

А.М. ГРИЦЕНКО, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЗАЛІЗА МАГНЕТИТОВОГО

Мета. Видобуток та переробка залізорудної сировини неможлива без контролю вмісту заліза магнетитового на всіх етапах. Своєчасна і достовірна інформація про фізико-хімічні властивості залізної руди необхідні для управління процесом її переробки. Методи та засоби що нині застосовуються обмежують промисловців в обсягу проведених вимірювань, часі необхідному для одержання результатів вимірювань та точності їх проведення, що в свою чергу впливає на якості та собівартості кінцевої продукції, та збільшенню втрат.

Метод. Застосовано комплексний метод досліджень: аналіз фізико-хімічного складу залізних руд, теоретичні узагальнення з використанням теорії взаємодії електромагнітних полів з гірськими породами, методи математичного, імітаційного, комп'ютерного та натурального моделювання. Теоретичні й практичні методи планування експериментів, математичну обробку, аналіз результатів. У роботі використано теорії гірничої справи, електротехніки, алгоритмування та управління; для обробки та узагальнення отриманих даних застосовано методи чисельного, статистичного аналізу та теорії ймовірності.

Наукова новизна. Проведено аналіз та класифікацію методів кількісного аналізу заліза магнетитового. Для подальшої роботи обрано індуктивний метод як найбільш перспективний. Запропоновано макет автогенераторного магнітометричного перетворювача для визначення вмісту заліза магнетитового. Доведено високу точність метода та макета, що його реалізує на зразках залізної руди.

Практична значимість. Використання запропонованого автогенераторного магнітометричного перетворювача в засобах оперативного контролю якості залізних руд дозволить підвищити точність вимірювальних пристроїв оперативного контролю за рахунок зменшення інструментальної похибки.

Результати. Серед розглянутих методів кількісного аналізу магнетитових руд обрано індуктивний, як найбільш перспективний, точний, оперативний, простий в реалізації вимірювальних засобів. Запропоновано макет автогенераторного магнітометричного вимірювального засобу, що реалізує індуктивний метод, лабораторні дослідження дозволили визначити його точність.

Ключові слова: кількісний аналіз, магнетит, магнітна сприйнятливість, індуктивний метод, магнітометричний перетворювач, автогенератор, контроль якості, похибка вимірювань.

doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110-129-134

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Одним з основних показників рудної маси є якісний склад руди та рівень його стабільності.

Вимоги споживачів до якості рудо-мінеральної сировини зводяться, у випадку, до необхідності забезпечення:

певного рівня вмісту основних компонентів, тобто щоб середні значення компонентів у руді за певні календарні терміни максимально відповідали регламентованому чи узгодженому рівню;

мінімізації відхилень вмісту компонентів у рудному потоці від середнього значення за певні інтервали часу та між окремими партіями руди;

максимальної однорідності складу руди всередині кожної партії або за інтервал часу та ін.

Виконання цих вимог забезпечується шляхом вирішення технічного завдання, в основі якого лежать певні кількісно-якісні залежності між обсягами та якістю руди у цих обсягах [1].

У зв'язку з цим для оцінки технологічних властивостей магнетитових руд, а також при підготовці їх до видобутку і подальшої переробки та збагачення необхідно встановлення масової частки корисного мінералу.

Основним мінералом залізорудних родовищ є магнетит.

Особливістю магнетиту, за рахунок якого відбувається збагачення руди і методи кількісного контролю залізного компонента, є яскраво виражених магнітних властивостей [1]. Як правило, виділення заліза у складі руди виконується за допомогою магнітів, які розміщуються над рудним потоком, що рухається.

Значення масової частки заліза в магнетитових рудах і продуктах їх переробки можна використовувати для контролю технологічних процесів на рудозбагачувальній фабриці.

Аналіз досліджень та публікації. Кількісний аналіз передбачає встановлення масової частки компонента в пробі аналізованої рудної маси. Розрізняють три види кількісного аналізу: повний, частковий, загальний. При повному кількісному аналізі встановлюється кількісний

склад всіх компонентів, присутніх в аналізованій пробі. Повний аналіз потребує великих витрат часу та праці. При частковому аналізі визначається вміст лише необхідних компонентів. Загальний аналіз встановлює вміст кожного елемента аналізованому зразку незалежно від того, до складу яких сполук вони входять [2].

