

**В. Г. Кисляков**<sup>1</sup>, к.т.н., зав. відділу, ORCID 0000-0002-1775-5050

**Д. М. Тогобицька**<sup>1</sup>, д.т.н., проф., зав. відділу, ORCID 0000-0001-6413-4823

**Л. С. Молчанов**<sup>1</sup>, к.т.н., зав. відділу, ORCID 0000-0001-6139-5956

**В. І. Єлісєєв**<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-4999-8142

**Ю. М. Ліхачов**<sup>1</sup>, н.с.

<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСІВ ПОЗААГРЕГАТНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЧАВУНУ

**Анотація.** Метою роботи є виконання узагальнюючого аналізу досліджень щодо моделювання процесів позапічної обробки чавуну. Математичні моделі класифіковані відповідно до основних принципів моделювання. Приведено опис різних моделей, які будуються на різних засадах в залежності від їх типу та відмінності між ними. Проведено більш детальний аналіз деяких фундаментальних моделей та виразів, які були отримані при їх побудові. Наведено приклад моделей, що побудовані по експериментальним даним. Моделі нейронних мереж складаються зі штучних нейронів, які з'єднані один з одним за допомогою сполучних ваг, тобто параметрів моделі, у вигляді шарів. Нейрони – це набір математичних функцій, які модифікують вхідні дані для отримання оцінки бажаного результату. Велика кількість мережевих параметрів робить навчання нейронної мережі пов'язана обтяжливим обчислювальним процесом. Велика кількість мережевих зв'язкових ваг, які необхідно оптимізувати, при навчанні таких моделей зазвичай потребує велику кількість вхідних даних. Приведені вітчизняні досягнення в побудові математичних моделей процесу позапічної обробки чавуну. Описані принципи створення інтегрованої бази даних, що узагальнює інформацію про параметри самих різних технологій знесірнення чавуну, яка включає розроблений системний блок інформаційно-пошукової системи; розроблена концепція експертної системи прийняття рішень з управління технологічними процесами та вибір раціональної технології позапічної десульфурзації чавуну; описаний варіант розробленого інформаційно-математичного забезпечення експертної системи модулем позапічної обробки чавуну зернистим магнієм та коінжекцією магнію і вапна; приведені отримані емпіричні рівняння для визначення кінцевого вмісту сірки у розплаві чавуну, а також вираз для оцінки питомої витрати металевого магнію в реагенті. Описані моделі, які присвячені чисельному та фізичному моделюванню явищ, які виникають у ковші під час інжектування, а також вивченню закономірностей газопорошкового потоку.

**Ключові слова:** десульфурация, чавун, модель, класифікація, аналіз.

**Посилання для цитування:** Аналіз моделей процесів позаагрегатного оброблення чавуну / В. Г. Кисляков, Д. М. Тогобицька, Л. С. Молчанов, В. І. Єлісєєв, Ю. М. Ліхачов // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної*

**Стан питання.** Позапічна десульфурація чавуну вже тривалий час є самостійним переробом видалення сірки у виробництві сталі. Сірководочищення чавуну зазвичай проводять у ковші за допомогою реагенту, який або інжектують у металеву ванну, або додають на її поверхню. Типовими реагентами, що використовуються у промисловості, є магній (Mg), вапно (CaO), карбід кальцію (CaC<sub>2</sub>), сода (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) та їх суміші.

З появою інжекційної металургії в заводській практиці почали з'являтися дослідження, присвячені практичним аспектам десульфурації чавуну за допомогою інжекційної фурми. Розрізняють моно- та спільну ін'єкцію реагентів з використанням інертного газу-носія (наприклад, азот або аргон), вуглеводні, такі як природний газ. Існуючу раніше практику десульфурації в торпедних ковшах зараз замінила обробка у домених або заливальних ковшах, які дозволяють збільшити час перебування реагенту та полегшити видалення шлаку.

Процес моноінжекції магнію розроблений в Інституті чорної металургії Академії наук України експлуатується в основному українськими та китайськими виробниками сталі. Використовується занурювальна фурма або оснащена випарною камерою, або без неї. Методи десульфурації чавуну шляхом механічного перемішування були впроваджені в Німеччині і Японії. Лопатева мішалка Rheinstahl лише частково занурена в металеву ванну для забезпечення турбулентного перемішування потоків у верхній частині металеві ванни. Процес реактора Канбара (KR) був розроблений компанією Nippon Steel та являє собою процес десульфурації чавуну, який використовує обертову занурену фурму, оснащену чотирма лопатями ротора при цьому реагент додається поверх металеві ванни, Процес KR дозволяє досягати низького вмісту сірки але характеризується більшими втратами металу і підвищеним вогнетривким зносом.

Оскільки отримання прямих вимірювань під час роботи ковша супроводжується відомими труднощами, першими були спроби прогнозувати загальну кінетику десульфурації в масштабі процесу за допомогою математичного моделювання. На додаток до термодинамічно-кінетичних аспектів дослідження були спрямовані на вивчення різних фізичних аспектів десульфурації чавуну, включаючи потоки рідини, змішування ванни, введення реагенту, і дисперсія реагентів.

При розробці кінетичних моделей основна увага зосереджена на моделюванні процесу десульфурації чавуну за допомогою керованого

емпіричними даними моделювання, а також підходу, що базується на механізмі хімічної реакції. У дослідженнях з чисельного та фізичного моделювання десульфурзації чавуну увагу здебільшого зосереджено на описанні потоку рідини, змішуванні у ванні, дисперсії та проникненні частинок.

