

Л. С. Молчанов¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-6139-5956

Т. С. Голуб¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9269-2953

С. І. Семикін¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7365-2259

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ АНАЛІЗУ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ГАЗОВИХ СТРУМЕНІВ З РІДКИМИ ФАЗАМИ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЇ ВАННИ

Анотація. Сталеплавильна галузь є невід’ємною складовою сучасної важкої промисловості та базою для інших галузей, бо забезпечує конструкційними матеріалами, серед яких важливе місце займає сталь різного сортаменту. В світі більша частка сталеплавильного виробництва припадає на кисневе конвертування, що зумовлює актуальність постійного розвитку й вдосконалення цього процесу як з технологічного так і з екологічних аспектів. Проте будь-яке нововведення потребує дослідження та випробування, яке не може бути проведене в промислових умовах через можливість нанесення шкоди поточному виробництву та втрати часу й ресурсів. Через це активно розвивається напрямок моделювання киснево-конвертерного процесу. Моделювання може відбуватися фізично на холодних моделях або гарячих моделях, чи віртуально з використанням математичних моделей. Однак останні потребують попередніх досліджень на фізичних моделях для пошуку закономірностей, що стануть їх основою. Таким чином фізичне натурне моделювання є невід’ємною базою та джерелом інформації про всі процеси, що супроводжують виготовлення сталі. Однак, кожен отриманий результат повинен бути адекватно інтерпретований. Так в роботі запропоновані варіанти дослідження та інтерпретації динамічних показників процесу продувки за результатами, отриманими шляхом фізичного моделювання. Проведено за допомогою запропонованих методик оцінювання різних варіантів холодного моделювання з використанням водних двофазних моделей, де у якості модельних рідин використовують воду, що імітує рідку сталь, та рідину, що імітує шлак; та високотемпературного моделювання на справжньому металевому розплаві у малих масштабах. Встановлені динамічні особливості руху середовищ при продуванні зверху, які були визначені за допомогою вказаних методів моделювання, а саме швидкості руху часточок однієї фази, що імітує шлак, при потраплянні в іншу фазу, що імітує сталевий розплав, під час продувки; рух поверхні ванни в залежності від технологічних показників та за

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

результатами високотемпературного моделювання встановлено особливості пульсації лунки, що створює струмінь продувального газу.

Ключові слова: киснево-конвертерний процес, холодне моделювання, високотемпературне моделювання, продувка, швидкість руху фаз

Посилання для цитування: Молчанов Л. С., Голуб Т. С., Семикін С. І. Методичні аспекти аналізу та інтерпретації результатів фізичного моделювання процесів взаємодії газових струменів з рідкими фазами киснево-конвертерної ванни. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 232-252. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-232-252>.

Вступ. Більшість сучасних промислових галузей економіки розвинених країн серед базових напрямів мають сталеплавильну галузь, яка є не тільки важливою опорою національної індустріалізації та й відіграє важливу допоміжну роль для суміжних галузей. Для виробництва сталі основним залишається кисневе конвертування, для якого ключовим напрямком розвитку є підвищення екологічності та сучасна технологічна модернізація виробництва. Прискорення технологічних інновацій у сфері киснево-конвертерного виробництва сталі пов'язаних з ефективністю, екологічно чистими методами виробництва та технологіями, що продовжують термін служби потребують ефективний, простий, доступний та адекватний реальному промислому варіанту метод оцінювання та дослідження інновацій. У зв'язку з цим актуальним напрямком дослідження для сучасної металургійної науки є розробка методів адекватного співставлення результатів низькотемпературного та високотемпературного моделювання для розробки критеріїв перенесення результатів для можливості подальшої розробки моделей керування та прогнозування процесу в реальних промислових умовах.

Щоб виявити особливості поведінки газового струменя, який витікає з кисневої фурми та характеристики перемішування шлако-металевої ванни, металурги провели безліч досліджень з використанням чисельного моделювання та моделювання на водних моделях. На схемі 1 (рис. 1), як приклад, перераховані методи та зміст дослідження поведінки струменя, що витікає з кисневої фурми.

За останнє десятиліття чисельне моделювання набуло широкого розповсюдження, проте воно засновано на низці певних припущень й діє за рівняннями, які були отримані за певних умов, тобто не повною мірою відображають умови реального конвертерного виробництва, при зміні умов. Отже, результати чисельного моделювання потребують постійної перевірки та адаптації до конкретних умов, що призводить фактично до створення нової чисельної моделі.

Фізичне натурне моделювання дозволяє якісно оцінити якийсь процес, ділянку конвертерної ванни й отримані результати можуть бути використані для подальшого фізичного моделювання.



Рисунок 1 – Схематичне представлення можливостей існуючих методів моделювання киснево-конвертерного процесу

Метою роботи є дослідження варіантів оцінювання отриманих результатів фізичного моделювання ділянки конвертерного переділу за допомогою як низько- так і високотемпературної моделі для отримання адекватних показників процесу.

Методика проведення досліджень. Для встановлення особливостей руху за результатами моделювання важливим параметром є швидкість переміщення часточок – трасерів, що додають до рідкої фази. Вивчення відеозаписів експериментів дозволяє застосовувати прямі способи визначення швидкості об'єктів, засновані на безпосередньому сприйнятті та дослідженні відеозображення процесу та враховують закони динаміки руху різних об'єктів. Для встановлення швидкості руху об'єкта необхідно знати відстань, яку він проходить за певний час. Відрізок часу можна виміряти за допомогою

приладів або - можна обчислити за частотою кадрів відеозапису (у випадку необхідності аналізу частини відеозапису), а відстань, на яку перемістився об'єкт за вимірний відрізок часу, може бути визначений за результатами відео зйомки, наприклад, коли об'єкт рухається прямолінійно та переміщається у кадрі під будь-яким кутом, а відеозйомка ведеться нерухомою камерою. Крім цього, швидкість руху об'єктів відеозапису може бути встановлена при дослідженні зміни їх кутових розмірів.

