

Д.М. Тогобицька, д.т.н., проф., зав.відділом, ORSID 0000-0001-6413-4823

А.І. Белькова, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0001-8519-9351

Д.О. Степаненко, к.т.н., с.н.с., ORSID 0000-0002-0184-8295

Н.О. Цюпа, к.т.н., с.н.с.

Ю.М. Ліхачов, , с.н.

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

## **РОЗВИТОК МОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ШЛАКОВИМ РЕЖИМОМ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ В СУЧАСНИХ ШИХТОВИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ УМОВАХ**

**Анотація.** Метою роботи є розвиток модельного комплексу прогнозування технологічних властивостей кінцевих доменних шлаків, алгоритмічного і програмного забезпечення підсистеми діагностики шлакового режиму доменної плавки. На основі експериментальних даних про властивості натуральних кінцевих доменних шлаків вдосконалено прогнозні моделі для розрахунку в'язкості кінцевого шлаку при температурі 1400-1550<sup>o</sup>C. В структуру моделі включено інтегрального показника шлакового розплаву параметру  $\Delta\epsilon$ , що відображає індивідуальний характер впливу на в'язкість кожного компоненту складу шлаку. З використанням інтегральних параметрів шлакового розплаву, що характеризують зарядовий стан системи  $\Delta\epsilon$  та стехіометричну структуру шлаку  $\rho$ , розроблено рівняння для визначення в'язкості шлаку при будь-якій його температурі на випуску чавуну. В результаті аналітичних досліджень розвинуто прогнозну модель для визначення ентальпії шлаку в залежності від інтегральних параметрів  $\Delta\epsilon$  та  $\rho$ , а також температури розплаву  $T$ . Показано, що в'язкість характеризує плинність шлаку і забезпечує десульфуруючі і дренажні властивості. Розрахунок в'язкості для зазначеного випуску чавуну за хімічним складом шлаку здійснюється по базовій моделі шлаку в умовно «гомогенному» стані і з урахуванням його гетерогенності. При цьому враховується наявність макрогетерогенностей включень, що утворюються при використанні коксу з низькими характеристиками міцності і внаслідок неповного спалювання пилувугільного палива в доменній печі. Удосконалені моделі для оцінки в'язкості і ентальпії кінцевого шлаку програмно реалізовані в новій версії системи «Шлак» для оперативного контролю шлакового режиму доменних печей України. Оперативна оцінка шлакового режиму за допомогою системи «Шлак» в складі АСУТП ДП дозволяє ефективно і на сучасному рівні вирішувати завдання оптимізації шлакового режиму і якості чавуну в змінних умовах доменної плавки.

**Ключові слова:** доменна плавка, шлаковий режим, фізико-хімічні властивості, в'язкість, ентальпія, прогнозна модель, експертна система.

**Посилання для цитування:** Тогобицька Д.М., Белькова А.І., Степаненко Д.О., Цюпа Н.О., Ліхачов Ю.М. Розвиток фізико-хімічних основ, експертної системи контролю та управління шлаковим режимом доменної плавки в сучасних шихтових та технологічних умовах. //«Фундаментальні та прикладні

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34  
«Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Выпуск 34  
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34*

**Стан проблеми.** У сучасному світі технологій ефективність управління і прийняття оптимальних рішень в значній мірі обумовлена якісним рівнем експертних систем, що реалізують в своєму складі широкий пакет адекватних фізико-хімічних і математичних моделей технологічних процесів і систем. Одним з резервів поліпшення техніко-економічних показників доменного виробництва є відпрацювання оптимального шлакового режиму плавки, а саме, вибір найбільш раціональних складів кінцевих шлаків, оптимальні технологічні властивості яких обумовлюють якість і збільшення виробництва металу. Адекватність прогнозних моделей для оцінки шлакового режиму виробництва металу ладанної якості являється основним важілем їх ефективного використання в системах АСУТП ДП.

В Інституті чорної металургії НАНУ на базі фундаментальних розробок в галузі фізико-хімічного моделювання розплавів створена і пройшла промислове випробування експертна комп'ютерна система контролю і управління шлаковим режимом доменної плавки «Шлак» на основі прогнозної оцінки комплексу фізико-хімічних властивостей кінцевих доменних шлаків [1-2].

Постійно мінливі сировинні та енергетичні умови виробництва чавуну зумовлюють необхідність розвитку фізико-хімічних основ, відповідного математичного та програмного забезпечення системи. Використання в доменній плавці пиловугільного палива і промислових відходів, що містять шкідливі домішки і лужні сполуки, призводить до порушення умов нормального ходу печі і зниження техніко-економічних показників плавки, що в значній мірі визначається процесом формування рідких фаз і шлакоутворення в печі. У зв'язку з цим зазнав істотних змін шлаковий режим плавки, що визначає необхідність розвитку прогнозних моделей властивостей кінцевого шлаку з урахуванням впливу змінного хімічного складу і температури, а також алгоритмічного забезпечення системи для оцінки шлакового режиму в нестабільних умовах плавки.

**Метою цієї роботи** є розвиток модельного комплексу прогнозування технологічних властивостей кінцевих доменних шлаків, алгоритмічного і програмного забезпечення підсистеми діагностики шлакового режиму в сучасних умовах доменної плавки.

**Основний матеріал дослідження.** Аналіз шлакового режиму доменної плавки роботи 3-х доменних печей України (ПАТ «ДМК» і МК «Азовсталь») з різними шихтовими і технологічними умовами показав його зміну, що характеризується зниженням основності шлаку і підвищенням вмісту лужних оксидів. Як видно з наведених даних (табл.1,

2), шлаковий режим ДП-А і ДП-С відрізнявся від режиму ДП-В зниженою основністю шлаку  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , що дорівнює 1,09 проти 1,21 для ДП-В, оскільки зазначені доменні печі працювали з вдуванням пиловугільного палива.