Про тип наведених вище моделей можна сказати, що вони мають структуру «білого» ящика, які дають вичерпні описи, що враховують динаміку тепло-, імпульсо- та масопереносу але мають обчислювальну складність. Більш обчислювально легкі підходи представлені як підходи зі зосередженими параметрами, які мінімізують дисперсію вихідних параметрів процесу. А для їх вичерпного опису треба великі обчислювальні ресурси. Існують роботи, в яких запропонована модель «чорного» ящика для процесу десульфурзації на основі карбиду, реалізовану в виді нейронної мережі. Однак структура моделі «чорного» ящика не дозволяє вивчити питання фундаментального дослідження. Так виник підхід, який пропонує динамічну структурну модель «сірого» ящика.

**Мета роботи.** Узагальнюючий аналіз досліджень щодо моделювання процесів позапічної обробки чавуну.

**Основні результати дослідження.** Математичні моделі були класифіковані відповідно до основних принципів моделювання (Рис. 1). Фундаментальні моделі мають на меті описати динаміку процесу за допомогою фізико-хімічних основ і можуть бути розділені на три підкатегорії залежно від того, як описується кінетика. Моделі мінімізації вільної енергії системи припускають, що весь спостережуваний об'єм перебуває в термодинамічній рівновазі в будь-який момент. Моделі реакційного об'єму наближено описують гетерогенні реакції, враховуючи масообмін між об'ємом і одним або кількома реакційними об'ємами, які досягають своєї термодинамічної рівноваги в будь-який момент. У моделях реакційної рівноваги збереження імпульсу не враховується, а масові потоки між об'ємами вважаються довільними. Моделі реакції кінцевого об'єму розв'язують рівняння імпульсу в заданій геометрії і таким чином забезпечують фізичну основу для масових потоків між спостережуваними об'ємами; це, по суті, моделі обчислювальної гідродинаміки у поєднанні з кінетичними описами. Третьою основною категорією фундаментальних моделей є моделі поділу реакцій, які описують гетерогенні міжфазні реакції за допомогою теорії прикордонного шару. Ключовими параметрами таких реакцій є розмір міжфазної площі, ефективність масопереносу до та від поверхні розділу та швидкість міжфазної реакції. Для реакцій метал–шлак зазвичай можна припустити, що швидкість міжфазної реакції є набагато вищою, ніж стадії масообміну. У простих

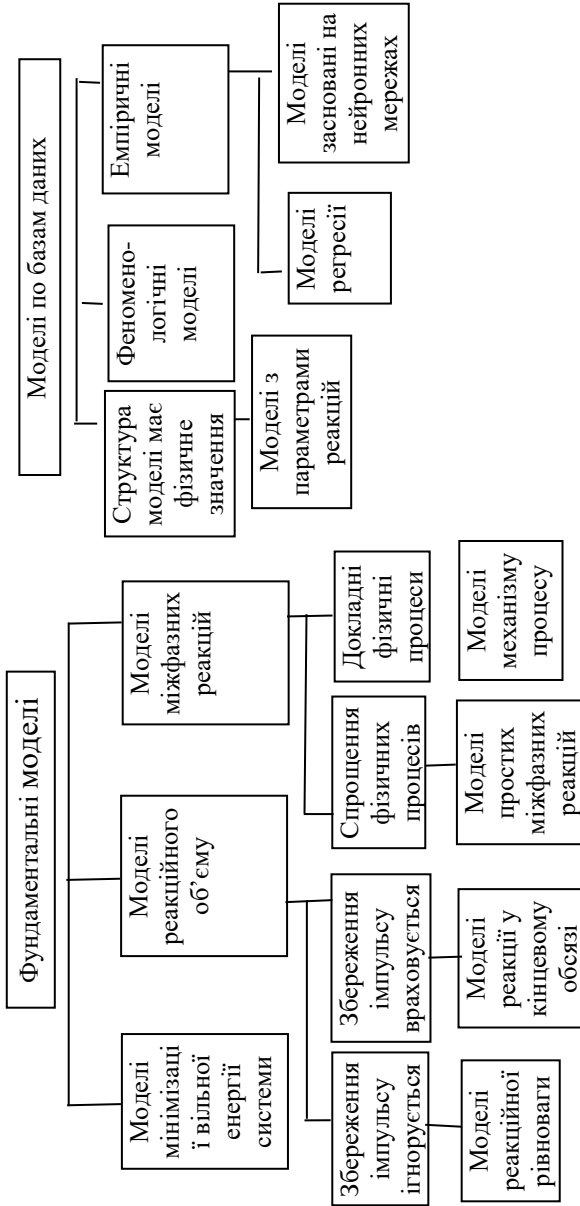


Рисунок 1 – Схематичне зображення запропонованої класифікації моделей.

моделях інтерфейсу реакцій терміни масового переносу включені в постійну часу, яка залишається постійною для певних робочих умов. Моделі інтерфейсу реакцій, які спрямовані на опис зв'язку між швидкостями масообміну та міжфазними площами на основі робочих та технологічних параметрів, позначених моделями механізмів процесу. Емпіричні моделі відрізняються від фундаментальних тим, що для моделей такого типу ідентифікація параметрів моделі проводилася певною мірою на основі даних процесу. Ступінь точності опису процесу залежить від рівня експертних знань, доступних у системі. Подальша кластеризація моделей, керованих даними, може бути зроблена на основі структури моделі, яка або походить від фізико-хімічних явищ (моделі параметризованих реакцій), або має загальну математичну форму (моделі лінійної регресії та моделі штучної нейронної мережі).

Однак керовані даними моделі з фізично значущою структурою відрізняються від суто механістичних моделей, оскільки моделі, які підпадають під цю категорію, містять деякі, зазвичай безрозмірні, параметри, які ідентифікуються на основі даних змішаних моделей.

