

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 681.51.007.57:669.184

**В.В. Слесарєв, д-р техн. наук, проф.,**  
**Т.А. Желдак, канд. техн. наук, доц.**

Державний вищий навчальний заклад „Національний  
гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна,  
e-mail: slesarevv@nmu.org.ua

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МАТЕРІАЛЬНО-ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ПЛАВКИ В КИСНЕВОМУ КОНВЕРТЕРІ ТА КРИТЕРІЙ ЇЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

**V.V. Sliesariiev, Dr. Sci. (Tech.), Professor,**  
**T.A. Zheldak, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor**

State Higher Educational Institution “National Mining University”,  
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: slesarevv@nmu.org.ua

## MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL AND MATERIAL BALANCE OF MELTING IN OXYGEN CONVERTER AND CRITERIA FOR ITS OPTIMIZATION

**Мета.** Обґрунтувати вигляд критерію оптимізації собівартості сталі на етапі її виплавки, враховуючи додаткові витрати на встановлення теплового та матеріального балансу.

**Методика.** Використовуючи відомі залежності, що описують фізико-хімічні процеси у ванні конвертера в ході продувки розпеченого металу киснем та наступного розкислення у ковші, були отримані рівняння матеріального та теплового балансу. Оскільки невиконання кожного з видів балансу має негативні наслідки, що порушують технологічний процес, запропоновано ввести до зведеного економічного критерію мінімізації собівартості готової сталі складові рівнянь балансу. З математичної точки зору задача оптимізації складу шихти є нелінійною з нечіткими обмеженнями. Для її розв’язання необхідно обрати метод, що враховував би зазначені особливості. Також необхідно забезпечити використання запропонованої моделі оператором конвертерного цеху на робочому місці.

**Результати.** Отримано зведений критерій оптимізації шихтування плавки в кисневому конвертері з використанням теплового та матеріального балансу, що має економічний характер. Сформульовано оптимізаційну задачу й показано, що вона має суттєву нелінійність, а обмеження – високий ступінь невизначеності. Розроблено прототип програмного забезпечення, що реалізує математичну модель та метод оптимізації.

**Наукова новизна.** Уперше запропоновано зведений критерій оптимізації шихтування плавки в кисневому конвертері на основі теплового та матеріального балансу плавки, що має економічний характер і включає критерій балансу. Показано, що порушення теплового балансу має несиметричний вплив на собівартість сталі.

**Практична значимість.** Розроблено прототип програмного забезпечення мовою програмування VBA, що дозволяє оператору конвертера виконувати шихтування з мінімальною собівартістю готової сталі. Програма включає в себе інтерфейси вводу даних про поточну плавку, базу даних залишків матеріалів, розрахунковий модуль та інтерфейс системи підтримки прийняття рішень. Можливе зниження собівартості виготовлення вуглецевих сталей при використанні програми – від 1 до 3%.

**Ключові слова:** *конвертер, сталь, плавка, шихта, оптимізація, критерій, баланс, програма*

**Загальна постановка проблеми.** Низьковуглецева сталь, що виготовляється в кисневому конвертері, має відповідати певним вимогам до хімічного складу та температури. Головними вимогами щодо хімічного складу є відсотковий вміст вуглецю, сірки, фосфору, марганцю та інших легуючих елементів, якщо вони необхідні для даної марки сталі. Температура ж має бути в межах від 1600 до 1650 °С. Вищі значення призведуть

до руйнування виливниць, в які розливається сталь, ніжчі – до неповноти хімічних реакцій і, як наслідок, неоднорідності кристалічного складу зливку металу.

Жорсткі вимоги до температури на виході з конвертера змушують застосовувати у процесі конвертерної плавки охолоджувачі, адже, у разі переплавлення на сталь чистого чавуну (подається рідким із температурою 1300–1450°C), на виході температура розплаву сягала б значень 1850–1900°C. Тобто, кількість тепла, що вноситься чавуном і виділяється у

процесі окислення (фактично-горіння) домішок заліза у процесі плавки значно перевищує необхідну кількість тепла для отримання сталевого розчину.