Встановлення швидкості об'єкта переміщення на відстань довжини відомого іншого об'єкта. Даний спосіб дозволяє встановлювати швидкість об'єкта під час руху його в кадрі в будь-якому напрямку, крім руху вздовж оптичної вісі об'єктива відеокамери. У кадрі встановлюють об'єкт відомої довжини. На відеозапису вибирається ділянка, на якій питомий об'єкт проходить повз контрольний об'єкт, переміщуючись відповідно на його відому довжину. Час, за який відбувається це переміщення, визначається, виходячи з частоти кадрів відеозапису (за медіа парметрами відеофайлу або тайм-кодом відеозапису) і кількості кадрів, за яке відбувається зазначене переміщення. Швидкість питомого об'єкту визначається в даному випадку відповідною формулою [64-67]:

$$V = L \cdot \frac{f_k}{n}, \text{ м/с} \quad (1)$$

де L – довжина відомого об'єкта, м; f_k – частота кадрів відеозапису, кадр/с; n – кількість кадрів, протягом якого питомий об'єкт переміщається на довжину відомого об'єкта.

До переваг зазначеного способу можна віднести те, що шлях об'єкта, що досліджується, можна обчислити навіть у разі його руху на переферичній частині кадру за наявності досить сильних викривлень відео зображення, за рахунок оптичних аберацій лінзової системи приладу відеофіксації.

У випадку, коли нерухомий об'єкт з відомими розмірами знаходиться на відстані від питомого об'єкту, що рухається, й швидкість якого необхідно визначити по відеозапису з нерухомої відеокамери, слід враховувати наявність перспективних змін реальних розмірів нерухомого об'єкта. При значному віддаленні відбувається візуальне зменшення розмірів зображення, що може призвести до помилки визначення швидкості в бік її збільшення.

Для оцінки траєкторії переміщення об'єкту під деяким кутом до спостерігача (для визначення координат) необхідно перерахувати поздовжнє та поперечне зміщення зображення на відеозаписі в дистанцію та кут повороту щодо вісі зони огляду камери. Для визначення швидкості

переміщення об'єкта необхідно визначити шлях, який він пройшов, на часовому інтервалі, що розглядається. Попередній аналіз зіставлення переміщення зображення на записі з реальним переміщенням об'єкта показав, що для визначення пройденого шляху необхідне визначення його складових: поздовжнього та поперечного зміщення об'єкта щодо вісі зони огляду камери. Під поздовжнім напрямом розуміється напрямок, що збігається з віссю зони огляду камери. Під поперечним напрямом необхідно розуміти напрямок переміщення об'єкта, перпендикулярно до поздовжньої вісі зони огляду камери.

Розрахунок поздовжнього переміщення об'єкта. Як відомо, зі збільшенням відстані до об'єкта при незмінних його лінійних розмірах змінюються кутові розміри, які відображаються на відеозаписі. На рис. 2 представлено схему пропорційного зменшення кутового розміру зі збільшенням відстані до об'єкта.

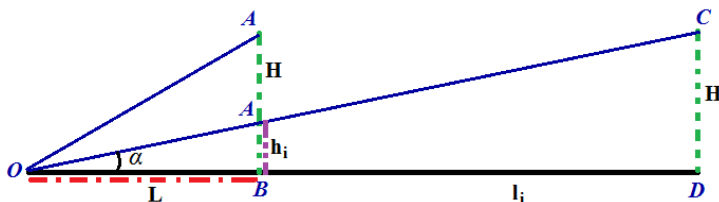


Рисунок 2 – Зміна кутових розмірів при збільшенні відстані до об'єкта

Якщо відомий «базовий» розмір зображення H , при якому точно відома відстань L до об'єкта, далі з подоби $\triangle OAB$ і $\triangle OCD$ (рис. 1) [64-67]

$$\frac{h_i}{L} = \frac{H}{l_i}, \quad (2)$$

Звідси

$$h_i = \frac{H}{l_i} \cdot L. \quad (3)$$

Розрахунок поперечного переміщення об'єкта. У випадку, коли рух об'єкта фіксується нерухомою камерою, поперечне переміщення зображення об'єкта щодо вісі зони огляду камери визначається за відхиленнями d_1 та d_2 зображення об'єкта в моменти часу t_1 та t_2 відповідно. При цьому, кути α_1 та α_2 між центральною віссю зони огляду камери та напрямком на об'єкт у моменти часу t_1 та t_2 , відповідно, визначаються з виразів (рис. 3) [64-67]:

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{d_1}{l_1}\right), \quad \alpha_2 = \arctan\left(\frac{d_2}{l_2}\right). \quad (4)$$

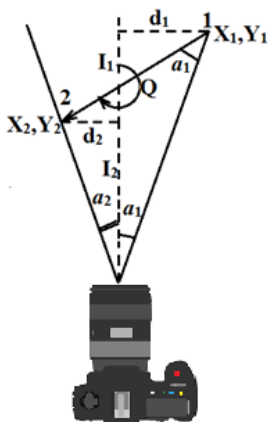


Рисунок 3 – Визначення поперечного зміщення

Таким чином, виходячи з наведеного вище, визначити шлях, який пройшов об'єкт можна за формулою:

$$S = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1). \quad (5)$$

Курс руху об'єкта може бути розрахований за виразом:

$$Q = \arctan \left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right). \quad (6)$$

Швидкість об'єкта можна встановити за формулою:

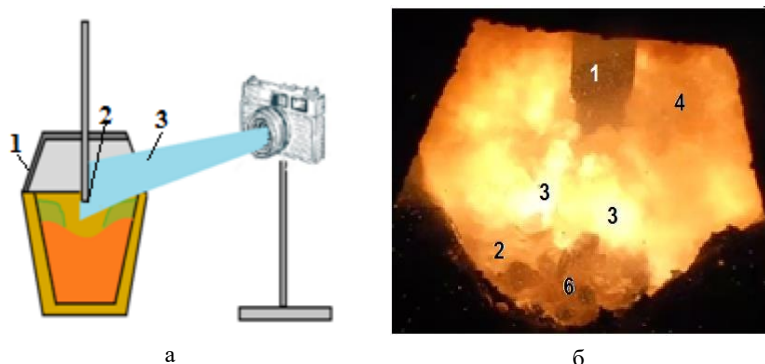
$$V = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{\Delta t}. \quad (7)$$

Приклади застосування наведених методів розрахунку швидкостей при проведенні фізичного моделювання при дослідженні металургійних процесів і технологій представлені на далі.