Серед фундаментальних моделей можна виділити наступні. Модель, запропонована Oeters [1] зосереджена на реакції десульфурзації на поверхні введених частинок реагенту. Модель враховувала як дифузію прикордонного шару, так і дифузію твердого тіла в шарі продукту реакції. Загальний показник виражався як:

$$\frac{d[\%S]}{dt} = - \frac{\dot{m}_{CaO} t_{p,res}}{m_{bath}} \frac{\rho_L}{\rho_{CaO}} \frac{D_S}{\delta} \frac{3}{\bar{r}_p} ([\%S] - [\%S]^*), \quad (1)$$

де  $m_{CaO}$  - швидкість введення CaO,  $m_{bath}$  - маса ванни,  $\rho_L$  - густина гарячого металу,  $\rho_{CaO}$  густина CaO,  $\bar{r}_p$  - середній радіус частинки,  $D_S$  - коефіцієнт дифузії маси сірки,  $\delta$  - товщина дифузійного прикордонного шару,  $t_{p,res}$  - час перебування частинок у металевій ванні.

Товщину дифузійного прикордонного шару визначали за допомогою кореляції Ранца-Маршалла. Міжфазний вміст сірки  $[\%S]^*$  було розв'язано чисельно шляхом встановлення молярного потоку переносу сірки в прикордонному шарі, що дорівнює твердотільній дифузії сірки в шарі CaS. Передбачалося, що товщина шару CaS відповідає параболічному закону.

Спроба створити модель, що поєднує термодинамічно-кінетичний опис десульфурзації з полем швидкості, викликаним введенням реагенту, була опублікована Ель-Каддахом і Секелі [2]. Ця модель складалася з трьох компонентів: 1) розв'язок двовимірних турбулентних рівнянь Нав'є-Стокса, 2) динамічний баланс вмісту сірки та 3) співвідношення термодинамічної рівноваги.

$$\text{Sh} = \frac{\beta d_p}{D} = \left[ 2 + 0,4 \left( \frac{\dot{\epsilon} d_p^4}{\nu^3} \right)^{1/4} \text{Sc}^{1/3} \right] \phi_p, \quad (2)$$

де  $\dot{\epsilon}$  - швидкість дисипації енергії,  $\nu$  - кінематична в'язкість,  $\phi_p$  - кінематична в'язкість.

Динамічний баланс вмісту сірки був сформульований з використанням виразу швидкості першого порядку на основі теорії пограничного шару. Коефіцієнт масопередачі був описаний за допомогою моделі Сано, який описує масоперенесення зважених частинок у ванні із перемішуванням в барботажних колонах. Модель реакції Ель-Кадда та Секелі була підтверджена експериментальними вимірюваннями параметрів на 6-тонній лабораторній установці та у 40-тонному промисловому ковші.

Deo and Grieverson [3] запропонував математичну модель тигельних експериментів з десульфурації алюмінійвмісного розплавленого чавуну введенням суміші 40% CaO – 40% CaF<sub>2</sub> – 20% Al<sub>2</sub>O. В цій моделі загальна швидкість десульфурації була визначена як сума швидкостей тимчасової та постійної реакцій. Швидкості були сформульовані на основі теорії прикордонного шару, припускаючи, що площа перехідної реакції відповідає площі поверхні частинок, а площа постійної реакції відповідає номінальній площі контакту метал-шлак. Коефіцієнт розподілу сірки був оцінений на основі результатів експериментів з тиглями, тоді як коефіцієнти масопередачі були розраховані за підходом Engh. Вони повідомили, що розраховані коефіцієнти масопередачі тимчасової та постійної реакцій були майже однаковими.

Фундаментальна модель, запропонована Deo and Boom [4] фокусується на десульфурації за допомогою CaC<sub>2</sub> у торпедному ковші. Загальна швидкість десульфурації вважається сумою постійних (метал-шлак) і тимчасових (метал-реагент) реакцій. Припускаючи гарне змішування в металевій ванні, швидкість постійної реакції була сформульована відповідно до виразу швидкості першого порядку, в якому передбачалося, що швидкість масопереносу контролюється масопереносом у дифузійному прикордонному шарі металеві фази.

Що стосується перехідної реакції, було зроблено подальше розрізнення між частинками, які проникли в металеву ванну, і тими, які залишилися захопленими бульбашками газу. Таким чином, загальний вираз для видалення сірки був сформульований як

$$\frac{d[\%S]}{dt} = - \frac{1}{V_{\text{bath}}} (a + b + c), \quad (3)$$

де  $V_{\text{bath}}$  - об'єм металевої ванни, тоді як  $a$ ,  $b$ ,  $c$  позначають швидкість постійної реакції, частинок, що проникли в металеву ванну, і частинок, захоплених бульбашками газу, відповідно.

$$\begin{aligned} a &= A_{\text{slag}} \beta_L, \\ b &= \frac{L \dot{m}_p}{\rho_S} (1 - f_{p,b}) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{6 \beta_p t_{p,\text{res}}}{d_p L_S} \right) \right], \\ c &= \frac{L \dot{m}_p}{\rho_S} f_{p,b} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{2,38}{d_b} m \frac{T_{\text{bath}}}{298} \frac{\beta_b t_{b,\text{res}} \dot{V}_{G,\text{STP}} \rho_S}{\dot{m}_p f_{p,b} L_S} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

де  $A_{\text{slag}}$  - номінальна площа поверхні метал-шлак,  $\beta_L$  - коефіцієнт масопередачі на стороні металу постійної реакції,  $\dot{m}_p$  - швидкість подачі частинок,  $\rho_S$  - щільність шлаку,  $f_{p,b}$  - частка  $\text{CaC}_2$  частинки, які знаходяться всередині бульбашок на межі метал - бульбашка,  $\beta_p$  - коефіцієнт масопередачі прониклих частинок,  $t_{p,\text{res}}$  - час перебування прониклих частинок,  $d_p$  - діаметр частинок,  $L_S$  - коефіцієнт розподілу сірки,  $d_b$  - діаметр бульбашки,  $m$  (безрозмірний) коефіцієнт ефективної площі,  $T_{\text{bath}}$  - температура ванни,  $\beta_b$  - коефіцієнт масопередачі захоплених частинок,  $t_{b,\text{res}}$  час перебування бульбашок,  $\dot{V}_{G,\text{STP}}$  - об'ємна швидкість закачування газу-носія.