Охолоджувачами можуть бути залізна руда, вапно, вапняк, доломіт, плавиковий шпат, залізовмісні брикети, металобрухт та скрап. Кожен з матеріалів забирає на себе частину тепла: охолоджені металеві частини – на нагрівання та плавлення, допоміжні матеріали – на окислення та шлакоутворення.

Актуальність оптимізації складу шихти, а саме відсоткового відношення чавуну, металобрухту, іншого скрапу, вапна, руди та інших матеріалів, обумовлена високим ступенем конкуренції на ринку металопродукції. При цьому недостатньо зробити шихту мінімальної собівартості, важливо також врахувати досягнення теплового та матеріального балансу плавки, адже їх порушення може призвести до суттєвих додаткових втрат на охолодження чи підігрів готової сталі, на додаткове розкислення та вирівнювання рівню вуглецю. За підрахунками фахівців ПАТ „ЄВРАЗ – ДМЗ ім. Петровського“ (м. Дніпропетровськ), додаткові витрати від перелічених факторів становлять від 1 до 3% собівартості розливої сталі.

**Аналіз публікацій.** За доволі короткий термін (2–5 хвилин) після зливу попередньої плавки з конвертера у ківш, оператор конвертерного виробництва має сформуванати шихтову суміш для виконання наступної плавки [1]. Вихідними даними, якими володіє оператор при прийнятті рішень, є:

- марка сталі, що буде виготовлятися, а саме верхні та нижні межі вмісту в розплаві вуглецю, марганцю, сірки, фосфору, легуючих елементів;
- бажана температура сталі під час виливання з конвертера у ківш;
- хімічний склад (вуглець, кремній, сірка, фосфор, марганець), температура чавуну та ступінь його зашлакованості;
- наявність охолоджувачів (брухт, вапно, залізовмісні брикети, плавиковий шпат, окатиші, вапняк, доломіт), їх хімічні параметри та ціна;
- наявність розкислювачів (силікомарганець, феросиліцій, феромарганець, алюміній), їх ціна та хімічний склад.

Основою розрахунку шихти, крім вимог до марки сталі, є так зване рівняння теплового балансу [2], що має вигляд

$$\sum_{i=1}^n Q_i^{in} - \sum_{j=1}^m Q_j^{out} \rightarrow 0, \quad (1)$$

де  $\sum_{i=1}^n Q_i^{in}$  – сума тепла, що надходить до конвертера від усіх джерел  $i = 1 \dots n$ ;  $\sum_{j=1}^m Q_j^{out}$  – сума тепла, що витрачається у  $j = 1 \dots m$  процесі.

Традиційно [2] розглядають п'ять основних джерел тепла у ванні конвертера

$$\sum Q^{in} = Q_{чав} + Q_{м.шлак} + Q_{дом} + Q_{зал} + Q_{шл-утв}, \quad (2)$$

де  $Q_{чав}$  – тепло від окислення чавуну, пропорційне його масі та початковій температурі;  $Q_{м.шлак}$  – тепло від окислення міксерного шлаку, пропорційне температурі, масі чавуну та ступеню зашлакованості;  $Q_{дом}$  – тепло від окислення неметалевих домішок шихти, що нелінійно залежить від хімічних параметрів готової сталі, чавуну й охолоджувачів;  $Q_{зал}$  – тепло від окислення заліза, що переходить у шлак і пил – нелінійно залежить від ступеня окислення та маси шлаку;  $Q_{шл-утв}$  – тепло від шлакоутворення.

На практиці кількість шлаку в чавуні не перевищує 1%, тому теплотою, що вносить ця складова, можна знехтувати.