Методи кількісного аналізу можна розділити на дві групи: хімічні та фізичні. Хімічні методи засновані на використанні різних за типом хімічних реакцій: обмінних, осаджувальних, окисно-відновних та реакцій комплексоутворення. До хімічних методів відносяться гравіметричний та титри-метричний (об'ємний) методи аналізу.

Гравіметричний (ваговий) метод заснований на точному вимірі маси речовини відомого складу, хімічно пов'язаного з обумовленим компонентом і виділеного у вигляді сполуки або простої речовини.

Гравіметричний аналіз заснований на законі збереження маси речовини при хімічних перетвореннях і є найточнішим із хімічних методів аналізу (похибка складає 0,1 %), але тривалий і трудомісткий [2-4].

Титри-метричний (об'ємний) метод аналізу заснований на введенні точно обмірюваного обсягу розчину аналізованого речовини відміреного обсягу розчину відомої концентрації - титранта. Титрант вводиться доти, доки аналізована речовина повністю не прореагує з нею. Цей момент називають кінцевою точкою титрування та встановлюють за допомогою спеціальних хімічних індикаторів або інструментальних методів [2-4]. Серед хімічних методів кількісного аналізу об'ємний метод є найпоширенішим.

В даний час хімічні методи аналізу є основними і використовуються лише у хімічних лабораторіях. При цьому хімічні методи в багатьох випадках не відповідають вимогам до аналізу, таким як висока чутливість, оперативність, селективність і автоматизація. Крім того, хімічні методи аналізу внаслідок великої трудомісткості і високої ціни дозволяють виконувати лише вибірковий контроль якості залізородної сировини. Цих недоліків позбавлені фізичних методів аналізу.

Особливістю магнетиту, що забезпечує гарні передумови для використання фізичних методів кількісного контролю залізного компонента, є яскраво виражені магнітні властивості [5].

З огляду на те, що магнітна сприйнятливості магнетиту значно вище, інших мінералів, що входять до складу гірської породи [6], то магнетитову руду можна кваліфікувати як бінарну суміш, де корисний компонент - магнітний, інші складові – немагнітні. Отже, вміст заліза магнетитового в рудах можна визначити за величиною магнітної сприйнятливості магнетиту, що входить до складу породи.

Для вимірювання магнітної сприйнятливості рудного матеріалу при використанні фізичних методів контролю вмісту заліза магнетитового ($Fe_{магн.}$), відомі та широко застосовують такі методи: індуктивний, індукційний і пондеромоторний [6].

Індуктивний метод найбільш поширений. Метод заснований на зміні індуктивності L електричної вимірювальної котушки при внесенні феромагнітного матеріалу з деякою магнітною сприйнятливостю χ в змінне магнітне поле, створюване даною котушкою, або ж на зміну взаємодуктивності двох магнітопов'язаних котушок, якщо сердечником є досліджуваний феромагнітний матеріал [7]

$$L = f(\chi).$$

Індукційний метод визначення магнітної сприйнятливості залізородної сировини заснований на явищі електромагнітної індукції. Суть якого полягає в тому, що при русі частинок феромагнітного матеріалу певної крупності і з певною швидкістю в зазорі постійного магніту, на якому намотана електрична котушка, за рахунок зміни довжини повітряного зазору змінюється величина напруженості магнітного поля H , що призводить до наведення ЕРС в котушці. Величина ЕРС залежить від магнітної сприйнятливості часток χ , співвідношення довжини зазору і крупності частинок d_n , а також від швидкості руху частинок u_n

$$e = f(\chi, d_n, u_n).$$

Пондеромоторний метод визначення магнітної сприйнятливості проб залізородної сировини (метод Фарадея) заснований на вимірюванні сили тяжіння F , що діє на пробу, розміщену в постійному магнітному полі. При цьому величина сили пропорційна величині магнітної сприйнятливості χ

$$F = k \chi .$$

Проте, для цього необхідна наявність великої напруженості магнітного поля з малим його градієнтом, інакше зі зміною χ змінюється картина поля, що призводить до похибки. Іншим рішенням є застосування форми магнітних полюсів з ізодинамічним полем в зазорі магніту [6].

Метод може бути застосований для контролю якості проб подрібненої залізної руди або для контролю якості пульпи в пульпопроводі. Однак слід зазначити, що засоби контролю мають підвищене енергоспоживання, і технічно складні.