Результати досліджень. Високотемпературне моделювання передбачає використання у якості модельних рідин реальних металевих та шлакових розплавів різного складу та з різними фізичними властивостями (використання залізвуглецевих розплавів або розплавів, що їх замінюють, з нижчими температурами плавлення – сплави кольорових металів). Що стосується низькотемпературного моделювання, то до них відносяться методи досліджень, що базуються на використанні у якості модельних рідин, які імітують металеві та шлакові розплави речовин органічного та неорганічного походження зі значно нижчою у порівнянні з реальними металевими та шлаковими розплавами температурою плавлення.

Відповідно до способу організації металеві ванни при

високотемпературному моделюванні виділяють використання об'ємних моделей та плоских. Враховуючи що лабораторний плавильний агрегат для роботи зі шлаковими та металевими розплавами має у своєму складі вогнетривку футерівку, а шлакові та металеві фази є рідинами з низькою оптичною проникністю, то пряма фіксація фізико-хімічних явищ можлива лише на дзеркалі шлако-металевої фази. Загальна схема виконання високотемпературних досліджень на об'ємних моделях представлена на рис. 4.



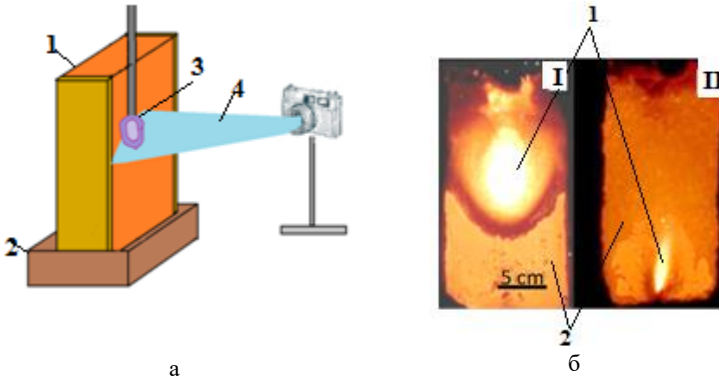
1 – модель металургійного агрегату;
2 – об'єкт фото-/відеофіксації; 3 –
поле огляду системи, що проводить
відео-/фотофіксацію

1 – двоярусна фурма; 2 – поверхня
шлаку; 3 – факели допалювання CO;
4 – вихід бурого диму; 5 – сплески
шлаку; 6 – шматки доданого вапна

Рисунок 4 – Схема організації (а) та фотофіксація процесу продувки металевеї ванни на 60 кг конверторі з використанням двоярусної фурми (б)

Що стосується плоских високотемпературних моделей, здебільшого вони використовуються для досліджень особливості протікання певних технологічних процесів в обсязі шлако-металевого розплаву. Передбачають використання у якості прозорої футерівки кварцевого скла, яке дозволяє на протязі до 1 хвилини спостерігати за перебігом процесу, що досліджується. Схема організації високотемпературного моделювання з використанням плоских моделей представлена на рис. 5.

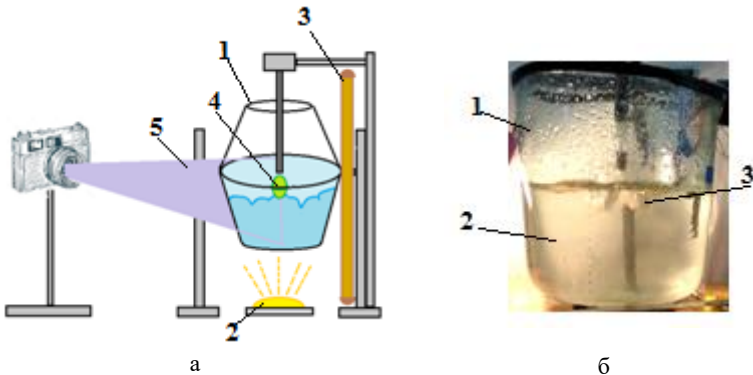
В сучасних умовах найбільше розповсюдження отримали методи низькотемпературного фізичного моделювання, яке пов'язане з низькою вартістю процесу та можливістю багатократного повторення дослідів. При цьому найбільше поширення отримали методи використання у якості основної модельної речовини – води. Це зумовлено значною її розповсюдженістю та можливістю зміни фізичних параметрів (густина та поверхневий натяг) за рахунок введення розчинних у воді хімічних сполук.



1 – пласка модель; 2 – основа з піском; 3 – I - продувка зверху; II – продувка донна
 об'єкт фіксації; 4 – поле огляду системи, що 1 – високотемпературна зона; 2 –
 проводить відео-/фотофіксацію металевий розплав

Рисунок 5 – Схема організації високотемпературного моделювання з використанням плоских моделей (а) та фрагмент верхньої (б) та донної (в) продувки конвертерної ванни

Загальна схема організації процесу низькотемпературного моделювання представлена на рис. 6.



1 – прозора модель для моделювання;
 2 – джерело штучного світла; 3 – фоновий екран;
 4 – об'єкт фіксації; 5 – поле огляду системи, що проводить відео-/фотофіксацію

1 – прозора модель;
 2 – моделююча рідина;
 3 – зона продувки

Рисунок 6 – Схема організації низькотемпературного моделювання (а) та фрагмент продувки конвертерної ванни з використанням верхньої фурми (б)

Під час холодного моделювання при продувці двофазної системи рідин зверху, де вода моделює рідку сталь, а метилсиліконова олія –

шлакову фазу за результатами відеозйомки можливо отримати наступні данні. При постановці досліду на стінку прозорої моделі конвертера попередньо була нанесена розмітка з шириною інтервалів $10 \cdot 10^{-3}$ м (це об'єкт з відомою величиною, який буде орієнтиром при встановленні переміщення). Досліди були проведені із застосуванням чотирьох соплових наконечників з кутом нахилу сопел до вертикальної вісі фурми 12 градусів при інтенсивності подачі газу $16,6 \text{ м}^3/\text{т хв}$ і положенні фурми 20 калібрів над рівнем спокійної ванни. Таким чином, було проведено продувку з використанням наконечника з соплами діаметром $2,5 \cdot 10^{-3}$ м. При розкадруванні отриманого відеозапису відслідковували рух крапель поліметиліліконової олії вздовж стінки моделі для встановлення швидкості пристінних потоків рідини під час продувки (рис. 7). За результатами розрахунків по наведеній вище методиці, встановлено, що за 1 хвилину крапля перемістилася на $1,75 \cdot 10^{-2}$ м, тобто швидкість пристінних потоків складає відповідно до формули (1) $0,29 \cdot 10^{-3}$ м/с. Таким чином дізнаємося, що до стінок моделі у даному випадку при швидкості витікання потоку з зазначеного сопла $255,4$ м/с надходить невелика частка імпульсу.