Водночас уся енергія, що утворюється в конвертері, витрачається наступним чином

$$\sum Q^{out} = Q_{ст} + Q_{пил} + Q_{шл} + Q_{газ} + Q_{дис} + Q_{вкв} + Q_{втр}, \quad (3)$$

де  $Q_{ст}$  – тепло, що залишається в готовій сталі, пропорційне її масі та температурі розливки;  $Q_{пил}$  – тепло, що уноситься пилом, пропорційне середній температурі плавки та ступеню випаровування заліза;  $Q_{шл}$  – тепло, що залишається в шлаку, пропорційне його масі та температурі розливки;  $Q_{газ}$  – тепло, що виноситься із продуктами згорання, пропорційне середній температурі плавки та сумі об'ємів газів, що відходять;  $Q_{дис}$  – тепло дисоціації сполук заліза та вапна – нелінійна функція мас скрапу та ступенів забруднення;  $Q_{вкв}$  – тепло, що уноситься з викидами металу, корольками металу в шлаку й виплесками – нелінійна функція початкового хімічного складу та ступеню забруднення скрапу;  $Q_{втр}$  – тепло, що передається фурмі, футеровці й корпусу конвертера – пропорційне сумі вхідного тепла.

Звичайно, крім теплового балансу, у конвертері зберігається матеріальний баланс

$$\sum_{k=1}^p M_k^{in} - \sum_{l=1}^q M_l^{out} \rightarrow 0, \quad (4)$$

де  $\sum_{k=1}^p M_k^{in}$  – сума мас усіх речовин  $k = 1 \dots p$ , що потрапляють до конвертера під час плавки;  $\sum_{l=1}^q M_l^{out}$  –

сума мас усіх речовин  $l = 1 \dots q$ , що утворюються у процесі плавки.

У реальних процесах конвертерної плавки фіксованою величиною є вихід природного металу  $M_{st}^{out} = const$ , що має дорівнювати наперед заданій величині. Це обумовлено тим, що готова сталь розливається у виливниці заздалегідь відомими порціями. Міркування щодо розподілу металу у виливниці розглянуто в попередніх роботах, зокрема [3].

Кількість решти речовин, що утворюються у процесі виготовлення сталі, потенційно не лімітується, визначаючись початковими умовами плавки та речовинами, що були витрачені.

Складові матеріального балансу плавки наведені в таблиці Коефіцієнти  $a, b$  та  $c$  визначають відсотковий вміст, відповідно, шлаку, бруду та окалини.

Таблиця

Складові матеріального балансу плавки

Складові шихти		Складові витрат матеріалів	
Чавун рідкий	$M_{чав}$	Рідкий метал	$M_{ст}$
Скрап металевий	$M_{скр}$	Шлак	$M_{шл}$
Міксерний шлак	$a \cdot M_{чав} / 100$	Конвертерні гази (чадний, вуглекислий, азот, кисень)	$M_{газ}$
Забруднення скрапу	$b \cdot M_{скр} / 100$		
Окалина скрапу	$c \cdot M_{скр} / 100$	Втрати заліза під час продувки	$M_{втр}$
Плавииковий шпат	$M_{п.ш.}$		
Вапно	$M_{вап}$		
Випалювання футерівки	$M_{ф}$		
Дуття	$M_{дуття}$		

Виробнича практика на підприємстві, що розглядалося, а саме ПАТ „ЄВРАЗ–ДМЗ ім. Петровського“ передбачає корекцію плавки [1]. Корежуючі операції виконуються, якщо різниця між приходом і витратою тепла перевищує 0,5–0,8%, що відповідає відхиленню фізичної температури сталі від заданої на 10–15°C.

Найчастіше корекція полягає у введенні додаткового металевго скрапу (брухт, окатиші, залізвмісні брикети) для охолодження надмірно перегрітої сталі. Однак бувають і протилежні випадки, коли необхідно здійснювати додувку з метою підвищення температури або ж вводити вугілля для компенсації надмірно випаленого вуглецю [4].

Будь-яка корекція затягує процес плавки, призводить до збільшення експлуатаційних витрат і, як наслідок, – собівартості розливої сталі.

**Метою даної роботи** є обґрунтування вигляду критерію оптимізації собівартості сталі на етапі її виплавки, враховуючи додаткові витрати на встановлення теплового та матеріального балансу.