Таблиця 1 – Показники продуктів доменної плавки в різних умовах роботи доменних печей України

ДП		Хімічний склад чавуну та шлаку, %									
		Si	S	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	S	TiO <sub>2</sub>
A	min	0.18	0.010	39.8	38.2	3.0	4.8	0.10	0.00	0.11	0.00
	sred	<b>0.75</b>	<b>0.030</b>	<b>45.7</b>	<b>42.1</b>	<b>4.4</b>	<b>6.0</b>	<b>0.14</b>	<b>0.54</b>	<b>0.87</b>	<b>0.20</b>
	max	1.88	0.098	51.0	46.5	8.1	7.9	0.37	2.10	1.22	1.23
B	min	0.27	0.008	45.2	37.7	4.4	6.5	0.08	0.25	0.71	0.35
	sred	<b>0.63</b>	<b>0.022</b>	<b>47.4</b>	<b>39.3</b>	<b>5.7</b>	<b>7.2</b>	<b>0.20</b>	<b>0.42</b>	<b>0.89</b>	<b>0.71</b>
	max	1.21	0.085	49.7	41.0	7.1	7.8	0.37	0.86	1.10	1.19
C	min	0.42	0.008	38.9	38.0	6.9	7.1	0.04	0.08	0.70	0.29
	sred	<b>0.71</b>	<b>0.020</b>	<b>42.5</b>	<b>39.1</b>	<b>9.5</b>	<b>8.1</b>	<b>0.13</b>	<b>0.27</b>	<b>0.90</b>	<b>0.37</b>
	max	1.07	0.043	46.0	40.7	11.5	9.5	0.25	0.95	1.09	0.62

Таблиця 2 – Показники продуктів доменної плавки (продовження табл. 1)

ДП		Хімічний склад шлаку, %		CaO/SiO <sub>2</sub>	(CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MgO	Хіміч. еквів-т складу Δε	Показник стехіометрії шлаку ρ
		K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O					
A	min	0.12	0.23	0.87	0.97	0.69	-2.790	0.685
	sred	<b>0.36</b>	<b>0.48</b>	<b>1.09</b>	<b>1.19</b>	<b>1.38</b>	<b>-2.488</b>	<b>0.705</b>
	max	0.89	0.95	1.31	1.41	2.03	-2.214	0.721
B	min	0.13		1.12	1.27	1.05	-2.534	0.710
	sred	<b>0.30</b>		<b>1.21</b>	<b>1.35</b>	<b>1.26</b>	<b>-2.354</b>	<b>0.716</b>
	max	0.60		1.28	1.43	1.70	-2.240	0.722
C	min	0.23	0.33	0.97	1.21	0.67	-2.738	0.711
	sred	<b>0.41</b>	<b>0.54</b>	<b>1.09</b>	<b>1.33</b>	<b>0.86</b>	<b>-2.603</b>	<b>0.720</b>
	max	0.69	0.80	1.20	1.42	1.20	-2.421	0.727

Така зміна основності шлаку вважається одним з необхідних заходів, що компенсує негативний вплив ПВП на технологію і поліпшує рухливість шлакових розплавів в коксовій насадці, що містить незгорілі частки ПВП. Крім зниженої основності шлаку  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  істотна відмінність шлакового режиму зазначених печей пов'язана з підвищенням вмістом магнезії в шлаку до 9,5% для ДП-С при значенні 4,4% і 5,7% для ДП-А і ДП-В відповідно, і, як наслідок, пониженим відношенням  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$  (табл.2). Як показали наші попередні дослідження і дослідження інших авторів [3-7] відношення  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$  необхідно

підтримувати на відповідному рівні в залежності від зміни основності  $\text{CaO/SiO}_2$  для забезпечення високої сіркопоглинаючої здатності шлаків і заданого складу чавуну. Зміна шихтових умов вимагає постійного коректування цих співвідношень. Крім того, присутність в виробничих шлаках закисів заліза і марганцю, окисів титану, лужних металів, сірки та інших оксидів викликає відмінності в поведінці шлаків однакового (по основних чотирьох компонентів) складу, що необхідно враховувати при оцінці їх властивостей.

Раніше нами для прогнозування властивостей шлаків заводів України розроблено та реалізовано в системі «Шлак» моделі для розрахунку властивостей «гомогенних» доменних шлаків у вигляді рівнянь: Властивість  $= f(\Delta e, \rho, T)$ , де  $\Delta e$  та  $\rho$  - інтегральні параметри складу та структури шлакового розплаву,  $T$ - температура шлаку [2]. Так, для розрахунку в'язкості шлаків (Па.с) в залежності від показника стехіометрії складу  $\rho$  і температури в системі реалізована наступна модель:

$$\lg \eta = 191,6149 - 562,4018 \cdot \rho + 401,948 \cdot \rho^2 + 6,74924 \cdot \frac{1000}{T}, \quad (1)$$

Для визначення температур ліквідус  $T_l$  (початку кристалізації) і солідус  $T_s$  (кінця кристалізації) ( $^{\circ}\text{C}$ ) використовуються рівняння:

$$T_l = 18738,5 - 50343,11 \cdot \rho + 36523,16 \cdot \rho^2; \quad (2)$$

$$T_s = 18800 - 52418,71 \cdot \rho + 39086,17 \cdot \rho^2; \quad (3)$$

Визначення ентальпії  $\Delta H$  (кДж/кг) шлаку здійснюється за рівнянням:

$$\Delta H = 4425.7 + 2095.9 \cdot \Delta e + 421.67 \cdot \Delta e^2 \quad (4)$$

Досвід використання зазначених моделей показав необхідність їх розвитку для оцінки шлакового режиму роботи доменної печі в сучасних умовах. Зокрема, була виявлена недостатня інформативність показника стехіометрії  $\rho$  як інтегрального параметра, який би враховував зарядовий стан компонент в шлакової системі. Показник стехіометрії шлаку  $\rho$ , який розраховується як відношення катіонів до аніонів, характеризує структуру яка склалася у катіонно-аніонній решітці (розташування катіонів та аніонів по відношенню один до одного) і не враховує міжатомної взаємодії компонент в системі. У той же час таким параметром, що враховує цю взаємодію, є параметр зарядового стану системи  $\Delta e$ , який, крім того, як показали наші дослідження [3], враховує якісний вплив компонент (магnezії, лужних з'єднань і ін.) на в'язкість шлаків.

Зокрема, облік у шлаку лужних сполук і підвищення вмісту оксиду магнію для ДП-С призводить до підвищення показника  $\rho$  і, як наслідок, до підвищення значень в'язкості шлаку, що розраховується залежно від цього показника за рівнянням (1). У той же час магnezія до певної межі є розріджуючим компонентом. Так, наприклад, для шлакового режиму

зазначених печей зі зміною основності шлаку від 0,9 до 1,2 підвищення магnezії в шлаку до 10% знижує в'язкість, наприклад, для  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1.1$  зі значення 0.3 Па.с при  $\text{MgO} = 5\%$  до 0.23 Па.с при  $\text{MgO} = 10\%$  (рис. 1).