У прикладі розрахунку в якості реагенту  $\text{CaC}_2$ , внески постійного (а), часткового (b) і бульбашок (c) було показано, що це 30,6%, 41,8% і 27,6% відповідно.

Zou [5] запропонував модель десульфурації чавуну за допомогою  $\text{CaC}_2$ , Mg або їх суміші. Вважалося, що десульфурація, при застосуванні  $\text{CaC}_2$  заснована на дії сірки, складається з тимчасових і постійних реакцій, тоді як реакції магнію з розчищеною сіркою були розділені на гетерогенну реакцію першого порядку з твердим Mg і очевидну гомогенну реакцію другого порядку з розчиненим Mg. Однією з нових особливостей моделі є те, що вона включає ефект змішування у ванні при десульфурації чавуну без врахування та вирішенні рівняння імпульсу. Загальна швидкість десульфурації для спільного введення  $\text{CaC}_2$  і Mg було виражено як

$$\frac{d[\%S]}{dt} = - \underbrace{\frac{6 \rho_L t_{\text{res},p} \dot{V}_{G,\text{tot}}}{m_{\text{bath}}} \beta_p \left\{ [\%S] \exp \left( - \frac{t_{\text{mix}}}{t_{\text{inj}}} \right) - [\%S]_b \right\}}_{\text{Перехідна реакція (Mg) з [S]}}$$

$$\underbrace{-0.4167K\rho_L [\%S] \exp\left(-\frac{t_{\text{mix}}}{t_{\text{inj}}}\right) [\%Mg] \exp\left(-\frac{t_{\text{mix}}}{T_{\text{inj}}}\right)}_{\text{Гомогенна реакція [Mg] з [S]}}$$

$$\underbrace{-\frac{6f_{p,L} \gamma_{CaC_2} \dot{m}_p t_{\text{res},b} \rho_L}{\rho_S d_p \dot{m}_{\text{bath}}} \beta_L \left\{ [\%S] \exp\left(-\frac{t_{\text{mix}}}{t_{\text{inj}}}\right) - [\%S]_e \right\}}_{\text{Перехідна реакція <CaC}_2> з [S]} \quad (5)$$

$$\underbrace{-\frac{A_{\text{slag}} \rho_S}{m_{\text{bath}}} \beta_S L_S \left\{ [\%S] \exp\left(-\frac{t_{\text{mix}}}{t_{\text{inj}}}\right) - \frac{(\%S)}{L_S} \right\}}_{\text{Постійна реакція шлаку з [S]}}$$

де  $\dot{V}_{G,\text{tot}}$  - загальна об'ємна швидкість потоку газу-носія та паров магнію,  $\beta_b$  - швидкість масопередачі до бульбашок,  $t_{\text{mix}}$  - час змішування,  $t_{\text{inj}}$  - час інжекції,  $f_{p,L}$  - частка частинок, які проникли в металеву ванну,  $\gamma_{CaC_2}$  - масова частка  $CaC_2$  в суміші реагентів,  $\beta_L$  - коефіцієнт масопередачі в чавуні,  $\beta_S$  - коефіцієнт масопередачі в шлаці  $K$  - константа.

Результати моделювання  $Z_{00}$  припускають, що внесок  $CaC_2$  і  $Mg$  у загальну швидкість десульфурації змінюється з часом. У досліджуваному випадку швидкість десульфурації  $CaC_2$  зменшувалася майже лінійно як функція часу інжекції, тоді як крива десульфурації, що відноситься до  $Mg$ , мала приблизно до параболічній траєкторії, яка перевершувала траєкторію  $CaC_2$ .

Visser запропонував модель десульфурації чавуну із сумісним введенням  $CaO$  та  $Mg$ . [6] У моделі процес десульфурації внаслідок введення  $CaO$  повністю пояснюється реакцією тимчасового металу з реагентом. Передбачалося, що введений  $Mg$  випаровується і розчиняється в металевій ванні, де він реагує на поверхні зародків  $MgS$ , тоді як припускається, що нерозчинена пара  $Mg$  потрапляє в газовий потік, утворений газом-носієм. Загальний баланс маси був записаний як

$$\frac{d[\%S]}{dt} = \left( \frac{d[\%S]}{dt} \right)_{CaS} + \left( \frac{d[\%S]}{dt} \right)_{MgS} \quad (6)$$

де перший член праворуч позначає швидкість десульфурації за рахунок частинок  $CaO$ , тоді як другий член позначає швидкість десульфурації за рахунок частинок  $Mg$ .



$$\left(\frac{d[\%S]}{dt}\right)_{CaS} = -\frac{\dot{m}_{CaO}^{t_{res,p}}}{m_{bath}} \frac{\rho_L}{\rho_{CaO}} \beta_{[S],CaO} \left(\frac{6}{d_{p,CaO}}\right) f_{p,L,CaO} ([\%S] - [\%S]_{CaS}) \quad (7)$$

$$\left(\frac{d[\%S]}{dt}\right)_{MgS} = -\beta_{[S],MgS} a_{MgS} ([\%S] - [\%S]_{MgS}) \quad (8)$$

де  $\beta_{[S],CaO}$  - коефіцієнт масопередачі до частинок CaO,  $f_{p,L,CaO}$  - частка прониклих частинок CaO,  $\beta_{[S],MgS}$  - коефіцієнт масопередачі до частинок MgS,  $a_{MgS}$  - питома поверхня частинок MgS у чавуні.