**Основний матеріал.** Витрати матеріалів, що використовуються під час плавки у кисневому конвертері, мають бути раціоналізовані з точки зору економічного критерію наступного вигляду

$$J_1 : \sum_{k=1}^n (C_k M_k^{in}) \rightarrow \min, \quad (5)$$

де  $C_k$  – вартість одиниці маси (зазвичай, у гривнях за тону) кожного із матеріалів, що входять до шихти.

Оскільки порушення в ході ведення плавки умов (1) або (4) призводить до додаткових витрат часу й матеріалів, було запропоновано ввести додаткові

критерії, що відповідають виконанню умов теплового балансу ( $J_2$ ) та матеріального балансу ( $J_3$ ).

Оскільки порушення теплового та матеріального балансу в підсумку мають негативний вплив на собівартість продукції, пропонується для оптимізації шихтування плавки використовувати зведений економічний критерій мінімуму собівартості. Він має полягати в одночасному досягненні екстремумів цільових функцій (1), (4) та (5), тобто в одночасному досягненні мінімуму собівартості матеріалів, теплового балансу та матеріального балансу. Викладене можна записати наступним чином

$$J = J_1 \cap \alpha J_2 \cap \beta J_3, \quad (6)$$

де  $\alpha$  та  $\beta$  – коефіцієнти, що враховують чутливість глобального критерію до порушення відповідного теплового та матеріального балансу й приводять фізичні показники до економічної форми.

Коефіцієнт  $\alpha$  означає грошові втрати від перегріву чи навпаки надмірного охолодження готової сталі. Водночас коефіцієнт  $\beta$  показує негативний вплив порушення матеріального балансу в грошовому вираженні.

Змінними, що використовуються в ході оптимізації, є маса тих чи інших речовин, які оператор конвертера може використати у плавці. Коефіцієнтами – хімічні властивості матеріалів та вартості, що входять до (6).

Приклад таблиці початкових даних наведений на рис. 1, де у верхній частині наведені показники металевих складових, а у нижній – охолоджуючих та шлакоутворюючих матеріалів.

Матеріал	Наличне, т	Ціна, грн/т	C	Si	Mn	S	P
M чуг	2200	4000	4.3	0.8	0.7	0.035	0.05
M бой чугуна	500	3700	4.3	0.8	0.7	0.035	0.05
M чуцького чугуна	4500	4200	4	0.9	1.3	0.055	0.08
M лом (19%Кре)	300	2900	0.2	1.1	0.5	0.200	0.05
M лом ст	700	3200	0.2	0.1	0.5	0.040	0.025
M скрап чугун	1500	1600	4.3	0.8	0.7	0.035	0.05
M скрап сталеной	8000	1700	0.2	0.1	0.5	0.040	0.025
M жб	50	900					

Матеріали	SiO2	CaO	FeO	Fe2O3	MgO	Fe общ
ЖСБ	7	7	30	45.3	1	55.3
Руда жел.						
Окалина	9.5	0.6	1.4	87	0.8	62.5
Известь	2	87	-	-	1	-
Известняк	1.5	49	-	-	5	-
Брикеты ШРО					75	
Скрап чуцький	20	20				61
Скрап сталеной	15	20				65
Шлакометаллическа	20	20	1	85		60
Пл. шпат	7	6				
Доломит	12	35			19	

Рис. 1. Таблиця вихідних даних для розрахунку шихти

Слід звернути увагу, що далеко не завжди той чи інший матеріал присутній на складі підприємства у довільній кількості, тому потрібно запропонувати алгоритм оптимізації, що має враховувати взаємозамінність матеріалів.

Обмеженнями в даній оптимізаційній задачі є рівняння фізико-хімічних перетворень, зокрема, вирази для складових теплового балансу за (2) і (3), що мають суттєво нелінійний характер. Крім того, деякі з обмежень мають нечіткий характер, як, наприклад, уже згадана температура виходу сталі з конвертера, що має знаходитися в межах від 1600 до 1650 °C.