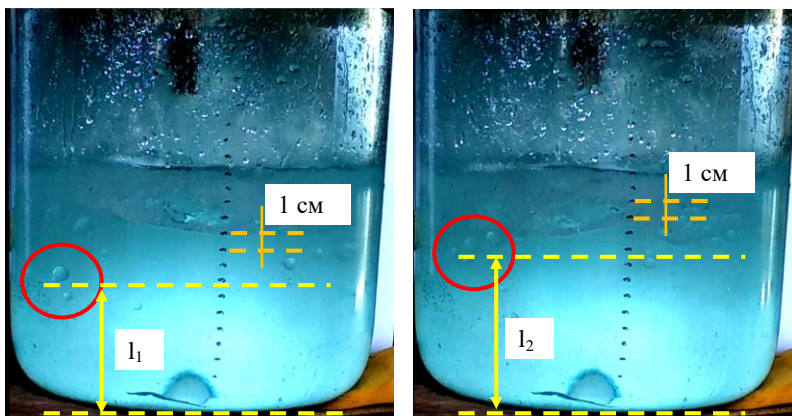


Рисунок 7 – Приклад аналізу руху об'єктів для встановлення швидкості руху рідин вздовж стінки моделі (кадри відрізняються за часом на 1 хв.)

Крім інформації про рух потоків при аналізі поверхні ванни можливо оцінити висоту та частоту коливання ванни при продувці. Розкадрувавши відео продувки двофазної рідини за вказаних вище умов за кожним кадром проведено розрахунок висоти ванни у зоні нанесеної розмітки (на рис. 8 наведено, як приклад, коливання ванни за інтервал 15 секунд). Встановлено, що ванна має рух по висоті на величину від $0,8 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ м за хвилину з частотою $0,12 - 0,15$ Гц.

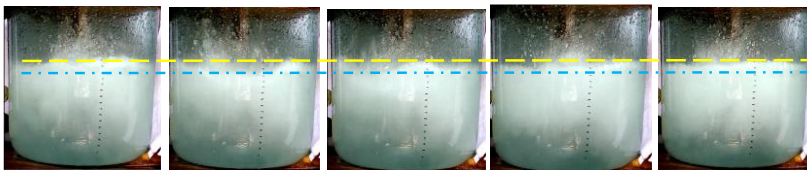


Рисунок 8 – Приклад аналізу руху ванни при фізичному холодному моделюванні (кадри обрано за інтервал 15 секунд, лінії позначають мінімальний та максимальний рівень коливань)

Інший приклад, при проведенні високотемпературного моделювання на 60 кг моделі кисневого конвертера під час продувки крізь одно соплову фурму з витратою газу відповідно до промислового варіанта конвертування отримані відео записи поверхні ванни. При розкадруванні на відео є об'єкт з відомими геометричними параметрами – продувна фурма (діаметр – $35 \cdot 10^{-3}$ м) відповідно до неї можливо оцінити геометричні параметри лунки, що утворюється при взаємодії газового струменя з рідкою ванною і встановити, наприклад, що за 1 хвилину її площа змінюється в межах від $0,3 \cdot 10^{-3}$ м² до $0,7 \cdot 10^{-3}$ м² із частотою 0,12-0,15 Гц, що відповідає особливостям продувального пристрою (рис. 9) (за рахунок обробки фото з використанням програми Coreldraw)..

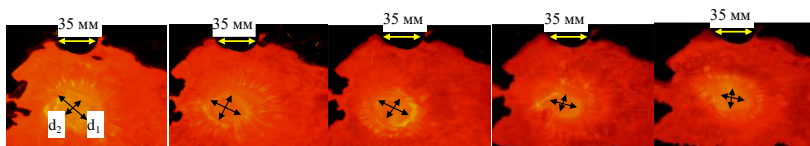


Рисунок 9 – Приклад аналізу пульсації продувної лунки ванни при фізичному високотемпературному моделюванні (кадри обрано за інтервал 1 хвилину)

Крім цього, можна оцінити швидкість шлакоутворення за затемненням поверхні ванни від кадру до кадру (за рахунок обробки фото з використанням програми Coreldraw). У наведеному прикладі за 1 хвилину площа, вкрита шлаком, змінилася з 10% до 75%. Тобто швидкість шлакоутворення у цей час була $62,5 \cdot 10^{-3}$ м²/хв.

За результатами високотемпературного моделювання з використанням плоских моделей аналіз процесів, що розвиваються вздовж кварцової стінки, нижче реакційних зон у варіанті моделювання з верхньою кисневою продувкою рідкого залізо-вуглецевого розплаву дозволив виявити зародження та зростання газових бульбашок та їх переміщення по висоті моделі (найімовірніше CO) (рис. 9). Встановлено, що при витраті продувального газу 0,098-0,147 м³/хв частота утворення та швидкість руху CO-бульбашок вздовж стінки залежить від

глибини їх утворення та періоду продувки: чим глибше місце утворення бульбашки, тим складніше їх утворення та нижче швидкість руху через необхідність подолання гідростатичного тиску шару металу на бульбашку, що утворюється й рухається вгору. Наприклад, бульбашки, утворені на глибині $5 \cdot 10^{-2}$ м мали швидкість спливання в період окислення кремнію 0,003 м/с та 0,005 м/с в період інтенсивного окислення вуглецю відповідно. На глибині $10 \cdot 10^{-2}$ м бульбашки мали швидкість руху 0,0013 м/с в період окислення кремнію і 0,0022 м/с в період інтенсивного окислення вуглецю відповідно.

