

УДК 669.162.21.045.2:51.001.57

- О. Л. Чайка**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-1678-2580  
**Б. В. Корнілов**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-5544-3023  
**В. В. Лебідь**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-3938-3785  
**А. О. Москалина**, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-9552-2853  
**Є. І. Шумельчик**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5350-6425  
**М. Г. Джигота**, провідний інж., ORCID 0000-0003-3062-5127

*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## **РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МАТЕРІАЛЬНОГО ТА ТЕПЛООВОГО БАЛАНСІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ В СКЛАДІ АСУ ТП ПРАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ»**

**Анотація.** В статі наведено опис інформаційної системи розрахунку математичних моделей матеріального та теплового балансів доменної плавки, яка базується на розроблених в Інституті чорної металургії НАН України математичних моделях. Розрахунок матеріального балансу ведеться за «системою обліку» В. П. Іжевського. Для розрахунку теплового балансу використовується теплоенергетична модель І. Д. Семікіна, яка для використання в доменному виробництві була розвинута О. В. Бородуліним. Інформаційна система дозволяє розрахувати баланс в автоматичному режимі (збір даних з АСУ ТП та розрахунок матеріального, теплового балансів за обраний період) та в ручному (розрахунок прогнозних періодів для визначення резервів підвищення енергоефективності доменної плавки). Виконана адаптація моделей шляхом розрахунку матеріального та теплового балансів доменної плавки та визначення нев'язок. Для адаптації моделей, встановлених в АСУ ТП доменного цеху ПрАТ «МК «Азовсталь», виконано помісячні розрахунки матеріального та теплового балансів доменних печей. Визначено нев'язки загальних матеріальних балансів печей (різниця між сумарним приходом матеріалів у піч та продуктами плавки) та по компонентам (залізо, вуглець та ін.). Встановлено, що при використанні розрахункової величини виходу колошникового пилу на всіх доменних печах ПрАТ «МК «Азовсталь» величина нев'язки між приходом та витратою матеріалів лежить у довірливому діапазоні похибки (<1,5 %). З використанням результатів розрахунку теплових балансів виконано співставлення нев'язок доменних печей (співвідношення розрахункових показників до фактичних). Математичні моделі балансів були реалізовані в складі АСУ ТП доменного цеху ПрАТ «МК «Азовсталь» та використовувалась для оцінки відхилень від норм виробництва, витрати коксу та умовного палива, а також прогнозу можливості поліпшення техніко-економічних показників плавки.

**Ключові слова:** доменна піч, продуктивність, витрати коксу, математичні моделі, матеріальний баланс, тепловий баланс

**Посилання для цитування:** Реалізація математичних моделей матеріального та теплового балансів доменної плавки в складі АСУ ТП ПРАТ «МК «Азовсталь» /

О. Л. Чайка, Б. В. Корнілов, В. В. Лебідь, А. О. Москалина, Є. І. Шумельчик, М. Г. Джигота // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 82-94. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-82-94.

**Вступ.** Застосування балансових моделей у доменному виробництві дозволяє визначити резерви підвищення енергоефективності доменної плавки та оцінити вплив зміни технологічних параметрів роботи печі на її техніко-економічні показники. Контроль матеріальних та теплових потоків при виплавці чавуну є важливим завданням з точки зору раціональності обраного режиму та його економічності, оскільки фізико-механічні процеси доменної плавки, хімічні перетворення шихти та взаємодія з навколишнім середовищем відображаються матеріальними та тепловими балансами. Залежно від мети розрахунків фахівці більше уваги приділяють тій чи іншій стороні балансів. Так, для вирішення питань підвищення якості чавуну та вибору шихти велике значення мають покомпонентні матеріальні баланси, і, навпаки, при вирішенні завдань зниження енергії зростає роль теплових балансів [1-3].

**Метою роботи** є розробка математичних моделей матеріального та теплового балансів доменної плавки у складі АСУ ТП, що дозволяє оцінювати та вибирати шляхи поліпшення показників плавки (виявлення резервів зменшення витрати коксу та умовного палива, пошук раціонального хімічного складу сировини, що завантажується) у поточних паливно-сировинних умовах.

**Розробка моделей.** Розробка інформаційної системи заснована на розроблених в ІЧМ НАНУ математичних моделях матеріального та теплового балансів доменної плавки [4]. Фізико-механічні процеси доменної плавки (газодинаміка, теплообмін), хімічні перетворення шихти та взаємодія з навколишнім середовищем, зрештою, відображаються матеріальними та тепловими балансами. Матеріальний баланс доменної плавки враховує прихід і витрати всіх матеріалів і продуктів доменної плавки. Автори роботи виражають подяку за допомогу в реалізації моделей матеріального та теплового балансів: Д. С. Зотову, С. Е. Карікову, А. В. Голоядову та В. О. Гедікову.