Нечіткими, частіше за все, є й деякі коефіцієнти, що використовуються в розрахунку обмежень і цільової функції, а саме температури та хімічного складу чавуну, залитого в міксер перед подачею до конвертеру, а також доступні хімічні та механічні параметри брухту, скрапу, вапняку та руди (якщо остання використовується). Природа невизначеності, у даному випадку, наступна.

Чавун потрапляє в міксер об'ємом 140 т. не безперервно, а порціями по 30 т. У кожній з порцій хімічний склад контролюється окремо, при цьому рівень шлаку не оцінюють. Останній контролюється візуально при завантаженні чавуну в конвертер. Оскільки хімічного аналізу брухту, особливо зовнішнього походження, не виконується, а руда, вапняк та інші сипучі матеріали можуть мати суттєво різний склад у різних мірах об'єму, їх параметри також оцінюються візуально.

У розрахунковій моделі, для спрощення, були прийняті усереднені значення параметрів, що мають невизначеність у сенсі їх математичного очікування. Але слід розуміти, що параметри, зокрема, металевго скрапу, можуть суттєво відрізнятися для кожної плавки.

Поставлена задача оптимізації матеріально-теплого балансу конвертерної плавки за зведеним економічним критерієм має ознаки багатокритеріальної задачі з нечіткими обмеженнями. Загальна кількість керованих змінних – 11; кількість лінійних і нелінійних обмежень – 47, серед яких 22 – двосторонні. Наприклад, для температури готової сталі (градуси Цельсія)

$$1600 \leq t_{cm} \leq 1650 \quad (7)$$

та маси металевго скрапу, що завантажується в конвертер, (т.)

$$5,9 \leq M_{скр} \leq 14,75. \quad (8)$$

Для вирішення такої задачі пропонується використовувати еволюційний оптимізаційний алгоритм з використанням комунікативних агентів.

Запропонований метод дозволяє отримати рішення за прийнятний час (у межах 10–20 секунд), що знаходиться достатньо близько від глобального оптимуму. Крива зміни цільової функції за формулою (6), протягом 275 ітерацій алгоритму, наведена на рис. 2.

Математичну модель оптимізації шихти (1, 4–6), запропоновану вище, а також згаданий метод оптимізації було реалізовано у вигляді програми-прототипу мовою VBA на робочому місці оператора конвертерного цеху. Програма включає в себе інтерфейси вводу даних про поточну плавку, базу даних залишків матеріалів, розрахунковий модуль та інтерфейс системи підтримки прийняття рішень.

Результатом роботи програми є таблиця, в якій визначено масу основних складових шихти на початок плавки, яку слід завантажувати в конвертер для виготовлення заданої кількості сталі заданої марки за описаних раніше умов. Приклад відповіді, яку надає розроблена програма-прототип, наведений на рис. 3.

У ході дослідження впливу окремих складових зведеного критерію (6) на загальне значення цільової функції (собівартість плавки) було з'ясовано, що порушення матеріального, а тим паче теплового балансу несимет-

рично впливає на собівартість готової сталі. Більш того, вплив умови (3) при переході до економічних оцінок може мати нелінійний і навіть розривний характер, пов'язаний з недоливом чи переливом злитків [3].