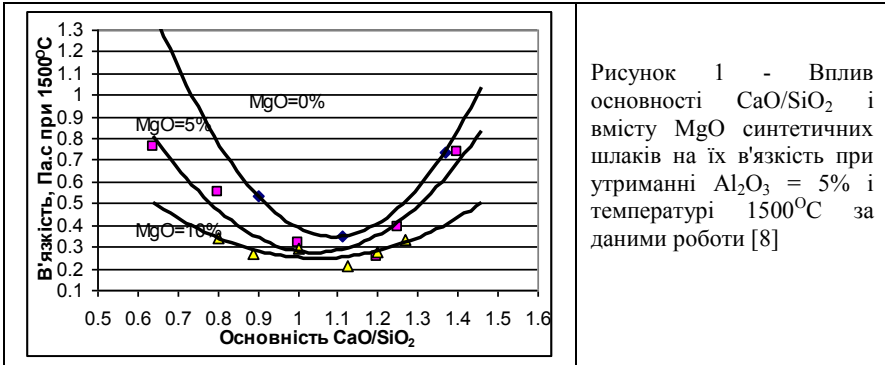
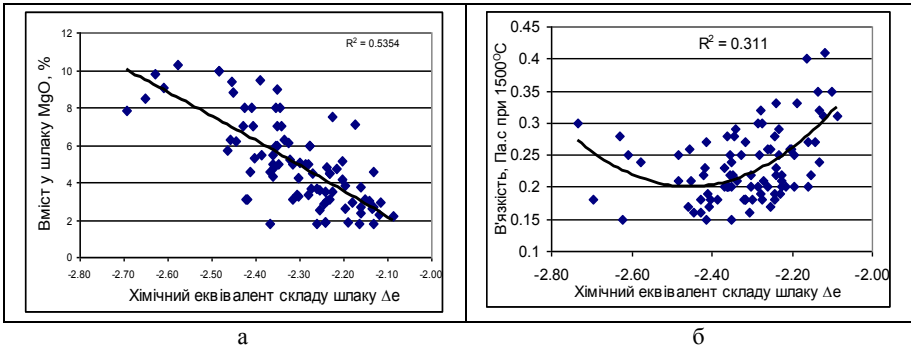


Рисунок 1 - Вплив основності  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  і вмісту  $\text{MgO}$  синтетичних шлаків на їх в'язкість при утриманні  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 5\%$  і температурі  $1500^\circ\text{C}$  за даними роботи [8]

В результаті аналітичних досліджень встановлено, що між вмістом магnezії в шлаку і хімічним еквівалентом складу  $\Delta e$  існує зворотний зв'язок (рис. 2 (а)), зафіксований на даних об'єднаного масиву про властивості натуральних кінцевих доменних шлаків заводів СНД і близьких за складом до шлаків вітчизняних заводів, опублікованих в роботах Нестеренко С.В., Хоменко В.М., Бачиніна А.А., Жило Н.Л., Сафіної Л.А., Жмойдіна Г.І. та ін.



а

б

Рисунок 2 - Зв'язок інтегрального параметра шлаку  $\Delta e$  з в'язкістю і показниками хімічного складу шлаку (за експериментальними даними Жило Н.Л. і ін.)

Аналогічна залежність встановлена і за даними поточних випусків роботи зазначених доменних печей. Відповідно до залежності в'язкості шлаку від параметра  $\Delta e$  збільшення магnezії в шлаку викликає зниження «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34 «Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Выпуск 34 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

значень  $\Delta\epsilon$ , що буде сприяти зниженню в'язкості до певної межі відповідно до поданої на рис. 2 (б) нелінійної залежності в'язкості від показника  $\Delta\epsilon$ .

Аналогічні висновки отримані і за змістом лужних оксидів в шлаку: зі збільшенням їх кількості в шлаку зменшується значення параметра  $\Delta\epsilon$  (рис. 3 (а)) і, як наслідок, буде знижуватися їх в'язкість. Так згідно з дослідженнями роботи [9] встановлено, що  $K_2O$  знижує в'язкість і температуру кристалізації як кислих, так і основних безглиноземистих шлаків, причому більш сильний вплив надають перші 3%  $K_2O$ . Збільшення вмісту  $K_2O$  в глиноземистих шлаках з 5-10%  $Al_2O_3$ , що відповідає шлакам заводів України, знижує в'язкість і температуру кристалізації при додаванні 3%  $K_2O$ ; подальше збільшення  $K_2O$  підвищує в'язкість основних глиноземистих шлаків.

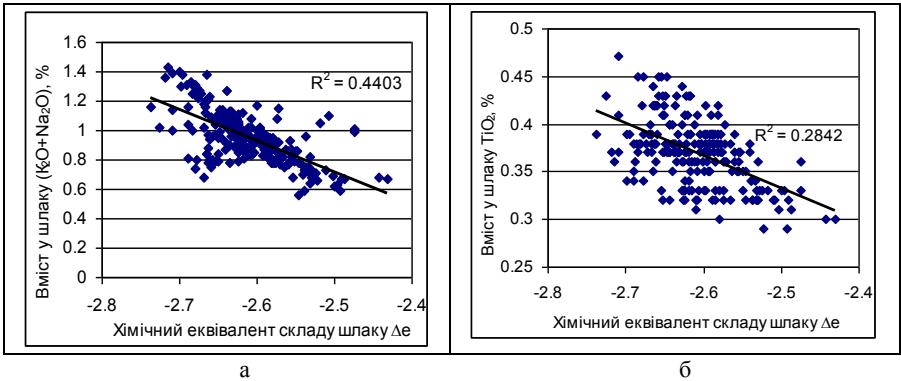


Рисунок 3 – Зв'язок інтегрального параметра шлаку  $\Delta\epsilon$  з показниками хімічного складу шлаку (за поточними даними випусків роботи ДП-С)

Таким чином, в ході досліджень обґрунтовано доцільність і необхідність включення в структуру прогнозної моделі для розрахунку в'язкості модельного параметра  $\Delta\epsilon$ , який, по-перше, характеризує шлаковий розплав на рівні міжатомної взаємодії компонент в оксидній системі (що не враховувалося раніше), і, по-друге, враховує в комплексі індивідуальний характер впливу на в'язкість кожного компонента складу шлаку.

Беручи до уваги загальновідомий вплив на в'язкість шлаків основності  $CaO/SiO_2$  (рис. 1), а також значимий зв'язок параметра зарядового стану системи  $\Delta\epsilon$  з в'язкістю, то доцільно їх спільне використання при побудові прогнозної моделі. Традиційний підхід до оцінки в'язкості тільки по основності не враховує фізико-хімічної

взаємодії між усіма компонентами в шлаковому розплаві, в той час як параметр  $\Delta e$  відображає характер впливу компонент складу шлаку.