В результаті аналізу розглянутих методів контролю магнітної сприйнятливості в рудному матеріалі обрано індуктивний метод, як найбільш точний, технічно простий і перспективний при створенні засобів визначення вмісту заліза магнетитового.

Постановка задачі. Розглянути можливості реалізації індуктивного методу контролю вмісту заліза магнетитового, найбільш оптимальний спосіб реалізувати в макетному зразку. Дослідити доцільність використання запропонованого макетного зразка для визначення вмісту заліза магнетитового в зразках руд з оцінкою точності.

Викладення матеріалу та результати. Можливість визначення вмісту заліза магнетитового за опосередкованою величиною магнітної сприйнятливості зразка руди можливе, лише при достатньо тісному кореляційному зв'язку цих величин.

Для переважної більшості родовищ магнетитових кварцитів, у тому числі Криворізько-Кременчуцького басейнів, відмінною особливістю залежності магнітної сприйнятливості гірських порід і руд (χ) від кількості в них магнетиту ($Fe_{\text{магн.}}$), є високий коефіцієнт кореляції ($r = 0.85-0.95$), що є сприятливою та основною передумовою для кількісних визначень заліза магнетитового в рудах та породах магнітометричним методом.

Як приклад на рис. 1 наведено залежності $Fe_{\text{магн.}} = f(\chi)$, які мають лінійний характер, але відрізняються одна від одної магнітними властивостями руд та порід різних родовищ.

Для реєстрації магнітної сприйнятливості залізних руд, розроблено функціональну схему і виготовлений макет автогенераторного магнітометричного перетворювача (МП - реєстратора магнітної сприйнятливості). Принцип дії якого засновано на вимірюванні індуктивності електричної котушки, в змінне магнітне поле якої поміщено досліджувану гірську породу) за допомогою автогенератора, частота коливань якого залежить від індуктивності.

При розробці автогенераторного МП встановлено, що найбільш раціонально використовувати операційний підсилювач, в колі зворотного зв'язку якого встановлено фазо-зсувні або резонансні елементи: міст Віна, подвійний Т-подібний міст, фазо-зсувний RC-ланцюг, коливальний контур [8].

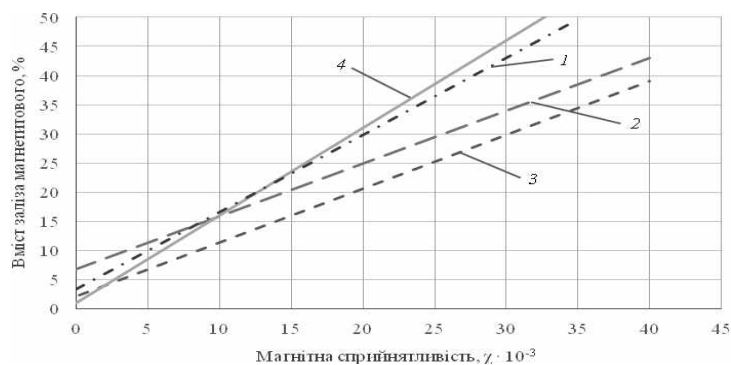


Рис. 1. Залежність вмісту $Fe_{\text{магн}}$ від магнітної сприйнятливості гірських порід для залізних родовищ Криворізько-Кременчуцького басейнів: 1 - Першотравневе; 2 - Скелюватське; 3 - Глеюватське; 4 - Горішньо-Плавнінське

У таких схемах частота коливань визначається виключно параметрами цих елементів і практично не залежить від інших факторів, таких як зміна напруги живлення, коефіцієнта підсилення і інших його параметрів.

Ефективна магнітна сприйнятливості $S\chi$ досліджуваної гірської маси визначається по співвідношенню величин частоти коливань на виході МП в повітрі (f_0) і з гірничою масою (f_1)

$$S_x = \frac{(f_0)^2 - (f_1)^2}{(f_1)^2} = \left(\frac{f_0}{f_1} \right)^2 - 1. \quad (1)$$

Дослідження магнітометричного перетворювача полягає в вимірюванні ефективної магнітної сприйнятливості, і побудови залежності вимірюваної величини з вмістом магнетитового заліза, визначеного в лабораторії хімічним способом.