Серед різних підходів до розрахунку матеріальних балансів доменної плавки слід виділити систему обліку В. П. Іжевського [1,5], яка ґрунтується на загальноприйнятому методі в техніці та економіці – «input – output». Розрахунок матеріального балансу ведеться за системою обліку В. П. Іжевського [1,2], яка отримала позитивну оцінку вчених-доменників, наприклад, Н. А. Костильова [6], М. А. Павлова [7] та ін. Переваги розрахунку матеріального балансу за системою В. П. Іжевського полягають у простоті і в тому, що при розрахунках виконується безперервна перевірка результатів, що значно знижує можливість помилки.

Виробництво чавуну із залізородної сировини є енергоємним процесом, на частку якого припадає більше половини витрат теплової енергії, що витрачаються для отримання кінцевої металопродукції на металургійному комбінаті. Аналіз ефективності доменної плавки, як теплотехнічного агрегату виконується на основі складання теплового балансу, що дозволяє проаналізувати теплову роботу печі та зробити конкретні висновки про можливість економії коксу в доменному переділі та досягненні необхідного обсягу виробництва чавуну.

Для розрахунку теплового балансу в роботі використана теплоенергетична модель І. Д. Семікіна [8], яка для доменного виробництва була розвинена А. В. Бородуліним [1, 5, 9]. Основна відмінність балансової теплоенергетичної моделі І. Д. Семікіна від інших моделей полягає в обліку теплових втрат ДП та розрахунку ступеня прямого та непрямого відновлення. Ці найважливіші техніко-економічні показники, що характеризують теплову та відновлювальну роботу доменної печі у багатьох моделях, наприклад, у О. М. Рамма, що задаються як вхідні дані, що в результаті впливає на результат при розрахунку показників доменної плавки [1, 3, 4, 10].

Відповідно до теорії теплообміну Б. І. Китаєва, в доменній печі є дві автономно працюючі зони теплообміну – верхня та нижня, розділені між собою так званою «резервною зоною» з температурою 900-950°C [11]. У сучасних умовах доменної плавки питома витрата коксу визначається розвитком теплообмінних процесів, що протікають саме в нижній зоні печі. Теплоенергетична модель І. Д. Семікіна базується на даному положенні та пов'язує між собою процеси, що відбуваються в нижній зоні печі з піччю в цілому. Теплоенергетичний баланс дозволяє визначати теплоенергетичні показники доменної плавки, прогнозувати на їх основі техніко-економічні показники та резерви зменшення витрати коксу та умовного палива, приймати науково-обґрунтовані рішення щодо покращення показників роботи доменної печі.

На основі зібраних даних роботи доменних печей ПрАТ «МК «Азовсталь» розроблено інформаційну систему розрахунку математичних моделей матеріального та теплового балансів доменної плавки, яке було встановлено в автоматичну систему управління технологічним процесом (АСУ ТП). Інформаційна система дозволяє розрахувати баланси в автоматичному режимі (збір даних із системи АСУ ТП та розрахунку матеріального, теплового балансів за обраний період) та в ручному (розрахунок прогнозних періодів для визначення резервів підвищення енергоефективності доменної плавки).

На рис. 1-4 наведено знімки екранів вкладок вхідних і вихідних даних математичних моделей матеріального та теплового балансів.

**Расчет материального баланса :: ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ 4**

**ИССХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

Вид топлива	Пополнение	Масса топлива	W <sub>в</sub>	W <sub>п</sub>	W <sub>к</sub>	W <sub>а</sub>	W <sub>с</sub>	W <sub>ш</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>д</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>
УГОЛЬКАТ	МФ-050 Л4	510	11,90	84,6	0,79	4,5	0,07	1,0	1,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
АКТОМАТ	Льв. м. коксу	110	11,90	84,6	0,79	4,5	0,07	1,0	1,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ДОНАТ	Донат (ФШС) 120	120	40,29	63,0	2,29	9,8	0,0	0,38	0,32	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Руда	Руд. ДЗЛ-74-Ч	141,3	6,30	52,06	1,76	72,4	0,04	0,25	0,40	38,0	1,30	0,0	0,0	0,0	0,18	0,30			
Доломит	Оксиди 1210 700	700	0,96	66,67	30,20	21,60	1,20	1,20	1,20	2,40	1,20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,50		
Мартен	МКС в Выпль	1,006	80,00	12,21	24,3	0,46	0,54	0,46	0,46	0,20	1,00	0,04	0,00	0,14	0,14	0,30			
Доломит	Львуче СО-102	104	2,30	42,64	5,07	91,00	0,75	0,31	0,30										