В результаті аналітичних досліджень отримані наступні рівняння для визначення в'язкості шлаку при температурах 1400-1550<sup>0</sup>С в залежності від основності шлаку і інтегрального показника  $\Delta e$  (коефіцієнт кореляції залежностей  $R = 0.7-0.86$ ):

$$\eta_{1400} = 17.75 - 14.99 * \text{CaO/SiO}_2 + 6.94 * (\text{CaO/SiO}_2)^2 + 7.79 * \Delta e + 1.65 * \Delta e^2 \quad (5)$$

$$\eta_{1450} = 16.9 - 9.44 * \text{CaO/SiO}_2 + 4.24 * (\text{CaO/SiO}_2)^2 + 9.12 * \Delta e + 1.84 * \Delta e^2 \quad (6)$$

$$\eta_{1500} = 8.7 - 8.87 * \text{CaO/SiO}_2 + 3.8 * (\text{CaO/SiO}_2)^2 + 2.38 * \Delta e + 0.42 * \Delta e^2 \quad (7)$$

$$\eta_{1550} = 3.48 - 1.58 * \text{CaO/SiO}_2 + 0.71 * (\text{CaO/SiO}_2)^2 + 2.04 * \Delta e + 0.43 * \Delta e^2 \quad (8)$$

Для розрахунку в'язкості при заданій температурі шлаку (зокрема, при температурі шлаку  $T_{\text{шл}}$  або чавуну) необхідно розрахувати в'язкість для двох близьких до шуканої температури  $T_{\text{шл}}$  по рівняннях (5) - (8) і потім з їх допомогою розрахувати для  $T_{\text{шл}}$  на випуску чавуну.

З огляду на вплив температури на процеси взаємодії компонент в оксидній системі і, як наслідок, на зміну зарядового стану в результаті додаткових досліджень експериментальних даних Нестеренко С.В., Хоменко В.М., Бачиніна А.А., Жило Н.Л., Сафіної Л. А., Жmoidіна Г.І. і Гладкова Н.П., було розроблено узагальнене рівняння для визначення в'язкості шлаку при будь-якій температурі в залежності від інтегральних показників  $\Delta e$  та  $\rho$  (коефіцієнт кореляції  $R=0.81$ ):

$$\eta_T = 435.9 + 4.78 * \Delta e * \frac{T}{1000} - 1204.27 * \rho + 0.641 * (\Delta e * \frac{T}{1000})^2 + 846.16 * \rho^2 + 2.58 * \frac{1000}{T}, \quad (9)$$

Отримані рівняння (6), (7), (9) були випробувані на даних фактичних випусків чавуну ДП-В за поточний період її роботи. На **рис. 4** показаний рівень розрахованих значень в'язкості при фактичній температурі чавуну, при температурі 1450<sup>0</sup>С, а також два варіанти розрахованих значень при 1500<sup>0</sup>С: тільки від основності шлаку  $\text{CaO/SiO}_2$  (1) і від основності і параметру  $\Delta e$  (2), що свідчить про вплив інших компонент шлаку на його в'язкість.

В результаті розрахунково-аналітичних досліджень вдосконалена прогнозна модель для оцінки ентальпії кінцевих доменних шлаків. Доменні шлаки на випуску чавуну характеризує ентальпія при температурі хорошій текучості ( $\approx 1500^{\circ}\text{C}$ ), відповідної в'язкості 0,3 Па·с [8]. На рис.5 представлена ентальпія при температурі хорошій текучості натуральних доменних шлаків різних металургійних підприємств СРСР в широкому діапазоні складів за даними Воскобойнікова В.Г. [8]. У їх числі шлаки заводів України з широким діапазоном складів по основності, змістом  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{MgO}$ . Для порівняння показані значення ентальпії при

1500°C шлаків МК «Запоріжсталь» різної основності, виміряні Гаврилко С.А. [10], які значно перевершують ентальпію аналогічних шлаків за даними Воскобойнікова В.Г. Внаслідок цього раніше нами для побудови моделі за основу були використані експериментальні дані про ентальпії синтетичних і реальних доменних шлаків за даними Воскобойнікова В.Г. В результаті було отримано рівняння залежності ентальпії доменних шлаків при температурі їх хорошій текучості від складу, представленого хімічним еквівалентом  $\Delta e$ :  $\Delta H = f(\Delta e^2)$  [2].

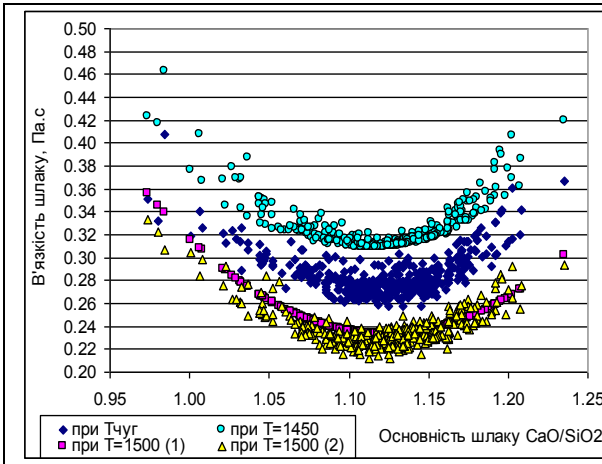


Рисунок 4 – Розраховані значення в'язкості кінцевого шлаку при температурі чавуну, 1450°C, 1500°C для фактичних випусків чавуну ДП-В

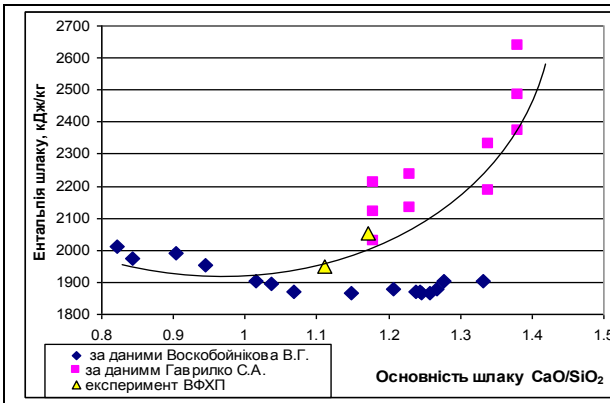


Рисунок 5 – Залежність ентальпії доменних шлаків при різній температурі від основності CaO/SiO<sub>2</sub>