Як для частинок CaO, так і для Mg, коефіцієнт масопередачі розраховували за допомогою кореляції Ранца–Маршалла [7]. Через малий розмір частинок їх швидкість ковзання вважалася рівною нулю.

На практиці широке застосування мають моделі, що побудовані по наведеним даним. Модель Quinn [8] базувалася на регресії часткових найменших квадратів. Їх модель мала 14 вхідних змінних і використовувалася для поліпшення керованості десульфурації в торпедному ківші. Дослідження Bhattacharya [9] застосували аналіз головних компонентів до аналізу вибору вхідної змінної. Критерії відбору базувалися на перехресно перевірену суму квадратів помилок, яка в дослідженні називається сумою квадратів прогнозованої залишкової помилки. Змінними, які пояснюють найбільшу різницю у споживанні реагенту, були початковий, кінцевий, цільовий і змінний вміст сірки. Автор Vuolio [10] вивів параметризовану модель на основі апроксимації площі поверхні. Метою їхнього дослідження було виявити вплив розподілу частинок за розміром на швидкість реакції з використанням реагенту на основі вапна. В моделі виконувалася ідентифікація параметрів моделі на основі даних установки з десульфурації чавуну за допомогою реагентів на основі вапна в ковші. Автори припустили, що ефективна площа поверхні частинок набагато менша за номінальну площу поверхні частинок реагенту.

З ростом обчислювальних потужностей комп'ютерів стали можливим нейромережеві моделі. Моделі нейронних мереж складаються зі штучних нейронів, які з'єднані один з одним за допомогою сполучних ваг, тобто параметрів моделі, у вигляді шарів. Нейрони – це набір математичних функцій, які модифікують вхідні дані для отримання оцінки бажаного результату. Велика кількість мережевих параметрів робить навчання нейронної мережі обчислювально дуже інтенсивним процесом. Через велику кількість мережевих зв'язкових ваг, які необхідно оптимізувати, для навчання таких моделей зазвичай потрібна велика кількість вхідних даних. Оскільки нейронна мережа може виводити складні нелінійні вхідно-

вихідні зв'язки з навчальними даними, вона дозволяє ідентифікувати системи повністю «чорної скриньки», де немає інформації про механічну поведінку процесу. Розглянуто нейромережева модель на прикладі моделі для сульфідної ємності шлаку [11]. В цьому дослідженні визначена математична модель зі структурою «сірої скриньки». Ідентифікація моделі здійснюється за допомогою алгоритмів машинного навчання, а саме генетичних алгоритмів реального кодування, алгоритму Метрополіса-Хастинга і нейронних мереж. Процес ідентифікації розділений на дві окремі частини: навчання моделі «чорної скриньки» та ідентифікація моделі сірої скриньки». У цілому модель має послідовну архітектуру, в якій попередньо навчальний оцінювач на основі моделі «чорної скриньки» використовується для прогнозування сульфідної ємності, а моделі «сірої скриньки» оцінюють траєкторію сірки під час обробки. Процедура навчання відповідає принципам екстремальної навчальної машини, яка дозволяє значно скоротити час навчання в порівнянні з традиційним алгоритмом зворотного розповсюдження без істотного збитку для можливості мережі у відношенні узагальнення та оцінки.

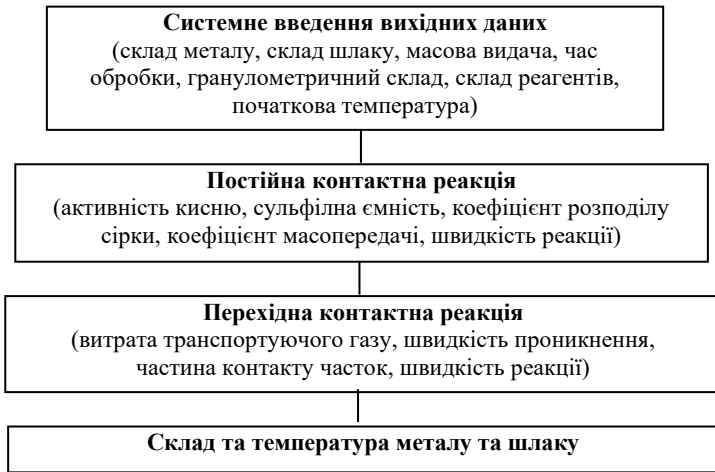


Рисунок 2 – Загальна структура моделі сірої скриньки.

Розглянута нейронна мережа була ідентифікована за допомогою мольних долей  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  і  $\text{Na}_2\text{O}$ , а також температури в якості вхідних змінних. Вибір змінної був заснований на доступних вимірюваннях компонентів шлаку в наборі даних процесу, тоді як інші доступні змінні були ігноровані, щоб уникнути невідповідності в прогнозах із-за відсутніх значень. Кількість скритних нейронів було

встановлено рівним 8, так як було виявлено, що це мінімізує помилку перехресної перевірки та забезпечує хорошу оцінку сульфідної ємності. Продуктивність цієї моделі була визнана достатньо хорошою, оскільки прогнози тестового набору привели до визначення коефіцієнта регресії = 0,88 і середньої абсолютної помилки = 0,25.