Лабораторна установка (рис. 2) для визначення ефективної магнітної сприйнятливості складається з соленоїда, діаметром 180 мм і висотою 230 мм (дріт намотаний в один шар виток до витка), електронної плати автогенераторного магнітометричного перетворювача, блоку живлення, цифрового осцилографа, ввімкненого в режимі вимірювання частоти (функціональну схему установки наведено на рис. 3) і електронних ваг, з точністю вимірювання 0,1 г.

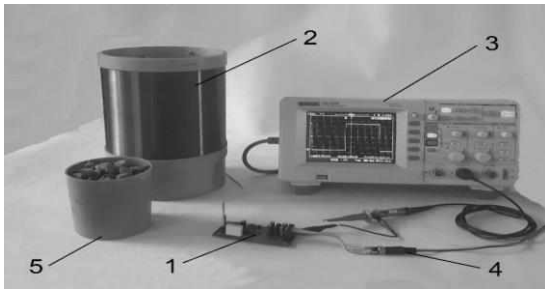


Рис. 2. Загальний вигляд лабораторної установки визначення магнітної сприйнятливості залізної руди на основі автогенераторного магнітометричного перетворювача: 1 - електронна плата автогенераторного магнітометричного перетворювача; 2 - соленоїд; 3 - цифровий осцилограф; 4 - штекер блока живлення; 5 - залізна руда в циліндричній ємності

Для вимірювань було відібрано 30 зразків залізної руди, масою 620-730 г, з вмістом заліза в діапазоні 0,4-31,4 %.

На першому етапі зразки по черзі поміщалися у внутрішню порожнину котушки, і реєструвалася зміна частоти в коливальному контурі f_1 відносно частоти контуру без зразка f_0 яка дорівнювала 1040,3 Гц. За цим значенням, за формулою (1) обчислювалося значення S_x .

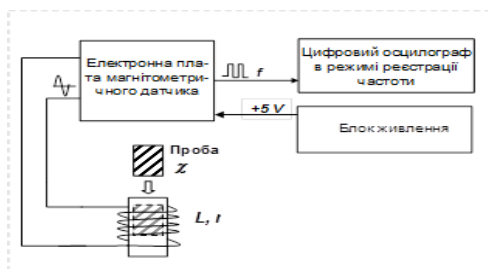


Рис. 3. Функціональна схема лабораторної установки для вимірювання магнітної сприйнятливості зразків залізної руди

На четвертому етапі проведено зіставлення результатів (табл. 1), побудова залежності $Fe = f(x_0)$, обчислення розрахункового вмісту корисного компонента в пробах за отриманою залежності $Fe_{розр.}$. Оцінка збіжності результатів вимірювань.

Таблиця 1

Результати лабораторних випробувань автогенераторного МП

Номер зразка	Частота f_1	Магнітна сприйнятливості, S_x	Вага m , г	Питома магн. сприйнятливості, $\chi_0 \cdot 10^{-3} \text{Г}^{-1}$	Fe $x/a, \%$	$Fe_{розр.}, \%$	абс. похибка, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1070,074	0,000139	680,6	0,000204232	1,90	1,30	0,6
2	1070,195	0,000365	724,6	0,000503726	2,4	1,60	0,8
3	1071,589	0,002973	652,7	0,004554926	4,8	5,61	0,81
4	1081,3	0,021233	692,2	0,030674661	30,9	31,48	0,58
5	1070,066	0,000124	654,7	0,0001894	0,4	1,29	0,89
6	1080,597	0,019905	664,3	0,029963872	31,1	30,78	0,32
7	1079,223	0,017313	720,3	0,024035818	24	24,91	0,91
8	1076,299	0,011808	664,8	0,017761733	19,6	18,69	0,91
9	1079,143	0,017163	736,5	0,023303462	23,8	24,18	0,38
10	1078,383	0,01573	685,7	0,022940061	23	23,82	0,82
11	1076,31	0,011829	657	0,018004566	18,5	18,93	0,43
12	1077,332	0,013751	693,8	0,019819833	19,9	20,73	0,83
13	1078,782	0,016482	690,9	0,02385584	24,5	24,73	0,23
14	1076,661	0,012489	673,2	0,018551693	20,2	19,48	0,72