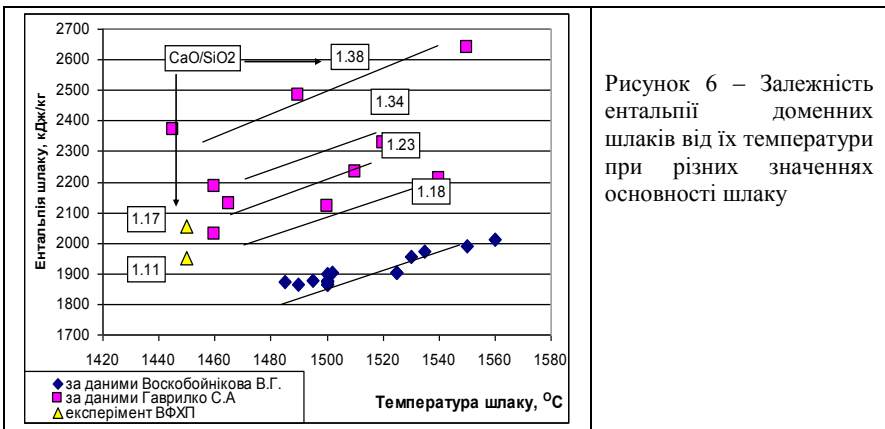
У зв'язку зі зміненими умовами доменної плавки нами була актуалізована база експериментальних даних «Шлак», яка поповнилася



даними про теплофізичні властивості розплавів доменних шлаків на основі виконання власних експериментальних досліджень вимірювання кількості теплоти розплавів доменних шлаків [11]. У процесі експериментальних досліджень теплофізичних властивостей доменних шлаків досліджувалися шлаки різного хімічного складу з основністю ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ), що дорівнює 1,24 і 1,19. Нагрівання шлаків в печі здійснювався до температури 1450 °С з подальшим їх скиданням в калориметр. В результаті досліджень встановлено величину ентальпії для досліджуваних шлаків відповідно 2053кДж/кг і 1949кДж/кг без урахування теплоти на пароутворення, що пов'язано зі складністю обліку втрати води зі шлаком при їх поділі (рис. 5, 6).

Для побудови прогнозної моделі ентальпії доменних шлаків в залежності від їх складу з урахуванням температури була сформована об'єднана вибірка даних, що включає відомості про ентальпії при температурі хорошій текучості реальних доменних шлаків Воскобойнікова В.Г., Гаврилко С.А. для діапазону температур, відповідних доменним шлакам на випуск (1400-1550°С), і власні заміри ентальпії і температури кінцевого шлаку на випуску чавуну.

На рис. 6 показана залежність ентальпії шлаку від його температури, однак для кожної основності ця лінійна залежність має свої характеристики.



Оскільки показник основності шлаку  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  не враховує повний хімічний його склад, то доцільніше при моделюванні використовувати інтегральні параметри шлаку  $\rho$  і  $\Delta_e$ , залежність від яких має нелінійний характер. В результаті аналітичних досліджень модель для визначення

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34  
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34  
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

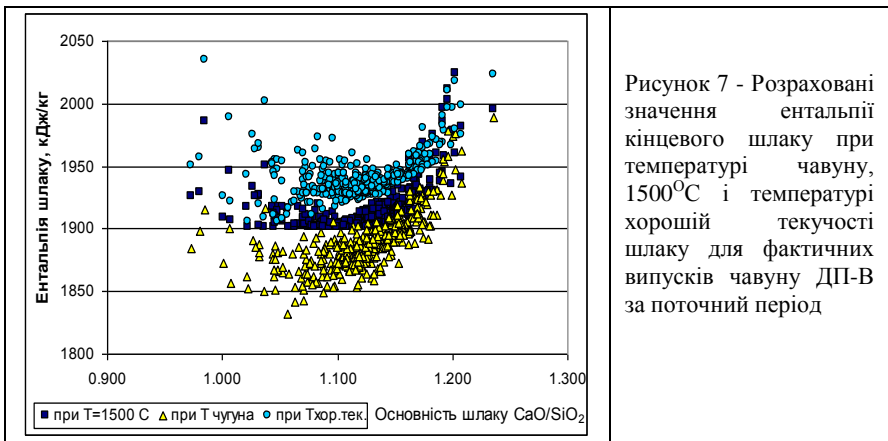
ентальпії шлаку  $\Delta H$  (кДж/кг) розвинена шляхом обліку температури розплаву  $T$  і може бути використана для прогнозування ентальпії кінцевих доменних шлаків заводів України при зміні температури їх розплавів в діапазоні 1400÷1550°C (коефіцієнт кореляції  $R=0.91$ ):

$$\Delta H = -402.045 + 0.920401 * (49.976 * \Delta e + 125.96)^2 + 0.261016 * (476.729 * \rho - 323.41)^2 + 1.50123 * T \quad (10)$$

З використанням сформованого масиву даних отримана залежність температури хорошої текучості шлаку від хімічного складу шлаку, оперативний розрахунок якої по фактичному випуску чавуну є додатковим показником оцінки температурного стану продуктів доменної плавки. Рівняння для розрахунку температури хорошої текучості шлаку в залежності від співвідношення інтегральних параметрів шлаку  $\rho$  та  $\Delta e$ , а також параметра  $\text{tg}\alpha$  має вигляд:

$$T_{\text{хортек}} = 23206 * \left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)^2 + 14336 * \frac{\rho}{\Delta e} + 3709 - 12335 * \text{tg}\alpha + 165.94 \quad (11)$$

Прогнозне рівняння (10) було випробувано для фактичних випусків чавуну ДП-В за поточний період її роботи, для яких були розраховані значення ентальпії кінцевого шлаку. На рис. 7 показаний рівень розрахованих значень ентальпії при фактичній температурі чавуну, при температурі 1500°C і температурі хорошої текучості шлаку.



Такий оперативний контроль теплофізичних властивостей продуктів плавки на випуску доцільно використовувати в якості додаткового кількісного показника нагріву горна доменної печі при оптимізації

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34  
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34  
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

режиму доменної плавки та для поліпшення її техніко-економічних показників.