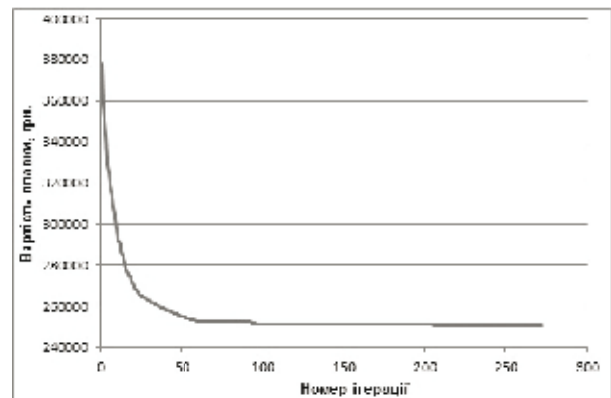


Рис. 2. Зміна цільової функції оптимізації складу шихти

Без плавки 59-заважка 67(±0,2т)		67,01		
Матеріал	т	кг/т	кг/100кг	
М чуг	53,17	504,1	50,11	
М лом	13,19	177,0	17,70	
М бой чугуна	0,88	10,0	1,00	
М чушкового чугуна	0,00	0,0	0,00	
М лома (10% Кра)	1,17	19,9	1,99	
М лома ст	8,79	147,8	14,78	
М скрап чугуна	0,78	13,3	1,33	
М скрап сталейной	1,48	24,1	2,41	
М Шлакометаллическая часть	0,27	4,1	0,41	
М жаб	0,08	1,1	1,10	
М нав. охл	0	0	0,00	
М нав. зав	4,61	78,0	7,80	
М нав. сум	4,61	78,0	7,80	
М нав-к				
М мго	0,005	5,2	0,52	
М пы	0,1	1,7	0,17	
Допомит		0,0	0,00	
Получено стали без учета раскислителей, т		56,38	56,38	

Рис. 3. Приклад результатів робочої програми

Перспективною бачиться задача дослідження  $\alpha$  та  $\beta$ , що входять у формулу (6), як функцій величини порушення балансу.

Слід відзначити, що наведена задача вирішувалася в дійсному просторі – з постановки й рішення видно, що оператор може завантажити до конвертера довільну кількість кожного з матеріалів. У реальній ситуації це справедливо по відношенню до чавуну й вапна. Водночас металевий скрап набирається в ковші дискретними порціями. Вага й вміст кожного відомі до початку плавки. Отже перспективою даного дослідження є перехід від безперервної постановки задачі до дискретної.

У подальшому розглянуто задачу та алгоритм її рішення планується використовувати як складову загальнозаводської інтегрованої системи керування виробництвом, що буде змінювати виробничі завдання в залежності від матеріалів та зміни їх ринкової вартості.

Таким чином планується підтримувати собівартість на мінімальному рівні незалежно від коливань цін на матеріали, властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими.

**Висновки.** У роботі вперше запропоновано зведений критерій оптимізації шихтування плавки в кисневому конвертері на основі теплового та матеріального балансу плавки, що має економічний характер і включає критерій балансу. Показано, що порушення тепло-

вого балансу по різному впливає на собівартість сталі, у залежності від знаку порушення балансу.

Практична цінність отриманих результатів полягає в розробці прототипу програмного комплексу, що дозволяє оператору конвертера виконувати шихтування з мінімальною собівартістю готової сталі. Програма включає в себе інтерфейси вводу даних про поточну плавку, базу даних залишків матеріалів, розрахунковий модуль та інтерфейс системи підтримки прийняття рішень. Можливе зниження собівартості виготовлення вуглецевих сталей при використанні програми – від 1 до 3%.

### Список літератури / References

1. Демидов В.А. Производство конвертерной стали [Технологическая инструкция] ТИ-233-СТ КК-02-2002 / В.А. Демидов – Днепропетровск: ДМЗ – 2002. – 148 с.  
Demidov, V.A. (2002), *Proizvodstvo konvertvernoy stali: technologicheskaya instruksyya* ТИ-233-СТ КК-02-2002 [Converter Steel Production: Technological Manual] ТИ-233-СТ КК-02-2002, DMZ, Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Баптизмандский В.И. Тепловая работа кислородных конвертеров [Текст] / Баптизмандский В.И., Бойченко Б.М., Черевко В.П. – М.: Металлургия, 1998. – 416 с.  
Baptizmanskiy V.I., Boychenko, B.M., and Cherevko, V.P. (1998), *Teplovaya rabota kislородnykh konvertorov* [The Oxygen Converters Thermal Operating], Metallurgy, Moscow, Russia.
3. Гаранжа Д.М. Факторний аналіз впливу технологічних параметрів процесу гарячої прокатки на довжину розкату і побудова прогнозуючої моделі [Текст] / Гаранжа Д.М., Желдак Т.А., Краєв М.В. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – №1 – С. 44–49.  
Garanzha, D.M., Zheldak, T.A. and Kraiev, M.V. (2011), “Factorial analysis of influence of technological parameters of hot rolling process on the roll length and predictive model construction”, *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, no.1, pp. 44–49.
4. Богусhevский В.С. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой / В.С. Богусhevский, Л.Ф. Литвинов – К.: НПК „Киевский институт автоматики“, 1998. – 304 с.  
Bogushevskiy, V.S. and Litvinov, L.F. (1998), *Matematicheskiye modeli i sistemy upravleniya konvertvernoy plavkoy* [Mathematical Models and Converter Melting Control Systems], NPK Kievskiy Institut Avtomatiki, Kiev, Ukraine.