**Теплоотдача**

Вид топлива	Пополнение	Масса топлива	W <sub>в</sub>	W <sub>п</sub>	W <sub>к</sub>	W <sub>а</sub>	W <sub>с</sub>	W <sub>ш</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>
МКС	МКС в Выпль	1006	80,00	12,21	24,3	0,46	0,54	0,46	0,46	0,20	1,00	0,04	0,00	0,14	0,14	0,30			
ДОНАТ	Донат	120	40,29	63,0	2,29	9,8	0,0	0,38	0,32	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ГОРЮЧ	Донат	700	0,96	66,67	30,20	21,60	1,20	1,20	1,20	2,40	1,20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ГОРЮЧ	Специальное	1006	12,08	18,40	0,67	0,29	1,38	1,48	46,25	10,56	0,14	0,32	2,13	1,54					

**Параметры смеси**

Вид топлива	Пополнение	Масса топлива	W <sub>в</sub>	W <sub>п</sub>	W <sub>к</sub>	W <sub>а</sub>	W <sub>с</sub>	W <sub>ш</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>
ГОРЮЧ	ГОРЮЧ	1010	100,00	84,72	0,32	6,08	0,00	0,00	0,00	0,58	0,04	0,00	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03		
ГОРЮЧ	ГОРЮЧ	1010	100,00	84,72	0,32	6,08	0,00	0,00	0,00	0,58	0,04	0,00	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03		

**Эксплуатационные параметры**

Вид топлива	Пополнение	Масса топлива	W <sub>в</sub>	W <sub>п</sub>	W <sub>к</sub>	W <sub>а</sub>	W <sub>с</sub>	W <sub>ш</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>
ГОРЮЧ	ГОРЮЧ	1010	100,00	84,72	0,32	6,08	0,00	0,00	0,00	0,58	0,04	0,00	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03		

a)

**Расчет теплового баланса :: ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ 4**

**ПАРАМЕТРЫ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Вид топлива	Пополнение	Масса топлива	W <sub>в</sub>	W <sub>п</sub>	W <sub>к</sub>	W <sub>а</sub>	W <sub>с</sub>	W <sub>ш</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>
УГОЛЬКАТ	МФ-050 Л4	510	11,90	84,6	0,79	4,5	0,07	1,0	1,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
АКТОМАТ	Льв. м. коксу	110	11,90	84,6	0,79	4,5	0,07	1,0	1,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ДОНАТ	Донат (ФШС) 120	120	40,29	63,0	2,29	9,8	0,0	0,38	0,32	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Руда	Руд. ДЗЛ-74-Ч	141,3	6,30	52,06	1,76	72,4	0,04	0,25	0,40	38,0	1,30	0,0	0,0	0,0	0,18	0,30			
Доломит	Оксиди 1210 700	700	0,96	66,67	30,20	21,60	1,20	1,20	1,20	2,40	1,20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,50		
Мартен	МКС в Выпль	1,006	80,00	12,21	24,3	0,46	0,54	0,46	0,46	0,20	1,00	0,04	0,00	0,14	0,14	0,30			
Доломит	Львуче СО-102	104	2,30	42,64	5,07	91,00	0,75	0,31	0,30										

**ПАРАМЕТРЫ ДУТТА**

Параметр	Дополнение	Масса топлива	W <sub>в</sub>	W <sub>п</sub>	W <sub>к</sub>	W <sub>а</sub>	W <sub>с</sub>	W <sub>ш</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>
Теплота дутья	Дутье	920																	
W <sub>г</sub> , %	Дутье	920																	
W <sub>п</sub> , %	Дутье	920																	
W <sub>к</sub> , %	Дутье	920																	
W <sub>а</sub> , %	Дутье	920																	
W <sub>с</sub> , %	Дутье	920																	
W <sub>ш</sub> , %	Дутье	920																	
W <sub>г</sub> , %	Дутье	920																	