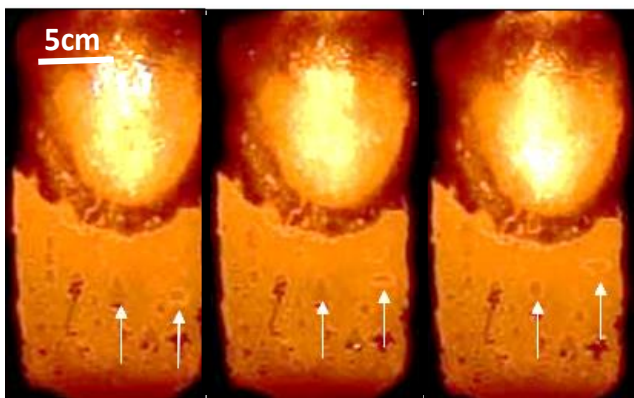


Рисунок 10 – Фото результатів продувки на плоскій високо-температурній моделі із рухом газових бульбашок вздовж поверхні скла (показано стрілками на фото)

Тобто заглиблення у шлакометалеву ванну в двічі більшу глибину відповідає зниженню швидкості руху бульбашки майже у два рази. І якщо, порівняти результати отримані при холодному моделюванні щодо руху бульбашки вздовж стінки, реальні швидкості руху часток в рідких металевих розплавах в десять разів швидші.

Висновки

Проведення фізичного моделювання процесів, що відбуваються під час сталеплавильного переділу, створює важливе та доступне джерело інформації для розуміння фундаментальних основ ефектів, які супроводжують перебіг виплавки сталі у реальних промислових умовах. При цьому отримана інформація може бути інтерпретована за допомогою математичного апарату для подальшого порівняння між різними варіантами процесів, чи встановлення оптимальних показників. Також отримана інформація є важливою для розуміння законів, якими можуть бути описані окремі процеси при подальшому створенні

моделей для їх математичного опису та можливого керування.

Перелік посилань

1. Zhang Y. C., Zhang C. J., Zhu L. G., Zhou Q. L. Numerical simulation of high Mach number oxygen lance under high oxygen pressure. *Iron and Steel*. 2019. Vol. 54. P. 32–38
2. Li Q., Li M.-M., Li L., Zou Z.-S. Numerical analysis on oxygen jet characteristic for BOF converter top-blown process based on CFD method. *Journal of Northeastern University*. 2013. Vol. 34(6). P.828–831
3. Kemminger A., Krause F., Odenthal H.-J. CFD simulation of top-blown converters. Conference: 9th EOSC European Oxygen Steelmaking ConferenceAt: Aachen, 2022
4. Wang W., Yuan Z., Matsuura H., Zhao H., Dai Ch., Tsukihashi F. Three-dimensional Compressible Flow Simulation of Top-blown Multiple Jets in Converter. *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. No. 4. P. 491–500
5. Hu S. Y., Zhu R., Dong K. Numerical simulation research on flow in combined blown converter at steelmaking temperature. *Chin. J. Eng.*. 2018. Vol. 40. P. 108–115
6. Wang H., Zhu R., Gu Y. L., Wang C. J. Behavior of supersonic oxygen jet injected from four-hole lance during top-blown converter steelmaking process. *Can. Metall. Q.* 2014. Vol. 53. P. 367–380
7. Li M. M., Li Q., Kuang S. B., Zou Z. S. Coalescences of supersonic jets from multi-nozzle oxygen lance in steelmaking BOF. *Steel Res. Int.* 2015. Vol. 86. P. 1517–1529
8. Красников К. С., Лыжов Н. В. Численные исследования на математической модели вспенивания с инъекцией газа. Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. 2021. Вып. 1 (132). С. 23–30
9. Zhu Sh., Zhao Q., Li X., Liu Y. & Zhang T. CFD Simulation of gas-slag-metal multiphase flow in a side-blown vortex smelting reduction reactor. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2023. Vol. 9. P. 1033–1049
10. Errson M., Tillander A. Review on CFD simulation and modeling of decarburization processes. *Steel Research International*. 2018. Vol. 89 (1)
11. Wei J.-H., Zeng L. Numerical simulation of fluid flow in bath during combined top and bottom blowing VOD refining process of stainless steel. *Steel Research International*, 2012. Vol. 83 (11). P. 1053–1070
12. Wei J.-H., He Y., Shi G.-M. Mathematical modeling of fluid flow in bath during combined side and top blowing AOD refining process of stainless steel: Mathematical model of the fluid flow. *Steel Research International*. 2011. Vol. 82 (6). P.703–709
13. Singh V., Kumar J, Bhanu C., Ajmani S. K., Dash S. K. Optimization of the bottom tuyeres configuration for the BOF vessel using physical and mathematical modeling. *ISIJ Int.* 2007. Vol. 47(11). P. 1605–1612
14. Quiyoom A., Golani R., Singh V., Buwa V. V. Effect of differential flow schemes on gas-liquid flow and liquid phase mixing in a Basic Oxygen Furnace. *Chem. Eng. Sci.* 2017. Vol. 73 (9). P. 373–377
15. Чернятевич А. Г., Самохвалов О. С., Сігарьов Є. М., Чубіна О. А.

Математична модель гідродинаміки процесу продувки шлакової ванни у порожнині конвертера. Математичне моделювання. 2005. №1 (13). С. 76–78

16. Repossi E., Rosso R., Verani M. A phase-field model for liquid-gas mixtures: mathematical modelling and discontinuous Galerkin discretization. Modeling and scientific computing. 2016. Vol. 27. P. 1–36.

17. Misra P., Deo B., Chhabra R. Dynamic model of slag foaming in oxygen steelmaking converters. ISIJ International. 1998. Vol. 38 (11). P.1225–1232

18. Сигарев Е. Н., Сокол А. Н., Недбайло Н. Н. Компьютерное моделирование теплового состояния системы «гарнисаж – футеровка» с учетом неравномерности её толщины. Математичне моделювання. 2016. № 2 (35). С. 70–73.