**Цель.** Обосновать вид критерия оптимизации себестоимости стали на этапе ее выплавки, учитывая дополнительные затраты на поддержание теплового и материального баланса.

**Методика.** Используя известные зависимости, описывающие физико-химические процессы в ванне конвертера в ходе продувки раскаленного металла кислородом и последующего раскисления в ковше, были получены уравнения материального и теплового баланса. Поскольку нарушение каждого из видов баланса имеет негативные последствия, ухудшающие технологический процесс, предложено ввести в сводный экономический критерий минимизации себестоимости готовой стали со-

ставляющие уравнений баланса. С математической точки зрения задача оптимизации состава шихты является нелинейной с нечеткими ограничениями. Для ее решения необходимо выбрать метод, который учитывал бы указанные особенности. Также необходимо обеспечить использование предложенной модели оператором конвертерного цеха на рабочем месте.

**Результаты.** Получен сводный критерий оптимизации шихтовки плавки в кислородном конвертере с использованием теплового и материального баланса, носящий экономический характер. Сформулирована оптимизационная задача и показано, что она существенно нелинейна, а ограничения имеют высокую степень неопределенности. Разработан прототип программного обеспечения, реализующего математическую модель и метод оптимизации.

**Научная новизна.** Впервые предложен сводный критерий оптимизации шихтовки плавки в кислородном конвертере на основе теплового и материального баланса плавки, носящий экономический характер и включающий уравнения баланса. Показано, что нарушение теплового баланса имеет несимметричное влияние на себестоимость стали.

**Практическая значимость.** Разработан прототип программного обеспечения на языке программирования VBA, что позволяет оператору конвертера выполнять шихтовки с минимальной себестоимостью готовой стали. Программа включает в себя интерфейс ввода данных о текущей плавке, базу данных остатков материалов, расчетный модуль и интерфейс системы поддержки принятия решений. Возможное снижение себестоимости изготовления углеродистых сталей при использовании программы – от 1 до 3%.

**Ключевые слова:** конвертер, сталь, плавка, шихта, оптимизация, критерий, баланс, программа

**Purpose.** To substantiate the type of steel prime cost optimization criterion at the melting phase, including the additional costs associated with maintenance of heat and material balance.

**Methodology.** The equations of material and heat balance were obtained by means of use of certain relations describing the physical and chemical processes in the converter tub during the blowing out hot metal with oxygen and subsequent deoxidization in the ladle. We propose to add the balance equation components into the consolidated economic cost minimization criterion for finished steel prime cost, since the violation of each balance type has negative consequences worsening the process. The problem of composition optimization of the metal blend is not linear with fuzzy constraints from the mathematical point of view. It is necessary to find a method that includes the mentioned features to solve this problem. Also it is necessary to assure using of suggested model by the operator of converter department at workplace.

**Findings.** The consolidated optimization criterion of melt blending in the oxygen converter using heat and material balance has been obtained and it is principally economic. An optimization problem has been formulated and we have shown that it's substantially non-linear, and the constraints have a high degree of uncertainty. Soft-

ware prototype that implements the mathematical model and the optimization method has been developed.

**Originality.** The consolidated optimization criterion of melt blending in oxygen converter on the basis of heat and material melting balance, which is principally economic and includes balance equations, has been proposed for the first time. We have shown that the violation of the heat balance has an asymmetrical impact on the prime cost of steel.

