/fact-sheets.html (accessed on 27.03.2019).

2. Demidov V.A. (2014) Proyzvodstvo konverternoi staly. Tekhnolohycheskaia ynstruktsyia. [BOF converter steel production. Technological instruction] TU-233-ST. KK-02-2014. Dnepropetrovsk: PAO «Evraz – DMZ». – 95p. [in Russian]

3. Cherniatevich A.H. (2012). Vyplavka konverternoi staly. Tekhnolohycheskaia ynstruktsyia. [BOF converter steel melting. Technological instruction] TU-230-S320-12. Dneprodzerzhynsk: PAO «Dneprovskyi metallurhycheskyi kombynat im. Dzerzhynskoho». – 53 p. [in Russian]

4. Cherneha, D.F. (2006). Osnovy metallurhicheskoho proizvodstva metallov i splavov [Fundamentals of metallurgical production of metals and alloys] / D.F. Cherneha, V.S. Bohushevskyi, Y.I. Hotvianskyi. – K:.Vysshaia shkola. – 503p. [in Russian]

5. Bohushevskyi V.S. (2008) Vyrobnytstvo nyzkosirchanystykh marok stali v konverterakh [Production of low-sulphur steel grades in converters] / V.S. Bohushevskyi, L.O. Bredun // Spetsialna metalurhiia: vchora, sohodni, zavtra: Zbirnyk prats. – K.: Vydavnytstvo «Politekhnika». – 84–91. [in Ukrainian]

6. Vasylev D.B. (2009) Issledovaniie effektivnosti zameny stalnoho loma zhelezorudnymi briketami pri vyplavke [Study of the efficiency of replacing steel scrap with iron ore briquettes during smelting] / D.B. Vasylev, S.V. Kuberskyi, V.M. Kravchenko // Sbornik nauchnykh trudov Donbasskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho universiteta. – V. 28. – P. 269–275. [in Russian]

7. Hrafov A. V. (2011). Metalloemkost produktsii metallurhicheskoho proizvodstva i otsenka effektivnosti innovatsionnykh tekhnolohij pererabotki loma i otkhodov chernykh metallov: Monograph [Metal consumption of products of metallurgical production and evaluation of the effectiveness of innovative technologies for processing scrap and waste of ferrous metals]. – Voronezh: «Nauka–Iunypress». – 306 p. [in Russian]

8. Zheldak T.A. (2012). Matematychna model materialno-teplovoho balansu plavky v kysnevomu konverteri ta kryterii yii optymizatsii [Mathematical model of material-heat balance of melting in an oxygen converter and criterion for its optimization] / T.A. Zheldak, D.O. Volovenko // Informatsiini tekhnolohii v osviti, nautsi y tekhnitsi (ITONT-2012): – Cherkasy: ChDTU. – V.1. – P. 23–24. [in Ukrainian]

9. Mokrynskyi A.V. (2005). Hidrodinamicheskiie rezhimy vzaimodejstviia kislorodnykh strui s konverternoj vannoj [Hydrodynamic modes of interaction between oxygen jets and a converter bath] / A.V. Mokrynskyi, E.V. Protopov, A.H. Cherniatevych – K: Chernaia metallurhyia. – 2005. №4. – S. 11–17 [in Russian]

10. Jalkanen, H. (2006). Experiences in physicochemical modelling of oxygen converter process (BOF). Adv. Process. Met. Mater. V.2, 541–554.

11. Kattenbelt, C. (2008). Dynamic Modeling of the Main Blow in Basic Oxygen Steelmaking Using Measured Step Responses / C. Kattenbelt, B. Roffel // Metall Mater Trans B 39, 764–769 https://doi.org/10.1007/s11663-008-9184-0

12. Dogan, N. (2011). Comprehensive model of oxygen steelmaking part 1: Model development and validation / N. Dogan; G.A. Brooks; M.A. Rhamdhani // ISIJ Int. 2011, 51, 1086–1092. https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1086

13. Lytvynyuk, Y. (2014). Thermodynamic and Kinetic Model of the Converter Steelmaking Process. Part 1: The Description of the BOF Model. Steel Res. / Y. Lytvynyuk; J. Schenk; M. Hiebler; A. Sormann // Int. 2014, 85, 537–543. https://doi.org/10.1002/srin.201300272

14. Sarkar, R. (2015). Dynamic Modeling of LD Converter Steelmaking: Reaction Modeling Using Gibbs Free Energy Minimization. / R. Sarkar, P. Gupta, S. Basu et al. // Metall Mater Trans B 46, 961–976 https://doi.org/10.1007/s11663-014-0245-2

15. Rout, B.K. (2018) Brooks, G., Rhamdhani, M.A. et al. Dynamic Model of Basic Oxygen Steelmaking Process Based on Multi-zone Reaction Kinetics: Model Derivation and Validation. / Rout, B.K., Brooks, G., Rhamdhani, M.A. et al. // Metall Mater Trans B 49, 537–557. https://doi.org/10.1007/s11663-017-1166-7

16. Dering D. (2021) A dynamic optimization framework for basic oxygen furnace operation / D. Dering, C. Swartz, N. Dogan // Chemical Engineering Science, Volume 241, 2021, 116653, https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116653 .

17. Zheldak T.A. (2011) Podkhody k postroieniiu intellektualnoj sistemy, upravliaiushchei kislorodnym konverterom [Approaches to building an intelligent system that controls an oxygen converter] / T.A. Zheldak, D.A. Volovenko // Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. V.5 – P. 133–136. [in Russian]

18. Bohushevskyi V.S. (2014) Keruvannia kysnevo-konverternoiu plavkoiu v zamknenomu rezhymi [Control of oxygen-converter melting in closed mode] / V.S. Bohushevskyi, S.V. Zhuk, Ye.K. Bondarenko, O.O.Kapusniak // Naukovi visti NTUU «KPI». – V.5. – P. 76–83. [in Ukrainian]

19. Boiko V.S. Optimizatsiia raskisleniia stali s ispolzovaniiem dannykh ob aktivnosti rastvorennoho kisloroda [Optimization of steel deoxidation using data on the activity of dissolved oxygen] / V.S. Boiko, M.N. Yakyn, S.A. Koval et al // Metall i litie Ukrainy. V.2–3. – P. 12–15. [in Russian]