19. Brandaleze E., Torresi U., Santini L. A refractory wear predictive model developed for BOF converters. Scholars Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 6 (1). P. 7–13

20. Demete J., Buľko B., Demeter P., Hrubovčáková M. Evaluation of factors affecting the MgO–C refractory lining degradation in a basic oxygen furnace. MDPI. 2023. Vol. 13 (22). P. 12473–12500

21. Gruber D. Optimisation of the Lining Design of a BOF Converter by Finite Element Simulations. Steel research international. 2004. Vol. 75 (7). P. 455–461

22. Paul S., Chosh D. N. Model study of mixing and mass transfer rates of slag-metal in top and bottom blown converters. Metal Trans B. 1986. Vol. 17 (3). P. 461–469

23. Ghosh D. N., Singh R. P. Cold model study of mixing time in hybrid process. Trans Iron Steel Inst. Japan. 1988. Vol. 28 (8). P. 659–662

24. Ajmani S. K., Chatterjee A. Cold model studies of mixing and mass transfer in steelmaking vessels. Ironmak. Steelmak. 2005. Vol. 32 (6). P. 515–527

25. Choudhary S. K., Ajmani S. K. Evaluation of bottom stirring system in BOF steelmaking vessel using cold model study and thermodynamic analysis. ISIJ Int. 2006. Vol. 46 (8). P. 1171–1176

26. Singh V., Lenka S. N., Ajmani S. K., Bhanu C., Pathak S. A novel bottom stirring scheme to improve BOF performance through mixing and mass transfer modeling. ISIJ Int. 2009. Vol. 49 (12). P. 1889–1894

27. Roth C., Peter M., Schindler M., Koch K. Cold model investigation into the effects of bottom blowing in metallurgical reactors. Steel Res. 1995. Vol. 66 (8). P. 325–330

28. Roth C., Peter M., Juhart M., Koch K. Cold model investigations of fluid flows and mixing within top and combined blown in metallurgical process. Steel Res. 1999. Vol. 70 (12). P.502–507

29. Olivares O., Elias A., Sanchez R., Diaz-Cruz M., Morales R. D. Physical and mathematical models of gas-liquid fluid dynamics in LD converters. Steel Res. 2002. Vol. 73 (2). P. 44–51

30. Oymo D., Guthrie R. I. L. Mixing times in combination blowing process. Proceedings of the process technology conference. 1984. P. 45–52

31. Martin M., Rendueles M., Diaz M. Steel-slag mass transfer in steel converter, bottom and top/bottom combined blowing through cold model experiments. Chem.Eng.Res.Des. 2005. Vol. 83 (9). P.1076–1084

32. Wu W., Bin Yang L., Zheng C. J., Liu L. Cold simulation of oxygen transfer rate in BOF. *J Iron Steel Res.*, 2010. Vol. 17. P. 7–13
33. Koria S.C., George A. Selection of bottom injection parameters in combined blown steelmaking. *Ironmak. Steelmak.* 1988. Vol. 15 (3). P. 127–133
34. Koria S. C., Pal S. Experimental study of the effect of gas injection parameters on the bath mixing intensity induced during steelmaking. *Process. Metall.* 1991. Vol. 62 (2). P. 47–53
35. Evestendt M., Medvedev A. Cavity shape dynamical modeling and estimation in water model of the steel converter process. *J Jpn. Soc. Exp. Mech.* 2007. v. 7. P. 93–98
36. Cheslak F. R., Nicholls J. A., Sichel M. Cavities formed on liquid surfaces by impinging gaseous jets. *J Fluid. Mech.* 1969. Vol. 36 (1). P. 55–63
37. Nordquist A., Kumbhat N., Jonsson L., Jonsson P. The effect of nozzle diameter, lance height and flow rate on penetration depth in a top-blown water model. *Steel Res. Int.* 2006. Vol. 77 (2). P. 82–90
38. Li Q., Li M., Kuang S., Zou Z. Numerical simulation of the interaction between supersonic oxygen jets and molten slag-metal bath in steelmaking BOF process. *Metal Mater. Trans. B.* 2015. Vol. 46 (3). P. 1494–1509
39. Naito K-I., Asahara N., Kaizawa A., Ogawa Y., Kitagawa I., Inomoto T. Behavior of top-blowing lance jets in BOF. *Nippon Steel Tech. Rep.* 2013. Vol. 104. P. 33–41
40. Lee M. S., O'Rourke S. L., Molloy N. A. Oscillatory flow in the steelmaking vessel. *Scand. J Metall.* 2003. Vol. 32 (5). P. 281–288
41. Luoma M. J., Fabritius T. M. J., Harkki J. J. The effect of bottom nozzle configuration on the bath behavior in the BOF. *ISIJ Int.* 2004. v. 44 (5). P. 809–816
42. Sabah S., Brooks G. Study of cavity modes in BOF by analysis of sound. *Ironmak. Steelmak.* 2016. Vol. 43 (6). P. 473–480
43. Shi J., Luo X., Li J., Jiang J. Investigation on penetration model of shaped charge jet in water. *Mod. Phys. Lett. B.* 2016. Vol. 30 (2). P. 1–15
44. Камкіна Л. В., Мішалкін А. П., Камкін В. Ю., М'яновська Я. В., Дворковий О. І., Ісаєва Л. Є. Моделювання впливу режиму продування ванни на масообмінні процеси та шлакоутворення у кисневому конвертері. *Теорія і практика металургії.* 2022. №1. С. 27–37.
45. Gerlach F., Froberg M.G. Mass transfer in bottom blowing cold model converter. *Steel Res.* 1993. Vol. 64 (1). P. 7–14
46. Deo B., Overbosch A., Snoeijer B., Das D., Srinivas K. Control of slag formation, foaming, slopping and chaos in BOF. *Trans. IndianInst. Met.* Dec. 2013. Vol. 66 (5–6). P. 543–554
47. Ascanio G. Mixing time in stirred vessels: a review of experimental techniques. *Chin. J Chem. Eng.* 2015. Vol. 23 (7). P. 1065–1076
48. Melton L. A., Lipp C. W., Spredling R. W., Paulson K. A. Determination of mixing time through color changes. *Chem. Eng. Comm.* 2002. Vol. 189 (3). P. 322–228
49. Ascanio G., Foucault S., Tanguy P.A. Time-periodic mixing of shear-thinning fluids. *Chem. Eng. Res. Des. Sep.* 2004. Vol. 82 (9). P. 1199–1203
50. Kuo T. Y., Kuo J. C. Determination of mixing time in a ladle-refining process

using optical image processing. ISIJ Int. 2011. Vol. 510 (10). P. 1597–1600

51. Wuppermann C., Giesselmann N., Ruckert A., Pfeifer H., Odenthal H. J., Hovestadt E. A novel approach to determine the mixing time in a water model of an AOD converter. ISIJ Int. 2012. Vol. 52 (10). P.1817–1823