**Practical value.** Software prototype in the programming language VBA has been developed, which allows converter operator to perform blending with minimum cost

of finished steel. The program includes data entry interfaces on the current melting, residual material database, calculation module and support system of decision-making interface. Possible reduce of the prime cost of carbon steel production using the program is from 1 to 3%.

**Keywords:** *converter, steel, melting, blend, optimization, criterion, balance, program*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук  
В.В. Ткачовим. Дата надходження рукопису 11.07.12.*

УДК 621.926:534.16

**Е.В. Кочура, д-р техн. наук, проф.,  
Фарис Самир Расми Альхури**

Государственное высшее учебное заведение  
“Национальный горный университет”, г. Днепропетровск,  
Украина, e-mail: kochurae@gmail.com

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКРЫТИЯ РУДЫ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ПОЗИЦИЙ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

**Ye.V. Kochura, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
Faris Samir Rasmi Alhuri**

State Higher Educational Institution “National Mining University”,  
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: kochurae@gmail.com

## MODELING OF ORE RELEASE IN A BALL MILL FROM A PERSPECTIVE OF CONTROL

**Цель.** Разработка принципов автоматизации шаровых мельниц, работающих последовательно с магнитными сепараторами.

**Методика.** Теоретические исследования процесса раскрытия руды и экспериментальная проверка полученных теоретических зависимостей индукции магнитного поля сепаратора от крупности помола руды в мельнице.

**Результаты.** Предложена математическая модель технологического комплекса, состоящего из шаровой мельницы, последовательно соединенной с магнитным сепаратором. Рассмотрено математическое описание процесса раскрытия железной руды измельчением и моделирование изменения напряженности магнитного поля сепаратора в рабочей зоне под воздействием слоя измельченного магнитного продукта. В результате исследования полученной модели с позиций задач управления установлено, что в технологическом комплексе второй стадии измельчения магнитной сепарации железных руд барабанный магнитный сепаратор является естественным автоматическим анализатором степени раскрытия железной руды измельчением в шаровой мельнице, последовательно соединенной с этим сепаратором. Массовая доля железа в концентрате магнитного сепаратора, обогащающего продукт измельчения железной руды в шаровой мельнице, является мерой раскрытия руды измельчением и обратно пропорциональна крупности частиц твердой фазы пульпы в разгрузке шаровой мельницы. Это, в отличие от зависимости массовой доли железа от крупности частиц твердой фазы пульпы в сливе классифицирующего аппарата, позволяет непосредственно управлять раскрытием руды измельчением путем изменения скорости движения руды в мельнице регулированием расхода воды в мельницу.

**Научная новизна.** В технологическом комплексе магнитного обогащения железных руд, состоящего из шаровой мельницы с центральной разгрузкой, последовательно соединенной с барабанным магнитным сепаратором, массовая доля железа в концентрате магнитного сепаратора и радиальная составляющая напряженности магнитного поля в рабочей зоне сепаратора обратно пропорциональны степени раскрытия и крупности помола руды в шаровой мельнице. Это позволяет, в отличие от автоматического контроля крупности частиц твердой фазы пульпы в разгрузке шаровой мельницы, автоматически контролировать по величине радиальной составляющей напряженности магнитного поля необходимую крупность помола руды в мельнице, которая обеспечивает раскрытие руды с переменными физико-механическими свойствами.

**Практическая значимость.** В качестве управляющего воздействия раскрытия железной руды во второй стадии измельчения магнитной сепарации можно использовать регулирование плотности пульпы в разгрузчике шаровой мельницы по величине радиальной составляющей напряженности магнитного поля в рабочей зоне магнитного сепаратора, последовательно соединенного с шаровой мельницей.

**Ключевые слова:** *шаровая мельница, магнитный сепаратор, автоматический контроль, железная руда*

**Введение.** Шаровые мельницы, последовательно соединенные с барабанными магнитными сепараторами, работают во вторых стадиях обогащения же-

лезных руд магнитообогатительных фабрик. В большинстве работ по автоматизации процессов измельчения основное внимание уделяется автоматизации шаровых мельниц, работающих в первых стадиях измельчения в замкнутом цикле со спиральными