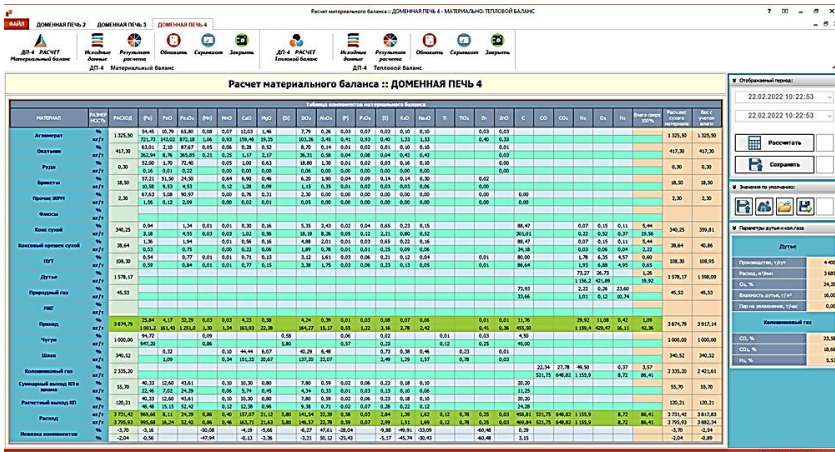
**Параметры смеси**

Вид топлива	Пополнение	Масса топлива	W <sub>в</sub>	W <sub>п</sub>	W <sub>к</sub>	W <sub>а</sub>	W <sub>с</sub>	W <sub>ш</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>	W <sub>г</sub>
ГОРЮЧ	ГОРЮЧ	1010	100,00	84,72	0,32	6,08	0,00	0,00	0,00	0,58	0,04	0,00	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03		
ГОРЮЧ	ГОРЮЧ	1010	100,00	84,72	0,32	6,08	0,00	0,00	0,00	0,58	0,04	0,00	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03		

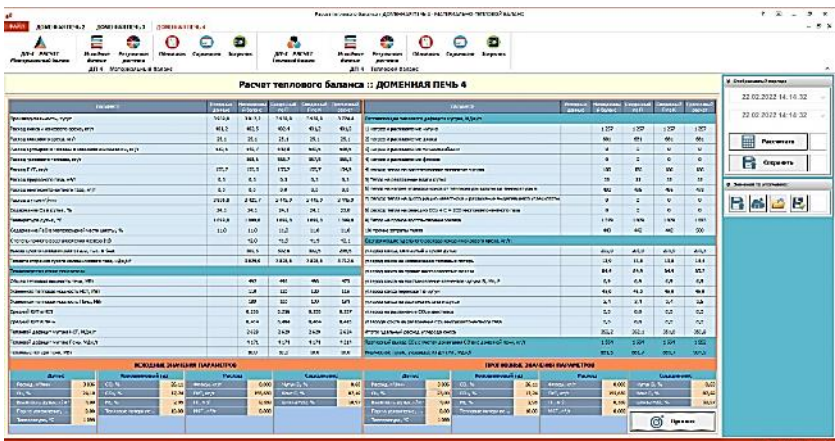
б)

Рисунок 1 – Вкладка для введения входных данных для розрахунку матеріального (а) та теплового (б) балансів.

Вхідними даними матеріального балансу є (рис. 1а) витрата та хімічний склад шихтових матеріалів, палива і паливних добавок, параметри дуття, хімічний склад продуктів плавки (чавуну, шлаку, колошнікового газу). Вихідними даними матеріального балансу є загальний та покомпонентний баланси доменної плавки (рис. 2а, 3).



а)



б)

Рисунок 2 – Вкладка для виведення результатів розрахунків матеріального (а) та теплового (б) балансів.

До вхідних даних теплового балансу за теплоенергетичною моделлю І. Д. Семікіна, як і для матеріального балансу, є витрата та хімічний склад шихтових матеріалів, палива та паливних добавок та параметри дуття і продуктів плавки. Додатковими вхідними даними для теплового балансу є продуктивність печі, загальні теплові втрати, температура дуття, чавуну і паливних добавок (рис. 16).



- 7) вуглець коксу, що витрачається на розкладання CO<sub>2</sub> вапняку;
- 8) вуглецю коксу, що витрачається на розкладання CO<sub>2</sub> багатоконпонентного газу.