52. Kumar A., Malathi M., Godiwalla K. M., Chacko E. Z., Ajmani S. K., Ranganathan S. Cold model study of submerged peripheral gas bubbling from a cylindrical dispenser. ISIJ Int. 2014. Vol. 54 (10). P. 2239–2247

53. Rosseburg A., Fitschen J., Wutz J., Wucherpfennig T., Schluter M. Hydrodynamic inhomogeneties in large scale stirred tanks – influence on mixing time. Chem. Eng. Sci. 2018. Vol. 188. P. 208–220

54. Chen C., Rui Q., Cheng G. Effect of salt tracer amount on the mixing time measurement in a hydrodynamic model of gas-stirred ladle system. Steel Res. Int. 2013. Vol. 84 (9). P. 900–907

55. Martin M., Rendueles M., Diaz M. Global and local mixing determinations for steel converter analysis. Chem. Eng. Sci. 2005. Vol. 60 (21). P.5781–5791

56. Stisovic T., Koch K. Bottom blowing investigations on a cold model reactor to optimize mixing behavior in metallurgical processes. Steel Res. 2002. Vol. 73 (9). P. 373–377

57. Martin M., Diaz M. Gas–liquid and gas-liquid-liquid reactors with top and bottom blowing: I. Fluid dynamic regimes. Chem. Eng. Common. 2002. Vol. 189 (2). P. 543–570

58. Martin M., Rendueles M., Diaz M. Emulsion analysis in a gas/liquid reactor with top blowing. Can. J Chem. Eng. 2004, Vol. 82. P.249–255

59. Kawabe Y., Uddin M. A., Kato Y, Seok M. O., Lee S. B. Correlation between liquid/liquid and gas/liquid mass transfer in top/bottom blowing converter. ISIJ Int. 2017. Vol. 57 (2). P. 296–303

60. Cao L. L. Modeling of gas-slag-metal multiphase fluid during basic oxygen steelmaking process. Ph.D. Thesis, University of Science and Technology Beijing, Beijing, China, 2019.

61. Balkos T., Batham J., Russo T., Fash R., Howanski B. Cold shroud-boosting converter performance. Proceedings of the 6th European Oxygen Steelmaking Conference, Aachen, Germany, 26–28 June 2006. P. 179–185.

62. Чернятевич А. Г., Вакульчук В. В., Молчанов Л. С., Юшкевич П. О., Сигарев Е. Н., Чубин К. И., Чубина Е. А. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с использованием двухъярусной кислородной фурмы. Теория и практика металлургии. 2017. № 3-4. С. 79–85.

63. Чернятевич А. Г., Сигарев Е. Н., Чернятевич И. В. Новые разработки конструкций кислородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Теория и практика металлургии. 2010. № 2. С. 31–38

64. Murashov I. and Stroganov Y. Method of determining vehicle speed according to video stream data. J. Phys.: Conf. Ser. 1419 012020, IOP Publishing, 2019. P. 1–6

65. Hashim K. M. Suggest a mathematical model to measure the speed of vehicles via video. Journal of Education for Pure Science- University of Thi-Qar. 2022. Vol. 12. Iss. 2. P. 130–139

66. Jawad H. M., Husain T. A. Measuring Object dimensions and its distances based on image processing technique by analysis the image using sony camera. *Eurasian Journal of Science & Engineering*. 2017. Vol. 3. Iss. 2, P. 100–110

67. Viola P., Jones M. Robust real-time object detection. *Intl. J. Computer Vision*. 2004. Vol. 57 (2). P. 137–154.

References

1. Zhang, Y. C., Zhang, C. J., Zhu, L. G., & Zhou, Q. L. (2019). Numerical simulation of high Mach number oxygen lance under high oxygen pressure. *Iron and Steel*, 54, 32–38

2. Li, Q., Li, M.-M., Li, L., & Zou, Z.-S. (2013). Numerical analysis on oxygen jet characteristic for BOF convertor top-blown process based on CFD method. *Journal of Northeastern University*, 34(6), 828–831

3. Kemminger, A., Krause, F., & Odenthal, H.-J. (2022). CFD simulation of top-blown converters. *Conference: 9th EOSC European Oxygen Steelmaking Conference At Aachen*.

4. Wang, W., Yuan, Z., Matsuura, H., Zhao, H., Dai, Ch., & Tsukihashi, F. (2010). Three-dimensional Compressible Flow Simulation of Top-blown Multiple Jets in Converter. *ISIJ International*, 50(4), 491–500

5. Hu, S. Y., Zhu, R., & Dong, K. (2018). Numerical simulation research on flow in combined blown converter at steelmaking temperature. *Chin. J. Eng*, 40, 108–115

6. Wang, H., Zhu, R., Gu, Y. L., & Wang, C. J. (2014). Behavior of supersonic oxygen jet injected from four-hole lance during top-blown converter steelmaking process. *Can. Metall. Q.*, 53, 367–380

7. Li, M. M., Li Q., Kuang, S. B., & Zou, Z. S. (2015). Coalescences of supersonic jets from multi-nozzle oxygen lance in steelmaking BOF. *Steel Res. Int.*, 86, 1517–1529

8. Krasnikov, K. S., & Lyzhov, N. V. (2021). Chislennyye issledovaniya na matematicheskoj modeli vspenivaniya s inzhekciej gaza. [Numerical studies on a mathematical model of foaming with gas injection]. *System technologies*, 1(132), 23–30

9. Zhu, Sh., Zhao, Q., Li, X., Liu, Y. & Zhang, T. (2023). CFD Simulation of gas-slag-metal multiphase flow in a side-blown vortex smelting reduction reactor. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 9, 1033–1049

10. Errson, M., & Tillander, A. (2018). Review on CFD simulation and modeling of decarburization processes. *Steel Research International*, 89(1)

11. Wei, J.-H., & Zeng, L. (2012). Numerical simulation of fluid flow in bath during combined top and bottom blowing VOD refining process of stainless steel. *Steel Research International*, 83(11), 1053–1070

12. Wei, J.-H., He, Y., & Shi, G.-M. (2011). Mathematical modeling of fluid flow in bath during combined side and top blowing AOD refining process of stainless steel: Mathematical model of the fluid flow. *Steel Research International*, 82(6), 703–709