1	2	3	4	5	6	7	8
15	1075,832	0,01093	638,1	0,017128977	18,8	18,07	0,73
16	1076,677	0,012519	707,6	0,017692199	19,2	18,62	0,58
17	1074,756	0,008909	690,1	0,012909723	13,4	13,89	0,49
18	1079,674	0,018164	719	0,025262865	26,5	26,12	0,38
19	1077,004	0,013135	659,8	0,019907548	20,3	20,82	0,52
20	1079,267	0,017396	728,2	0,023889041	24,5	24,76	0,26
21	1077,021	0,013166	665,5	0,019783621	21,2	20,70	0,5
22	1081,093	0,020843	681,8	0,030570549	31,4	31,38	0,02
23	1077,369	0,013822	668	0,020691617	21,9	21,60	0,3
24	1078,591	0,016123	661,5	0,024373394	25,9	25,24	0,66
25	1077,142	0,013395	645,5	0,020751356	22,3	21,65	0,65
26	1078,789	0,016496	678,8	0,024301709	25,3	25,17	0,13
27	1079,965	0,018713	723,8	0,025853827	27	26,71	0,29
28	1070,777	0,001453	630,2	0,002305617	3,4	3,39	0,01
29	1074,74	0,008879	620,9	0,014300209	15,1	15,26	0,16
30	1073,516	0,006582	653,2	0,010076546	10,8	11,08	0,28
						СКО:	0,27

Графік залежності вмісту заліза в пробах від питомої магнітної сприйнятливості наведено на рис. 4.

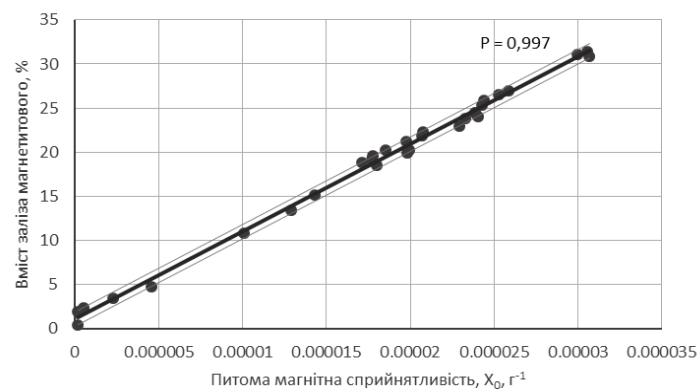


Рис. 4. Графік залежності вмісту заліза магнетитового від питомої магнітної сприйнятливості

З графіка, наведеного на рис. 4, можна стверджувати, що залежність прямолінійна і прямо пропорційна. Аналітичний вираз має вигляд

$$Fe = 990399.957758946 \cdot \chi_0 + 1.10, \quad (2)$$

де Fe - вміст заліза магнітного в зразках, %; χ_0 - питома магнітна сприйнятливості матеріалу зразка, $г^{-1}$.

Підставивши значення χ_0 , отримані на другому етапі, в аналітичний вираз (2) отримано розрахункове значення $Fe_{розр.}$ і зіставивши з Fe x/a , визначено абсолютну похибку вимірювань, результати наведено в табл. 1.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Серед розглянутих методів кількісного аналізу магнетитових руд обрано індуктивний, як найбільш перспективний, точний, оперативний, простий в реалізації вимірювальних засобів.

Запропоновано макет реалізації автогенераторного магнітометричного вимірювального засобу, що використовує індуктивний метод контролю.

Запропонована модель автогенераторного магнітометричного перетворювача дозволяє визначити вміст $Fe_{магн.}$ у зразках руди. При цьому середньоквадратичне відхилення показань становить 0,27, а похибка вимірювань 0,81 %.