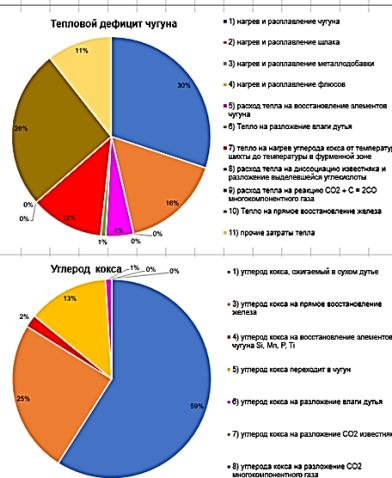
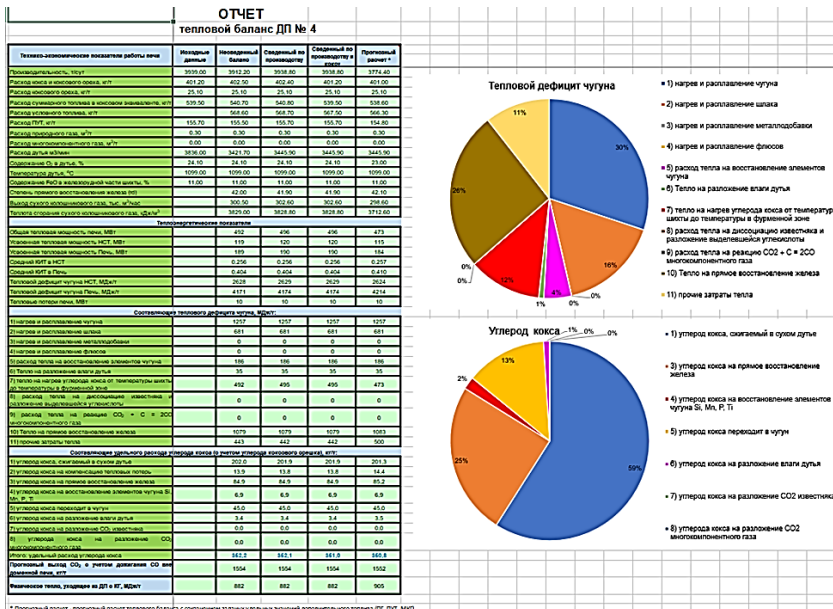


Рисунок 4 – Приклад звіту з результатами розрахунку теплового балансу.

Витрати теплового дефіциту чавуну, які відображаються у звіті з результатами розрахунку теплового балансу, складаються з наступних складових (рис. 4):

- 1) нагрівання та розплавлення чавуну;
- 2) нагрівання та розплавлення шлаку;
- 3) нагрівання та розплавлення металодобавки;
- 4) нагрівання та розплавлення флюсів;
- 5) витрата тепла відновлення елементів чавуну;
- 6) тепло на розкладання вологи дутья;
- 7) тепло на нагрівання вуглецю коксу від температури шихти до температури у зоні фурм;
- 8) витрата тепла на дисоціацію вапняку і розкладання вуглекислоти, що виділилася;
- 9) витрата тепла на реакцію CO<sub>2</sub> + C = 2CO багатоконпонентного газу;
- 10) тепло на пряме відновлення заліза;
- 11) інші витрати тепла.

**Адаптація розрахунків матеріального та теплового балансів до умов доменних печей ПрАТ «МК «Азовсталь».** Для адаптації моделей, встановлених в АСУ ТП доменного цеху ПрАТ «МК «Азовсталь», виконано помісячні розрахунки матеріального та теплового балансів доменних печей.

Визначено нев'язки загальних матеріальних балансів печей (різниця між сумарним приходом матеріалів у піч та продуктами плавки) та компонентами (залізо, вуглець та ін.). Нев'язка загальних матеріальних балансів визначалася з використанням даних про фактичний вихід колошникового пилу та шламу за тех.звітом та розрахунковим – за балансом заліза. Встановлено, що при використанні розрахункової величини виходу колошникового пилу на всіх доменних печах ПрАТ «МК «Азовсталь» величина нев'язки між сумарним приходом та сумарною витратою матеріалів лежить у довірчому діапазоні помилки (<1,5 %).

Але слід відмітити що при використанні фактичного виходу колошникового пилу та шламу для деяких доменних печей у певні місяці нев'язка між приходом та витратою матеріалів виходить за межі довірчої похибки, що може бути пов'язано, перш за все, з недостовірною інформацією про кількість та хімічний склад колошникового пилу та шламів (рис. 5).

Ступінь використання CO є одним із найважливіших вхідних параметрів моделей матеріального та теплового балансів та недостатня адекватність її вимірювань несе ризики отримання недостатньо достовірних результатів розрахунків. Слід зазначити, що спостерігалися суттєві відмінності (до 1,5 %) лабораторних та автоматизованих вимірів хімічного складу колошникового газу (рис. 6). Суттєві відмінності лабораторних та автоматизованих вимірювань хімічного складу колошникового газу можуть бути пов'язані з різними технічними причинами, з особливостями установки газоаналізаторів, а також слід відзначити різне транспортне запізнення колошникового газу до газоаналізаторів на печах через різні діаметри та довжини трас. Тому для розрахунків періодів адаптації моделей для доменних печей ПрАТ «МК «Азовсталь» використано дані про хімічний склад колошникового газу лабораторії з ручних проб.