В даний час модернізована система «Шлак» забезпечує:

– контроль показників продуктів плавки: хімічного складу і температури чавуну, хімічного складу кінцевого шлаку і показників шлакового режиму (основність 1  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , основність 2  $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ , відношення  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ ) в ретроспективі (рис. 8) для вказаного діапазону випусків або дат (рис. 8);

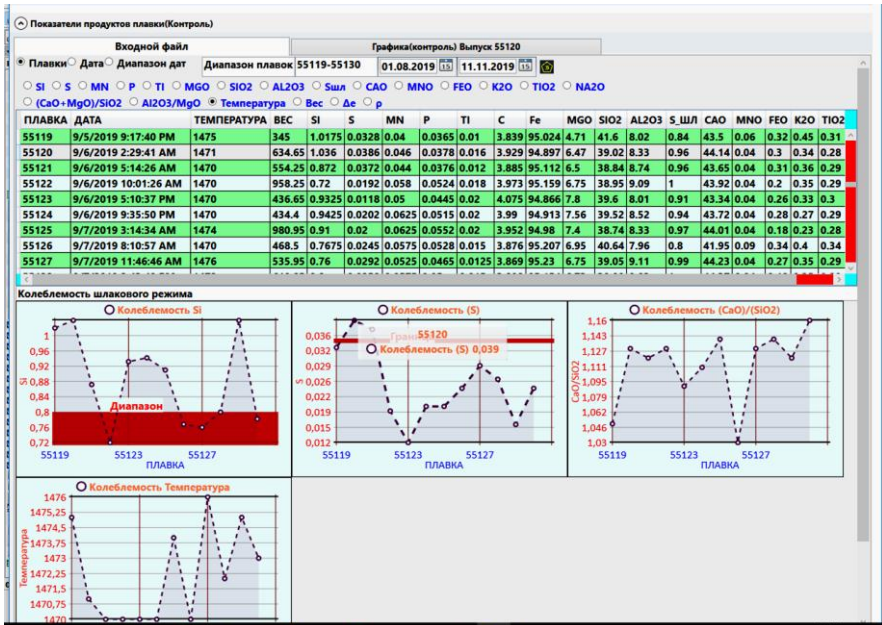


Рисунок 8 - Контроль показників продуктів плавки в системі «Шлак»

– розрахунок комплексу найбільш важливих технологічних властивостей доменного шлаку для зазначеного випуску: сіркопоглинаючої здатності; в'язкості (Па.с) і поверхневого натягнення (мН/м) для температури  $1500^{\circ}\text{C}$  і температури шлаку, ентальпії при температурі хорошій текучості шлаку (кДж/кг), температур початку (ліквідус,  $^{\circ}\text{C}$ ) і кінця (солідус,  $^{\circ}\text{C}$ ) кристалізації; температури гетерогенізації  $T_g$  і ступеня досягнення системи «метал-шлак» рівноваги по сірці (%) (рис. 9);

– оцінку шлакового режиму та видачу керуючих рекомендацій в режимі Порадника майстру ДП (рис. 9).

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34  
 «Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Выпуск 34  
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

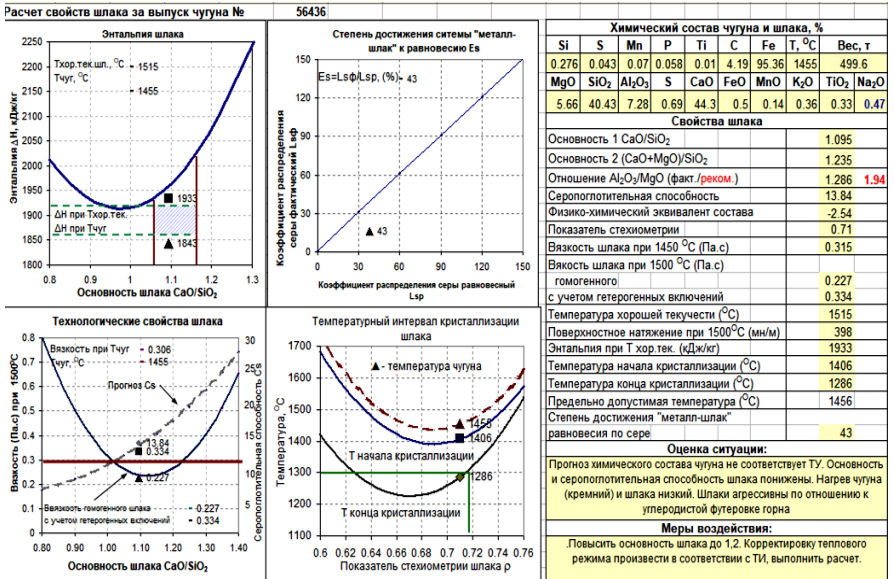


Рисунок 9 - Оцінка шлакового режиму в системі «Шлак»

В'язкість характеризує плинність шлаку і забезпечує десульфуруючі і дренажні властивості. Розрахунок в'язкості для зазначеного випуску чавуну за хімічним складом шлаку здійснюється по базовій моделі шлаку в умовно «гомогенному» стані і з урахуванням його гетерогенності, зумовленої наявністю макрогетерогенних включень, що утворюються при використанні коксу з низькими характеристиками міцності і внаслідок неповного спалювання пиловугільного палива в печі [3]. В'язкість «гомогенного» шлаку розраховується при температурі 1500°C за рівнянням (7), а також з використанням рівнянь (5) - (8) визначається для заданої температури шлаку (чавуну) на випуску.

На графіку залежності в'язкості кінцевого шлаку при температурі 1500°C від основності шлаку CaO/SiO<sub>2</sub> відзначена величина оптимальної в'язкості 0,3 Па.с (рис. 9). При збільшенні в'язкості більше 0,3 Па.с зменшується дифузійна рухливість шлакового розплаву і погіршуються кінетичні умови знесірчення чавуну шлаком як в області «кислих» складів, так і «основних», коли шлак стає гетерогенним. При зменшенні в'язкості менше 0,3 Па.с і, особливо, менш 0,2 Па.с дифузійна рухливість шлаку зростає настільки, що він стає «агресивним» по відношенню до вогнетривів і футерівки печі.

На графіку залежності температур початку плавлення (солідус) шлаку ( $T_C$ ) від параметра  $\rho$  відзначена величина оптимальної температури  $T_C=1300^\circ\text{C}$ . Більш висока температура  $T_C$  призводить до утворення гарнісажу і скорочення робочого простору горна. Також на цьому графіку представлена залежність гранично допустимої температури шлаку, нижче якої фактична температура шлаку (чавуну) на випуску не може опускатися.

Ентальпія характеризує витрати тепла на утворення шлаку, нагрів його до заданої температури, а також кількість тепла, принесеного шлаком в горн. У системі реалізований розрахунок ентальпії шлаку при температурі хорошій текучості, що відповідає в'язкості 0,3 Па.с, і заданої температури шлаку. При оптимізації шлакового режиму доменної плавки для зниження витрати палива перевагу слід віддавати шлакам з мінімальною надлишковою ентальпією, що забезпечує достатній нагрів горна.

Ступінь реалізації потенційних можливостей сіркопоглинаючої здатності шлаку в системі оцінюють шляхом розрахунку ступеня наближення системи «метал-шлак» на випуску з печі до рівноваги по сірці. Близькість фактичного коефіцієнта розподілу сірки ( $L_{s_{\text{факт}}}$ ) до рівноважного ( $L_{s^0}$ ) характеризує ступінь завершеності процесу десульфурації чавуну шлаком.