В Інституті чорної металургії НАН України сконцентровані вітчизняні дослідження щодо моделювання металургійних процесів. Створено інтегровану базу даних [12], що узагальнює інформацію про параметри розробленої системи, що пройшла численне промислове випробування на вітчизняних і зарубіжних умовах десульфурації чавуну зернистим магнієм. У комплексі з розробленою інформаційно-пошуковою системою забезпечується оперативний пошук інформації як у повному так і у будь-якому усіченому вигляді з вивантаженням даних в Excel форматі. У тому числі розроблена концепція експертної системи прийняття рішень з управління технологічними процесами та вибір раціональної технології позапічної десульфурації чавуну. Розроблено інформаційно-математичне забезпечення експертної системи модулем позапічної обробки чавуну зернистим магнієм та коінжекцією магнію і вапна. На основі аналізу технологічних даних отримано емпіричні рівняння для визначення кінцевого вмісту сірки у розплаві чавуну, а також вираз для оцінки питомої витрати металевого магнію в реагенті. Розроблені моделі для розрахунку питомої витрати реагентів покладені в основу алгоритму розрахунку показників процесу десульфурації чавуну. Вхідними параметрами є: температура чавуну, маса чавуну, хімічний склад чавуну і шлаку, вміст сірки початковий і кінцевий, частка магнію в реагенті.

Отримано вираз для оцінки питомої витрати металевого магнію в реальних умовах роботи установки позапічної десульфурації чавуну, який має вигляд:

$$M_{Mg} = X1 \cdot (X2 + X3 + X4 - X5 - X6),$$

$$\text{де } X1 = 10,5475 \cdot S_{\text{поч}} + \frac{0,00095}{S_{\text{кон}}}; \quad X2 = \frac{M_{\text{чав}}^{\phi}}{52,4};$$

$$X3 = \frac{(T_{\phi} - 1325)}{100} \cdot \left( \frac{-159,397 - (0,076 \cdot T_{\phi} - 188,085)}{159,397} \right);$$

$$X4 = (I_{\phi} - 5,26) \cdot 0,0979;$$

$$X5 = (H_{\phi} - 1,86) \cdot \left( \frac{-108,63}{0,00004 \cdot H_{\phi}^2 - 0,0005 \cdot H_{\phi} - 108,63} - 1 \right); \quad (9)$$

$$X6 = (q_{\text{шл}}^{\phi} - 2,8) \cdot 0,019.$$

Для прогнозу питомої витрати магнію при обробці сумішами Mg-CaO в 250-т заливних ковшах при заданому співвідношенні витрат реагентів Mg і CaO виведено рівняння для розрахунку питомої витрати реагентів, яке покладено в основу алгоритму підсистеми розрахунку показників процесу десульфурації чавуну з інжекцією магнію та вапна.

Розглянуто типи моделей присвячені чисельному та фізичному моделюванню явищ, які виникають у ковші під час інжектування, а також вивченню закономірностей газопорошкового потоку.

Farias and Irons [13] запропонував спрощену одновимірну числову модель газового потоку. У цій моделі всі змінні були усереднені по діаметру потоку, який був визначений експериментально. Вважалось, що імпульс змінюється лише плавучістю, яка визначалася за допомогою одночастинкових коефіцієнтів лобового опору. Незважаючи на його простоту, деякі корисні результати були отримані щодо впливу порошку на потік рідини в газовому потоці (рис. 3) і показує приклад десульфурації гарячого металу  $\text{CaC}_2$  використовуючи азот як газ-носії.

Farias and Irons зробили [14] узагальнення поведінки течії рідини струминних частинок газу, що має значення для десульфурації чавуну. Вони відзначили, що при високому вмісті частинок дрібні частинки зазвичай рухаються зі швидкостями, що відповідають швидкості газового потоку, і назвали цю поведінку пов'язаним потоком. Незв'язаний потік був описаний як потік, в якому навантаження частинок є низьким і прикордонні шари частинок більше не перекриваються.

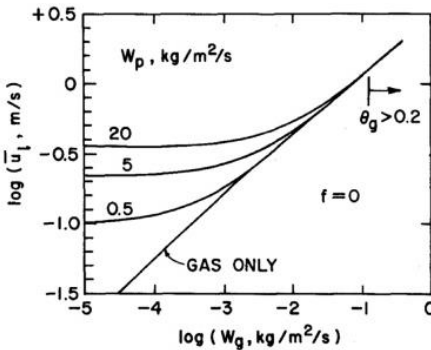


Рисунок 3 – Розрахована середня швидкість рідини в газовому потоці як функція масової швидкості газу ( $W_g$ ) порошку ( $W_p$ ) для системи чавун– $\text{CaC}_2$ – $\text{N}_2$ . Параметри: діаметр бульбашки = 0,05 м, діаметр частинок = 100 мкм, висота ванни = 1,5 м, ванна діаметр=2,2 м.

Додаткове роз'яснення було зроблено для опису поведінки проникнення. Коли зв'язаний потік газу і частинок проникає в рідину, результуючий режим потоку називається струминним, тоді як у разі незв'язаного потоку результуючий режим потоку рідини позначається як барботаж. Термін перехідний режим відноситься до режиму потоку рідини, який має характеристики як струминного, так і барботажного режимів.

В Інституті чорної металургії проведено гідрогазодинамічні дослідження рідкометалевої ванни під час інжекційного рафінування розплаву через занурювальну фурму на холодній моделі ковша [15]. Застосована методика комп'ютерного опрацювання відеокадрів процесу газорідинної взаємодії, що дало змогу провести кількісну оцінку ефективності газорозподілу в об'ємі рідиннометалевої ванни при вдуванні газопорошкового струменя під різним кутом. (рис. 4)

Показано, що найкращі показники газорідинної взаємодії в частині збільшення газовмісту і збільшення газовмісту та площі поверхні розділу фаз, а також зменшення нерівномірності розподілу цих параметрів за обсягом ковша мають місце за значень кута вдування, що лежать у діапазоні  $\alpha=30^\circ\div 60^\circ$ .



Рисунок 4 – Кадри процесу інжектування на «холодній» моделі.

В Інституті чорної металургії виконаний великий обсяг досліджень по розробці математичної моделі для оцінки занурення частинок реагенту з газом у розплав чавуну під час десульфурзації засобами холодного моделювання.