Також встановлені нев'язки за основними складовими доменного шлаку ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

З використанням результатів розрахунку теплових балансів виконано співставлення нев'язок доменних печей (співвідношення розрахункових показників до фактичних). Нев'язку між розрахунковими показниками та фактичними (з технологічного звіту) ( $\varepsilon$ ) визначалася за формулою (1):

$$\varepsilon = F_{\text{розрах}} / F_{\text{факт}}, \quad (1)$$

де  $F_{\text{розрах}}$  – величина показника плавки за розрахунками,  $F_{\text{факт}}$  – величина показника плавки за фактичними даними.



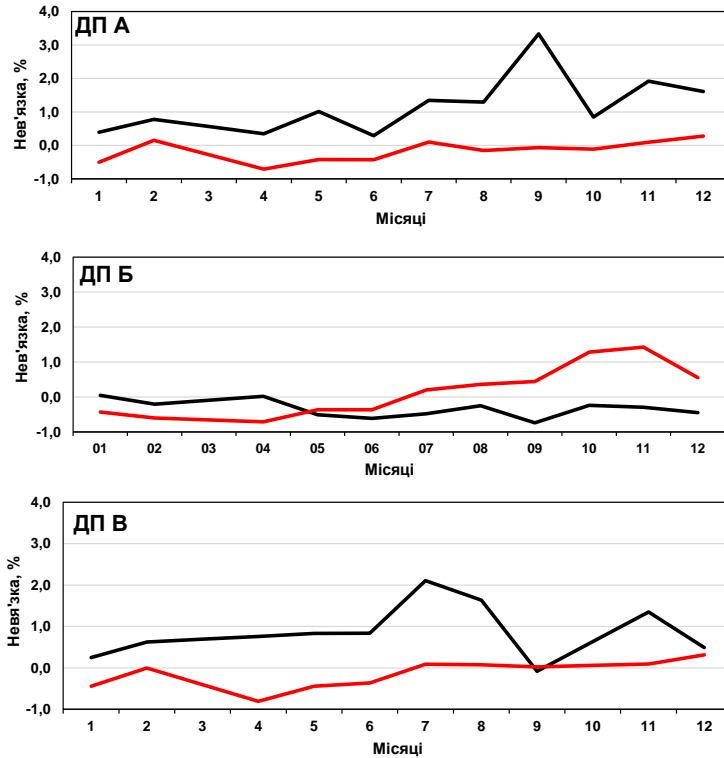


Рисунок 5 – Нев'язка між приходом і витратою матеріалів для доменних печей А, Б, В ПрАТ «МК «Азовсталь»: чорна лінія – вихід колошникового пилу та шламу за тех.звітом; червона лінія – розрахунковий вихід колошникового пилу за балансом заліза.



Рисунок 6 – Ступінь використання СО з автоматизованих та лабораторних вимірювань хімічного складу колошникового газу на одній з доменних печей ПрАТ «МК «Азовсталь».

Значення нев'язки більше 1,0 свідчить про більше значення розрахункового параметра порівняно з фактичним, менше 1,0 – про менше значення розрахункового параметра порівняно з фактичним. Чим ближче значення нев'язки до 1,0, тим точніше розрахункове значення та більш адаптований тепловий баланс до умов роботи доменної печі. Зведення балансу за продуктивністю (між розрахунковими показниками та фактичними параметрами роботи) здійснюється за рахунок зміни втрат дуття за балансом до збігу заданої (вхідної) та розрахункової (вихідної) продуктивності. За результатами розрахунків визначено середні втрати дуття для кожної печі (6 %, 9 % та 11 % відповідно).

Після зведення теплового балансу по продуктивності та витратам коксу визначено нев'язки розрахункової величини ступеня використання CO порівняно з фактичним та для доменних печей мет. комбінату встановлено межі змін нев'язки розрахункового ступеня використання CO у порівнянні з фактичним (у межах 0,94-1,10).

### **Висновки**

1. Розроблено інформаційну систему розрахунку математичних моделей матеріального та теплового балансів доменної плавки, що може вести розрахунки в автоматичному (аналіз періоду роботи печі за вибраний проміжок часу) та ручному режимах (прогнозі періоди).