Таким чином, основними оптимальними значеннями критеріїв є в'язкість шлаку в межах 0,3 Па.с і температура початку плавлення  $1300^\circ\text{C}$ . В цьому випадку шлаки мають хорошу текучість, достатню дифузійну рухливість і мають тепловий резерв для реалізації десульфурації чавуну. У разі невідповідності прогнозних значень властивостей зазначеним величинам, що відображається на графіках відеокadra системи, змінюють хімічний склад і витрати компонентів доменної шихти таким чином, щоб в'язкість кінцевого шлаку становила не більше 0,3 Па.с і температура  $T_C$  не більше  $1300^\circ\text{C}$ .

На основі аналізу фактичних показників продуктів плавки в системі формується оцінка ситуації для обраного випуску чавуну і видаються рекомендації щодо коригування шлакового і теплового режимів плавки.

В цьому році разом з співробітниками теплоелектротехнічної лабораторії відділу металургії чавуну Інституту виконана «інформаційна прив'язка» та програмна реалізація системи «Шлак» для контролю та стабілізації шлакового режиму в умовах АСУТП ДП МК «Азовсталь».

### **Висновки.**

1. На основі експериментальних даних про властивості натуральних кінцевих доменних шлаків близьких за складом до шлаків вітчизняних заводів вдосконалені прогнозні моделі для розрахунку в'язкості кінцевого шлаку при температурі  $1400-1550^\circ\text{C}$  шляхом включення в структуру

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34  
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34  
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34*

моделі інтегрального показника шлакового розплаву параметра  $\Delta\epsilon$ , що відображає в комплексі індивідуальний характер впливу на в'язкість зарядового стану кожного компоненту складу шлаку. З використанням інтегральних параметрів шлакового розплаву, що характеризують зарядовий стан системи  $\Delta\epsilon$  і стехіометричну структуру шлаку  $\rho$ , розроблено рівняння для визначення в'язкості шлаку при будь-якій температурі, що відповідає температурі шлаку на випуску чавуну.

2. В результаті аналітичних досліджень прогнозна модель для визначення ентальпії шлаку  $\Delta H$  (кДж/кг) в залежності від інтегральних параметрів  $\Delta\epsilon$  і  $\rho$  була розвинена шляхом обліку температури розплаву  $T$ . Розроблена модель може бути використана для прогнозування ентальпії кінцевих доменних шлаків заводів України при зміні температури їх розплавів в діапазоні 1400 ÷ 1550 °С.

3. Вдосконалені моделі для оцінки в'язкості і ентальпії кінцевого шлаку програмно реалізовані в новій версії системи «Шлак» для оперативного контролю шлакового режиму доменних печей України. Разом з співробітниками теплоелектротехнічної лабораторії відділу металургії чавуну Інституту виконана «інформаційна прив'язка» та програмна реалізація системи «Шлак» в умовах АСУТП ДП МК «Азовсталь». Впровадження алгоритмічних і програмних засобів системи «Шлак» в системах АСУТП доменних печей забезпечує технологів інструментальними засобами для вибору оптимального шлакового режиму доменної плавки в сучасних нестабільних сировинних умовах з метою отримання чавуну необхідного хімічного складу з мінімальними енергетичними та сировинними витратами.

### Перелік посилань

1. *Алгоритмические* и программные средства системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки / Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, А.Ю. Гринько, Д.А. Степаненко // Системные технологии. Региональный сборник научных трудов. Днепропетровск, 2013. Вып. 3 (86). С. 9-14.
2. *Прогнозирование* физико-химических свойств оксидных систем / Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, Д.А. Степаненко. Днепропетровск : Пороги, 2013. 339 с.
3. *Прогнозирование* свойств доменных шлаков в современных условиях работы доменных печей Украины / Д.Н. Тогобицкая, А. И. Белькова, Д.А. Степаненко, Н.А. Цюпа, Ю.М. Лихачев // Фундаментальные и прикладные проблемы металлургии: сб. научн. трудов. 2018. Вып. 32. С. 118-136.
4. *Жило Н. Л.* Формирование и свойства доменных шлаков. Москва: Металлургия, 1974. 120с.
5. *Якубцинер Н.М.,* Манчинский В.Г., Панюшин Л.А. Вязкость и обессеривающая способность доменных шлаков // Сталь. 1968. №3. С. 385-391.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34  
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34  
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

6. *Шатоха В.И.* Проблемы выбора шлакового режима доменной плавки для металлургических предприятий Украины в современных условиях // Теория и практика металлургии. 1997. №1. С. 18-24.
7. *Способ* ведения доменной плавки: Пат. 62589 Украина, МКІ 7 С21В5/00 / А.В. Сокурченко, В.О. Шеремет, А.В. Кекух, Г.І. Орел, Г.П. Костенко, П.І. Оторвин и др.; №2003043309; заявл. 14.04.2003; опубл. 15.12.2003, Бюл. №12. 6с.
8. *Воскобойников В. Г., Дунаев Н. Е., Михалевиц А. Г. и др.* Свойства жидких доменных шлаков. Москва : Металлургия, 1975, 184 с.
9. *Жило Н.Л., Руднева А.В., Соколов Г.А., Цылев Л.М.* К исследованию вязкости первичных доменных шлаков // Изв. АН СССР. ОТН. 1957. №2. С. 27-35.
10. *Исследование* теплофизических свойств доменных шлаков и передельных чугунов / С.А. Гаврилко, Ю. В. Моисейко, С. А. Черепанов [и др.] / Металлургия (Наукові праці ЗДІА). Запоріжжя : ЗДІА, 2006. Вип. 13. С. 106-112.
11. *Степаненко Д.А., Белькова А.И.* Экспериментальные исследования и прогнозирование теплофизических свойств расплавов доменных шлаков // Матеріали МНТК «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні». Дніпро: НМетАУ, 2017. С. 80.