Закономірності поведінки та взаємодій двофазних струменів (транспортуючий газ+реагент) з розплавом чавуну складні, оскільки втрачаються індивідуальні динамічні характеристики окремої частинки. Також залишається незрозумілим, але важливим питання про співвідношення кількості частинок, що пішли вглиб металу, і частинок, що опинилися у спливаючому пузирі. Внаслідок цього, важливим є питання про занурення окремої частки, що летить, у розплав. З гідродинамічної точки зору задачі проникнення тіл у рідину відносяться до класичного типу гідродинамічних задач і актуальні й в наш час. На основі рівнянь гідро- і аеродинаміки, рівнянь Нав'є-Стокса розроблені математичні методи для знаходження динамічних характеристик тіла, що занурюється у рідину з урахуванням каверни, що за ним утворюється.

Процеси взаємодії твердих частинок реагенту з поверхнею газової порожнини в прифурменній зоні досліджено за результатами розрахункового моделювання [16] на основі спільного розв'язання рівнянь з варіюванням типу знесірчувального реагенту, діаметра частинок реагенту та швидкості їхнього руху.

$$h_{TB} = \frac{dW_{TB}}{dx} = \frac{\left[ -0,5 \cdot \pi \cdot r_{TB}^2 \cdot C_x \cdot \rho_M \cdot W_{TB}^2 \right] + \left[ 0,75 \cdot \pi \cdot r_{TB}^3 \cdot g \cdot (\rho_{TB} - \rho_M) \right]}{\left[ 0,75 \cdot \pi \cdot r_{TB} \cdot (\rho_{TB} + 0,5 \cdot \rho_M) \right] \cdot W_{TB}}, \quad (10)$$

де  $C_x$  – коефіцієнт гідродинамічного опору сфери,  $r_{TB}$  – радіус твердої частинки,  $\rho_{TB}$  и  $\rho_M$  – густини твердої частинки і розплаву чавуну,  $W_{TB}$  – змінна швидкості руху частинки в розплаві.

### Висновки

Зроблено огляд аналітичних, експериментальних та модельних досліджень десульфурзації чавуну. З збільшенням даних, зростає інтерес до застосування методів, керованих даними, для підвищення точності прогнозування. Моделі, що керуються даними, виявилися ефективними, особливо при десульфурзації чавуну, оскільки деякі явища процесу термодинамічної природи неможливо точно визначити кількісно за допомогою сучасних технологій.

### Перелік посилань

1. Oeters F., Strohmenger P., Pluschkell W. Kinetik der Entschwefelung von Roheisenschmelzen mit Kalk und Erdgas. *Arch. Eisenhüttenwes.* 1973. Vol. 44. P. 727
2. El-Kaddah N., Szekely J. Mathematical model for desulphurization kinetics in argon-stirred ladles Ironmak. *Steelmak.* 1981. Vol. 8. P. 269–278.
3. Deo B., Grieveson P. Desulfurization of molten pig iron containing aluminium by powder injection. *Steel Res.* 1988. Vol. 59. P. 263.
4. Deo B., Boom R. *Fundamentals of Steelmaking Metallurgy*, Hertfordshire, United Kingdom: Prentice Hall International, 1993. 300 p.
5. Zou Z., Zou Y., Zhang L., Wang N. Mathematical Model of Hot Metal Desulphurization by Powder injection. *ISIJ International.* 2001. Vol. 41. P. 66-69.
6. Visser H.-J. PhD Thesis. The Hampering Effect of Precipitated Carbon on Hot Metal Desulfurization with Magnesium. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2016.
7. Ranz W., Marshall W. Evaporation from Drops. *Chemical Engineering Progress.* 1952. Vol. 48. P. 141-146.
8. Quinn S. L., Vaculik V. Improving the Desulfurization Process Using Adaptive Multivariate Statistical Modeling. *AISE Steel Technol. (USA)*. 2002. Vol. 79 No. 10. P. 37–41.
9. Bhattacharya T., Nag S., Lenka S. N. Analysis of DS Reagent Consumption Using Multivariate Statistical Modeling. *Tata Search.* 2004. Vol. 1. P. 215–223.
10. Vuolio T., Visuri V.-V., Sorsa A., Ollila S., Fabritius T. Application of a Genetic Algorithm Based Model Selection Algorithm for Identification of Carbide-Based Hot Metal Desulfurization. *Appl. Soft Comput. J.* 2020. Vol. 92, 106330.
11. Visuri V.-V., Vuolio T., Haas T., Fabritius T. A. Review of Modeling Hot Metal Desulfurization. *Steel Res. Int.* 2020. Vol. 91. No. 4, 1900454.
12. Информационно-математическое обеспечение технологии десульфурации чугуна / Тогобицкая Д. Н., Молчанов Л. С., Вергун А. С., Кисляков В. Г., Лихачев Ю. М., Ходотова Н. Е. // *Фундаментальные и*

*прикладні проблеми чорної металургії*. 2020. Вип. 34. С. 62–72.

13. Farias L. R., Irons G. A. A multi-phase model for plumes in powder injection refining processes *Metall. Trans. B*. 1986. Vol. 17, 77.

14. Farias L. R., Irons G. A. A Unified Approach to Bubbling-Jetting Phenomena in Powder Injection into Iron and Steel. *Metall. Trans. B*. 1985, Vol. 16, No. 2. P. 211–225.

15. Шевченко С. А., Шевченко А. Ф., Елисеєв В. И. Закономерности внедрения частиц магния в расплав чугуна при вдувании через фурму без испарительной камеры на выходе. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2008. Вип. 17. С. 111 – 115.