Список літератури

1. **Кожев, Х.Х.** Способы управления качеством руд при подземной добыче / **Х.Х. Кожев, Г.Н. Хугаева** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2010. – №4. – С. 210–214.
2. Основы аналитической химии. В 2 кн. - Кн. 2. Методы химического анализа: Учеб. для вузов / **Ю.А. Золотов** и др.]. Под редакцией академика Ю.А. Золотова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 494 с.
3. Аналитическая химия. Проблемы и подходы. В 2-х т. **Р. Кельнер, Ж. М. Мерме, М. Отто, Г. М. Видмер.** Перевод под редакцией академика Ю. А. Золотова. – М.: Мир, 2004. Т.1. – 600 с.
4. **Харитонов Ю.Я.** Аналитическая химия. Аналитика. В 2-х кн. / **Ю.Я. Харитонов** – М.: Высшая школа, 2001. - Кн.1. – 615 с.
5. **Кожев Х.Х.** Способы управления качеством руд при подземной добыче / **Х.Х. Кожев, Г.Н. Хугаева** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2010. – №4. – С. 210–214.
6. **Марюта А.Н.** Контроль качества минерального сырья / **А.Н. Марюта, П.К., Младецкий, П.А. Новицкий.** – Київ : Техніка, 1976. – 220 с.
7. Пат. №121880 Україна, G01V 3/28. Пристрій для магнітного каротажу геофізичних свердловин / **А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник та ін.**; заявл.07.04.17; опубл. 26.12.2017; Бюл. №24.
8. **Дрыга В.В.** Непрерывный контроль качества магнетитовых руд наленточных конвейерах в условиях горно-обогатительных комбинатов / **В.В. Дрыга** /Дисс. к.т.н., Кривой Рог, 2013. – 233 с.
9. **Гриценко А.Н.** Разработка измерительного канала для оперативного контроля содержания железа магнитного во взрывных скважинах / **А.А. Азарян, А.А. Трачук, А.Н. Гриценко, Д.В. Швец** // Центрально-український науковий вісник. Технічні науки, 2019. - №1. – С. 138-145.
10. **Gritsenko A.** Research of opportunities for increasing control accuracy of femag content in blastholes// **A. Azaryan, A. Trachuk, D. Shvets, A. Gritsenko**// 14-th international conference “Science and society”: Hamilton, Canada, 20 september 2019 // Materials conference Hamilton – 2019 - pp. 4-9.

Рукопис поано до редакції 17.03.22

УДК 004.451.25: [622.788:621.867]

В.Й. ЛОБОВ, Л.І. ЄФІМЕНКО, М.П. ТИХАНСЬКИЙ, кандидати техн. наук, доц.,
А.М. ТИХАНСЬКА, асистент, Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНИМ ОБРОБЛЕННЯМ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОТУНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Мета. Метою цієї роботи є підвищення якості термічного оброблення залізорудних котунів та ефективності роботи виробництва за рахунок розробки нових більш точних способів управління регламентними параметрами технологічних зон, враховуючи вплив на них сусідніх зон.

Методи дослідження. В роботі використані методи знаходження оптимальних рішень на основі математичного моделювання, методи системного аналізу, теорії оптимальних рішень, а також методи досліджень розроблені в теорії автоматичного керування; методи обробки випадкових процесів і математичної статистики, аналіз літературних і патентних джерел, наукове узагальнення раніше виконаних досліджень.

Наукова новизна. Пропонуються нові більш точні способи керування термічним обробленням залізорудних котунів за допомогою нейронної мережі. На основі аналізу існуючих способів управління процесом термічної обробки залізорудних котунів на машині конвеєрного типу обґрунтовано необхідність розробки нових більш точних способів управління регламентними параметрами технологічних зон, враховуючи вплив на них сусідніх зон.

Досліджено можливість підтримки регламентних параметрів технологічних зон з використанням технологій штучних нейронних мереж. При цьому керування відбувається за рахунок визначеної у роботі структури штучної нейронної мережі для технологічної зони, яка враховує взаємозв'язок з сусідніми зонами, фізико-хімічні властивості котунів і швидкість переміщення візків конвеєрної стрічки протягом технологічної зони.

Практична значимість. Виконано комп'ютерне моделювання технологічної першої зони сушіння котунів, яка взаємопов'язана з другою зоною сушіння і зоною охолодження, що дозволило створити модель системи, яка забезпечила стабілізацію температури верхнього шару котунів у першій зоні сушіння на базі нейромережевої адаптації параметрів температури теплоносія газоповітряного потоку.

Запропоновано принципи побудови автоматизованої системи та алгоритми керування термічним обробленням залізорудних котунів за допомогою нейронної мережі, що відрізняються тим, що пропонуються нові більш точні способи управління регламентними параметрами технологічних зон, з врахуванням впливу на них сусідніх зон.

Результати. Керування термічним обробленням залізорудних котунів за допомогою нейронної мережі дозволяє враховувати збурюючі впливи зумовлені регламентними параметрами технологічних зон та підтримувати показники якості управління в заданих межах.

Ключові слова: залізорудні котуни, машина конвеєрного типу, технологічна зона, процес сушіння, нейронна мережа.