2. Математичні моделі балансів були реалізовані у складі АСУ ТП доменного цеху ПрАТ «МК «Азовсталь» та використовувалися для оцінки відхилень від норм виробництва, витрати коксу та умовного палива, а також прогнозу можливості покращення техніко-економічних показників плавки. Для адаптації математичних моделей матеріального та теплового балансів до умов доменного цеху ПрАТ «МК «Азовсталь» для кожної печі виконано помісячні розрахунки та встановлено нев'язки балансів

3. Встановлено, що при використанні розрахункового виходу колошникового пилу на всіх доменних печах ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ» величина нев'язки між приходом та витратою матеріалів як у середньому за розглянутий період, так і для розрахунку за будь-який місяць періоду, зокрема, лежить у довірчій похибці (<1,5 %). При використанні фактичного виходу колошникового пилу та шламу на певні місяці нев'язка між приходом та витратою матеріалів виходить за межі довірчої похибки, що може бути пов'язане з недостовірною інформацією про кількість колошникового пилу та шламів.

4. Недостатня достовірність даних про хімічний склад колошникового газу створює ризики отримання спотворених результатів розрахунків моделей матеріального та теплового балансів. Більш пріоритетним джерелом інформації про хімічний склад колошникового газу є дані лабораторії з ручних проб. Необхідно на всіх доменних печах організувати та суворо дотримуватися типового регламенту відбору проб газу вручну

(1-3 рази на зміну), з наступним обов'язковим уведенням результатів аналізів лабораторії до бази даних АСУ ТП.

5. За результатами виконаного аналізу встановлені нев'язки щодо ряду хімічних компонентів, що беруть участь у доменній плавці (для деяких – досить значні). Як правило, тенденція зміни даних компонентів на печах однакова, що може бути пов'язано із зашумленістю інформації про кількість та хімічний склад завантажуваних шихтових компонентів. Для зменшення нев'язок по компонентам необхідно проведення більш детального та якісного аналізу кількості та хімічного складу матеріалів, що завантажуються в піч, і продуктів плавки.

### Перелік посилань

1. Бородулин А. В., Горбунов А. Д., Романенко В. И., Сушев С. П. Домна в энергетическом измерении. Днепродзержинск : ДГДУ, 2006. 542 с.
2. Ижевский В. П. Система учета доменного баланса. *ЖРМО*. 1912. ч. 1. № 2. С. 180-214.
3. Семикин И. Д, Аверин С. И., Радченко И. И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. М. : Металлургия, 1965. 391 с.
4. А.с. № 73905 Украины. Методика расчета. Полный энергетический баланс доменной плавки. Бородулин А. В., Чайка А. Л., Сохацкий А. А., Москалина А. А. Заявл. № 73841 15.05.17. Регистр. 25.09.17.
5. Бородулин А. В., Семикин И. Д. Расчет и оценка процессов прямого восстановления железа в доменной печи теплоэнергетическим методом. *Изв. ВУЗов. Черн. Metallurgy*. 1971. № 2. С. 27-30.
6. Козылев Н. А. Очерки по теории доменного процесса. Под редакцией М. А. Павлова. М. : Metallurgizdat, 1945. 370 с.
7. Павлов М. А. Metallurgy чугуна. Ч. 2. Доменный процесс. М. : Metallurgizdat, 1945. 492 с.
8. Семикин И. Д. Энергетические основы доменного процесса. В сб. *Дискуссия о работе доменных печей на повышенном давлении*. Ред. А. Д. Готлиб и Н. С. Щиренко. Днепропетровск : Изд. Укр. НТО ЧМ, 1958. С. 37-39.
9. Розенгарт Ю. И., Потапов Б. Б., Ольшанский В. М., Бородулин А. В. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. Киев : Вища школа. 1986. 296 с.
10. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. М. : Metallurgy, 1980. 304 с.
11. Теплотехника доменного процесса / Б. И. Китаев, Ю. Г. Ярошенко, Е. Л. Суханов и др. М. : Metallurgy, 1978. 248 с.

### Reference

1. Borodulyan A. V., Horbunov A. D., Romanenko V. Y., Sushchev S. P. Domna v enerhetycheskom yzmerenyy. Dneprodzержynsk: DHDU, 2006. 542 p.
2. Yzhevskyy V. P. Systema ucheta domennoho balansa. *ZhRMO*. 1912. Ch. 1. No 2. P. 180-214.
3. Semykyn Y. D, Averyn S. Y., Radchenko Y. Y. Topylvo y toplyvnoe khoziaistvo metallurhycheskykh zavodov. Moskva: Metallurhyia, 1965. 391 s.
4. A.s. № 73905 Ukrainy. Metodyka rascheta. Polnyi enerhetychesky balans domЕННОI plavky. Borodulyan A. V., Chaika A. L., Sokhatskyi A. A., Moskalyna A. A. Zaiavl. No 73841 15.05.17. Rehystr. 25.09.17.