16. Єлісеєв В. І., Маначин І. О., Шевченко А. П., Шевченко С. А. Оцінка параметрів занурення частинок реагенту з газом у розплав при інжекційній позапічній десульфурзації чавуну. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 172 – 181. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-172-181>

### References

1. Oeters, F., Strohmenger, P., & Pluschkell, W. (1973). Kinetik der Entschwefelung von Roheisenschmelzen mit Kalk und Erdgas. *Arch. Eisenhüttenwes.*, 44, 727

2. El-Kaddah, N., & Szekely, J. (1981). Mathematical model for desulphurization kinetics in argon-stirred ladles Ironmak. *Steelmak*, 8, 269–78

3. Deo, B., & Grieveson P. (1988). Desulfurization of molten pig iron containing aluminium by powder injection. *Steel Res.*, 59, 263

4. Deo, B. & Boom, R. (1993). *Fundamentals of Steelmaking Metallurgy*, Prentice Hall International

5. Zou, Z., Zou, Y., Zhang, L. & Wang, N. (2001). Mathematical Model of Hot Metal Desulphurization by Powder Injection. *ISIJ International*, 41, 66-69

6. Visser, H.-J. (2016). PhD Thesis. The Hampering Effect of Precipitated Carbon on Hot Metal Desulfurization with Magnesium, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands

7. Ranz, W. & Marshall, W. (1952). Evaporation from Drops. *Chemical Engineering Progress*, 48, 141-146

8. Quinn, S. L., & Vaculik, V. (2002). Improving the Desulfurization Process Using Adaptive Multivariate Statistical Modeling. *AISE Steel Technol. (USA)*, 79(10), 37–41

9. Bhattacharya, T., Nag, S., & Lenka, S. N. (2004). Analysis of DS Reagent Consumption Using Multivariate Statistical Modeling. *Tata Search.*, 1, 215–223

10. Vuolio, T., Visuri, V.-V., Sorsa, A., Ollila, S., & Fabritius, T. (2020). Application of a Genetic Algorithm Based Model Selection Algorithm for Identification of Carbide-Based Hot Metal Desulfurization. *Appl. Soft Comput. J.*, 92, 106330

11. Visuri, V.-V., Vuolio, T., Haas, T., & Fabritius, T. A. (2020). Review of Modeling Hot Metal Desulfurization. *Steel Res. Int.*, 91(4), 1900454

12. Togobickaya, D. N., Molchanov, L. S., Vergun, A. S., Kislyakov, V. G., Lihachev, Yu. M., & Hodotova, N. E. (2020). Informacionno-matematicheskoe

obespechenie tekhnologii desulfuratsii chuguna. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 34, 62–72

13. Farias, L. R., & Irons, G. A. (1986). A multi-phase model for plumes in powder injection refining processes. *Metall. Trans. B*, 17, 77

14. Farias, L. R., & Irons, G. A. (1985). A Unified Approach to Bubbling-Jetting Phenomena in Powder Injection into Iron and Steel. *Metall. Trans. B.*, 16(2), 211–225

15. Shevchenko, S. A., Shevchenko, A. F., & Eliseev, V. I. (2008). Zakonomernosti vnedreniya chastic magniya v rasplav chuguna pri vduvanii cherez furnu bez isparitelnoj kamery na vyhode. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 17, 111-115

16. Yelisieiev, V. I., Manachyn, I. O., Shevchenko, A. P., & Shevchenko, S. A. (2022). Otsinka parametrov zanurennia chastynok reagentu z hazom u rozplav pry inzheksiinii pozapichnii desulfuratsii chavunu. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 36, 172-181. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-172-181>

**V. H. Kislyakov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Head of Department, ORCID 0000-0002-1775-5050  
**D. M. Togobitskaya**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Professor, Head of Department, ORCID 0000-0001-6413-4823

**L. S. Molchanov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Head of Department, ORCID 0000-0001-6139-5956

**V. I. Yelisieiev**<sup>1</sup>, Ph. D. (Pys.-Math.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-4999-8142

**Y. M. Likhachov**<sup>1</sup>, Researcher

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

### ANALYSIS OF MODELS OF NON-AGGREGATE CAST IRON PROCESSING PROCESSES

**Abstract.** The aim of this paper is to perform a generalized analysis of studies on modeling the processes of out-of-furnace treatment of cast iron. Mathematical models are classified according to the basic principles of modeling. A description of different models based on different principles is given, depending on their type and the differences between them. A more detailed analysis of some of the fundamental models and expressions obtained in their construction is carried out. An example of models built on experimental data is given. Neural network models consist of artificial neurons that are connected to each other by means of connecting weights, i.e., model parameters, in the form of layers. Neurons are a set of mathematical functions that modify the input data to obtain an estimate of the desired result. A large number of network parameters makes training a neural network a cumbersome computational process. The large number of network connection weights that need to be optimized when training such models usually requires a large amount of input data. The paper presents domestic achievements in the construction of mathematical models of the out-of-furnace iron treatment process. The principles of creating an integrated database that summarizes information on the parameters of various technologies for desulphurization of cast iron, including the developed system unit of the information retrieval system, are described; the concept of an expert system for making decisions



on process control and selection of a rational technology for out-of-furnace desulphurization of cast iron is developed; the variant of the developed information and mathematical support of the expert system with the module for out-of-furnace treatment of cast iron with granular magnesium and coinjection of magnesium and lime is described; the results of the study are presented. The paper describes the models devoted to numerical and physical modeling of the phenomena that occur in the ladle during injection, as well as to the study of the regularities of the gas-powder flow.

**Key words:** desulfurization, cast iron, model, classification, analysis.

**For citation:** Kislyakov, V. H., Togobitskaya, D. M., Molchanov, L. S., Yeliseiev, V. I., & Likhachov, Y. M. (2023). Analysis of models of non-aggregate cast iron processing processes. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 184-200. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-184-200>

*Стаття надійшла до редакції збірника 02.11.2023 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*