### Reference

1. *Togobitskaya D.N., Belkova A.I., Grinko A.YU. & Stepanenko D.A.* (2013). *Algoritmicheskiye i programmnyye sredstva sistemy kontrolya i upravleniya shlahkovym rezhimom domennoy plavki [Algorithmic and software tools for the control and management system of the slag mode of blast furnace melting]. Sistemyye tekhnologii. Regionalnyy sbornik nauchnykh trudov [System technologies. Regional collection of scientific papers], 2013, 3 (86), 9-14 [In Russian].*
2. *Prikhodko E.V., Togobitskaya D.N., Khamkhotko A.F. & Stepanenko D.A.* (2013), *Prognozirovaniye fiziko-khimicheskikh svoystv oksidnykh sistem [Prediction of physical and chemical properties of oxide systems].* Porogi, Dnepropetrovsk, 2013, 339 p. [In Russian].
3. *Togobitskaya D.N., Belkova A.I., Stepanenko D.A., Tsyupa N.A. & Likhachev Yu.M.* (2018). *Prognozirovaniye svoystv domennykh shlahkov v sovremennykh usloviyakh raboty domennykh pechey Ukrainy [Prediction of the properties of blast-furnace slags in modern conditions of blast furnaces in Ukraine]. Fundamentalnyye i prikladnyye problemy metallurgii [Fundamental and applied problems of metallurgy], 2018, 32, 118-136. [In Russian].*
4. *Zhilo N.L* (1974). *Formirovaniye i svoystva domennykh shlahkov [Formation and properties of blast furnace slags].* Moskva: Metallurgiya, 1974, 120 p. [In Russian].
5. *Yakubtsiner N.M., Manchinskiy V.G., Panyushin L.A.* (1968). *Vyazkost i obesserivayushchaya sposobnost domennykh shlahkov [Viscosity and desulfurizing ability of blast-furnace slags]. Stal [Steel], 1968, 3, 385-391. [In Russian].*
6. *Shatokha V.I.* (1997). *Problemy vybora shlahkovogo rezhima domennoy plavki dlya metallurgicheskikh predpriyatiy Ukrainy v sovremennykh usloviyakh [Problems of the choice of the slag mode of blast-furnace smelting for metallurgical enterprises*

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34  
 «Fundamentalnye i prikladnyye problemy chornoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34  
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34

- of Ukraine in modern conditions]. *Teoriya i praktika metallurgii [Theory and practice of metallurgy]*, 1997, 1, 18-24. [In Russian].
7. Sokurenko A.V., Sheremet V.O. Kekukh A.V., Orel G.I., Kostenko G.P. & P.I. Otorvin et al. (2003). Sposib vedennyi domennoyi plavky [The method of conducting blast furnace smelting]. *UA Patent No 62589*, 2003, 6 p. [in Ukrainian].
  8. Voskoboynikov V.G., Dunayev N.Ye. & Mikhalevich A. G. et al. (1975). *Svoystva zhidkikh domennykh shlakov [Properties of liquid blast-furnace slags]*. Moskva: Metallurgy, 1975, 184 p. [In Russian].
  9. Zhilo N.L. Rudneva A.V., Sokolov G.A. & Tsylev L.M. (1957). K issledovaniyu vyazkosti pervichnykh shlakov [On the study of the viscosity of primary blast furnace slag]. *Izvestiya AN SSSR [Bulletin of the USSR Academy of Sciences]*, 1957, 2, 27-35. [In Russian].
  10. Gavrilko S.A, Moiseyko YU. V. & Cherepanov S.A. et al. (2006). Issledovaniye teplofizicheskikh svoystv domennykh shlakov i peredelnykh chugunov [Investigation of the thermophysical properties of blast-furnace slags and pig iron]. *Metallurgiya (Naukovi pratsi ZDIA) [Metallurgy (Scientific works ZSEA)]*, Zaporizhzhya: ZDIA, 2006, 13, 106-112. (In Russian).
  11. Stepanenko D.A. & Belkova A.Y. (2017). Èksperimentalnye yssledovaniya y prohozyrovanye teplofyzicheskikh svoystv rasplavov domennykh shlakov [Experimental research and forecasting of thermophysical properties of blast furnace slag melts]. *Materialy MNTK «Informatsiyi tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni» [Materials of ISTC "Information Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering]*. Dnipro: NMetAU, 2017, 80 p. [In Russian].

**D.N. Togobitskaya**, Dr. Sci, professor, Head of Department, ORSID 0000-0001-6413-4823

**A.I. Belkova**, PhD, Senior Researcher, ORSID 0000-0001-8519-9351

**D.A. Stepanenko**, PhD, Senior Researcher, ORSID 0000-0002-0184-8295

**N.A. Tsyupa**, PhD (Engin.), Senior Researcher,

**Yu.M. Likhachev**, Researcher,

*Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine*

### **Development of the model complex of the expert system of control and management of the slag mode in modern mixed blast furnace conditions**

**Summary.** The aim of the work is to develop physicochemical bases for predicting the technological properties of finite blast furnace slags, algorithmic and software for the subsystem for diagnosing the slag regime of blast furnace smelting. Based on experimental data on the properties of natural finite blast furnace slags, predictive models for calculating the viscosity of the final slag at a temperature of 1400-1550 °C were improved by including in the model structure an integrated slag melt index of the parameter  $\Delta\epsilon$ , which reflects the individual effect. Using the integral parameters of the slag melt characterizing the charge state of the system  $\Delta\epsilon$  and the structure of the slag  $\rho$ , an equation was developed to determine the viscosity of the slag at any temperature corresponding to the slag temperature at the cast iron outlet. As a result of



analytical research, a predictive model for determining the enthalpy of slag depending on the integral parameters  $\Delta e$  and  $\rho$  and the temperature of the melt has been developed. It is shown that the viscosity characterizes the fluidity of the slag and provides desulfurizing and drainage properties. The calculation of the viscosity for the specified production of pig iron by the chemical composition of the slag is carried out according to the basic model of slag in a conditionally "homogeneous" state and taking into account its heterogeneity. This takes into account the presence of macroheterogeneous inclusions formed when using coke with low strength characteristics and due to incomplete combustion of pulverized coal fuel in the blast furnace. The improved models for evaluating the viscosity and enthalpy of the final slag are software implemented in the new version of the «Slag» system for operational control of the slag mode of blast furnaces in Ukraine. Rapid assessment of the slag mode using the «Slag» system as part of the DCS allows you to effectively and at a modern level solve the problems of optimizing the slag mode and the quality of pig iron in modern conditions of blast furnace smelting.

**Key words:** computer system, blast-furnace smelting, slag mode, physicochemical properties, forecast model.

**For citation:** *Tohobyts'ka D.M., Bel'kova A.I., Stepanenko D.O., Tsyupa N.O., Likhachov YU.M. Rozvytok fizyko-khimichnykh osnov, ekspertnoyi systemy kontrolyu ta upravlinnya shlakovym rezhymom domennoyi plavky v suchasnykh shykhtovykh ta tekhnolohichnykh umovakh.. [Development of physical and chemical bases, expert system of control and management of the slag regime of blast furnace smelting in modern charge and technological conditions.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».[Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy ] 2020, 34. 30-46. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-30-46*

*Стаття надійшла до редакції збірника 7.10.2020 року,  
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування.  
(Протокол засідання редакційної колегії №3 від 22 грудня 2020 р.)*