5. Borodulyan A. V., Semykyn Y. D. Raschet y otsenka protsessov priamoho vosstanovleniya zheleza v domennoi pechy teploenerhetycheskym metodom. *Yzv. VUZov. Chern. Metallurhiya*. 1971. No 2. P. 27-30.
6. Kostylev N. A. Ocherky po teoryi domennogo protsessa. Pod redaktsyei M. A. Pavlova. Moskva: Metallurhyzdat, 1945. 370 p.
7. Pavlov M. A. Metallurhiya chuhuna. Ch. 2. Domennyi protsess. Moskva: Metallurhyzdat, 1945. 492 p.
8. Semykyn Y. D. Enerhetycheskye osnovy domennogo protsessa. *Dyskussyya o rabote domennykh pechei na povyshennom davlenyyi*. Red. A. D. Hotlyb y N. S. Shchyrenko. Dnepropetrovsk: Yzd. Ukr. NTO ChM, 1958. P. 37-39.
9. Rozenhart Iu. Y., Potapov B. B., Olshanskiy V. M., Borodulyan A. V. Teploobmen y teplovye rezhimy v promyshlennykh pechakh. Kyev: Vyscha shkola, 1986. 296 p.
10. Ramm A. N. Sovremennyy domennyy protsess. Moskva: Metallurhiya, 1980. 304 p.
11. Teplotekhnika domennogo protsessa / B.Y. Kytaev, Yu.H. Yaroshenko, E.L. Sukhanov et al. Moskva: Metallurhiya, 1978. 248 p.

**O. L. Chaika**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-1678-2580

**B. V. Kornilov**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5544-3023

**V. V. Lebid**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-3938-3785

**A. O. Moskalyna**, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-9552-2853

**Ye. I. Shumelchyk**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5350-6425

**M. H. Dzhyhota**, Leading Engineer, ORCID 0000-0003-3062-5127

*Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

### **IMPLEMENTATION OF MATHEMATICAL MODELS OF MATERIAL AND HEAT BALANCES AS PART OF THE AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM OF PJSC "MK "AZOVSTAL"**

**Summary.** On the basis of blast furnace operation data of PJSC "MK "Azovstal", an information system has been developed, which is based on mathematical models of material and heat balances of blast furnace smelting developed at the Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine. The calculation of the material balance is carried out according to the "accounting system" of V. P. Izhevskii. The thermal energy model of I. D. Semikin is used to calculate the heat balance, which was developed for use in blast furnace production by O. V. Borodulin. The article describes the information system of calculating mathematical models. The information system allows you to calculate balances in automatic mode (collection of data from automatic control system of technological process (ACS TP) and calculation of material and heat balances for the selected period) and in manual mode (calculation of forecast periods to determine reserves for increasing the energy efficiency of blast furnace smelting). The models were adapted by calculating the material and heat balances of blast furnace melting and determining the inconsistencies. Monthly calculations of the material and heat balances of the blast furnaces were performed to adapt the models installed in the ACS TP of the blast furnace workshop of PJSC "MK "Azovstal". Inconsistencies in the overall material balances of the furnaces (the difference between the total input of materials into the furnace and smelting products) and by components (iron, carbon, etc.) were determined. It was established that when using the estimated amount of blast furnace

dust at all blast furnaces of PJSC "MK "Azovstal", the amount of discrepancy between the arrival and consumption of materials lies within the credible range of error ( $<1,5\%$ ). Using the results of the calculation of heat balances, a comparison of the Inconsistencies of the blast furnaces was made (the ratio of the calculated indicators to the actual ones). Mathematical models of balances were implemented as part of the ACS TP of the blast furnace workshop of PJSC "MK "Azovstal" and were used to assess deviations from production norms, consumption of coke and conventional fuel, as well as forecast the possibility of improving the technical and economic indicators of smelting.

**Key words:** blast furnace, productivity, coke consumption, mathematical models, material balance, heat balance.

**For citation:** O. L. Chaika, B. V. Kornilov, V. V. Lebid, A. O. Moskalyna, Ye. I. Shumelchuk, M. H. Dzhyhota. Realizatsiia matematychnykh modelei materialnoho ta teplovoho balansiv domennoi plavky v skladi ASU TP PRAT "MK "AZOVSTAL" [Implementation of mathematical models of material and heat balances of blast furnace smelting as part of the ACS TP of PJSC "MK "Azovstal"]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 82-94. (In Ukrainian). DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-82-94.

*Стаття надійшла до редакції збірника 30.11.2022 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*