13. Singh, V., Kumar, J, Bhanu, C., Ajmani, S. K., & Dash, S. K. (2007). Optimization of the bottom tuyeres configuration for the BOF vessel using physical and mathematical modeling. *ISIJ Int.*, 47(11), 1605–1612

14. Quiyoom, A., Golani, R., Singh, V., & Buwa, V. V. (2017). Effect of

differential flow schemes on gas-liquid flow and liquid phase mixing in a Basic Oxygen Furnace. *Chem. Eng. Sci.*, 73 (9), 373–377

15. Cherniatevych, A. G., Samohvalov, O. S., Sigarev, Ye. M., & Chubina, O. A. (2005). Matematichna model gidrodynamiky procesu produvki shlakovoy vanny u porozhnyni konvertera [Mathematical model of hydrodynamics of the process of blowing the slag bath at an empty converter]. *Mathematical modeling*, 1(13), 76–78

16. Repossi, E., Rosso, R., & Verani, M. (2016). A phase-field model for liquid-gas mixtures: mathematical modelling and discontinuous Galerkin discretization. *Modeling and scientific computing*, 27,1–36

17. Misra, P., Deo, B., & Chhabra, R. (1998). Dynamic model of slag foaming in oxygen steelmaking converters. *ISIJ International*, 38(11), 1225–1232

18. Sigarev, Ye. N., Sokol, A. N., & Nedbajlo, N. N. (2016). Komputernoje modelirovanie teplovogo sostojania sistemy "garnisazh - furerovka" s uchetom neravnomernosti ee tolschiny [Computer modeling of the thermal state of the "skull – lining" system taking into account the unevenness of its thickness]. *Mathematical modeling*, 2(35), 70–73

19. Brandaleze, E., Torresi, U., & Santini, L. (2018). A refractory wear predictive model developed for BOF converters. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 6(1), 7–13

20. Demete, J., Bul'ko, B., Demeter, P., & Hrubovčáková M. (2023). Evaluation of factors affecting the MgO–C refractory lining degradation in a basic oxygen furnace. *MDPI*, 13(22), 12473–12500

21. Gruber, D. (2004). Optimisation of the Lining Design of a BOF Converter by Finite Element Simulations. *Steel research international*, 75(7), 455–461

22. Paul, S., & Chosh, D. N. (1986). Model study of mixing and mass transfer rates of slag-metal in top and bottom blown converters. *Metal Trans B*, 17(3), 461–469

23. Ghosh, D. N., & Singh, R. P. (1988). Cold model study of mixing time in hybrid prosecc. *Trans Iron Steel Inst. Japan*, 28(8), 659–662

24. Ajmani, S. K., & Chatterjee, A. (2005). Cold model studies of mixing and mass transfer in steelmaking vessels. *Ironmak. Steelmak*, 32(6), 515–527

25. Choudhary, S. K., & Ajmani, S. K. (2006). Evaluation of bottom stirring system in BOF steelmaking vessel using cold model study and thermodynamic analysis. *ISIJ Int*, 46(8), 1171–1176

26. Singh, V., Lenka, S. N., Ajmani, S. K., Bhanu, C., & Pathak, S. (2009). A novel bottom stirring scheme to improve BOF performance through mixing and mass transfer modeling. *ISIJ Int*, 49(12), 1889–1894

27. Roth, C., Peter, M., Schindler, M., & Koch, K. (1995). Cold model investigation into the effects of bottom blowing in metallurgical reactors. *Steel Res.*, 66(8), 325–330

28. Roth, C., Peter, M., Juhart, M., & Koch, K. (1999). Cold model investigations of fluid flows and mixing within top and combined blown in metallurgical process. *Steel Res.*, 70(12), 502–507

29. Olivares, O., Elias, A., Sanchez, R., Diaz-Cruz, M., & Morales, R. D. (2002). Physical and mathematical models of gas-liquid fluid dynamics in LD converters.

Steel Res., 73(2), 44–51

30. Oymo, D., & Guthrie, R. I. L. (1984). Mixing times in combination blowing process. *Proceedings of the process technology conference*, 45–52

31. Martin, M., Rendueles, M., & Diaz, M. (2005). Steel-slag mass transfer in steel converter, bottom and top/bottom combined blowing through cold model experiments. *Chem.Eng.Res.Des.*, 83(9), 1076–1084

32. Wu, W., Bin, Yang L., Zheng, C. J., & Liu, L. (2010). Cold simulation of oxygen transfer rate in BOF. *J Iron Steel Res.*, 17, 7–13

33. Koria, S.C., & George, A. (1988). Selection of bottom injection parameters in combined blown steelmaking. *Ironmak. Steelmak.*, 15(3), 127–133

34. Koria, S. C., & Pal, S. (1991). Experimental study of the effect of gas injection parameters on the bath mixing intensity induced during steelmaking. *Process. Metall.*, 62(2), 47–53

35. Evestendt, M., & Medvedev, A. (2007). Cavity shape dynamical modeling and estimation in water model of the steel converter process. *J Jpn. Soc. Exp. Mech.*, 7, 93–98

36. Cheslak, F. R., Nicholls, J. A., & Sichel, M. (1969). Cavities formed on liquid surfaces by impinging gaseous jets. *J Fluid. Mech.*, 36(1), 55–63

37. Nordquist, A., Kumbhat, N., Jonsson, L., & Jonsson, P. (2006). The effect of nozzle diameter, lance height and flow rate on penetration depth in a top-blown water model. *Steel Res. Int.* vol. 77 (2). P. 82–90

38. Li, Q., Li, M., Kuang, S., Zou, Z. (2015). Numerical simulation of the interaction between supersonic oxygen jets and molten slag-metal bath in steelmaking BOF process. *Metal Mater. Trans. B.* vol. 46 (3). P. 1494–1509

39. Naito, K-I., Asahara, N., Kaizawa, A., Ogawa, Y., Kitagawa, I., & Inomoto, T. (2013). Behavior of top-blowing lance jets in BOF. *Nippon Steel Tech. Rep.*, 104, 33–41

40. Lee, M. S., O'Rourke, S. L., & Molloy, N. A. (2003). Oscillatory flow in the steelmaking vessel. *Scand. J Metall.*, 32(5), 281–288

41. Luoma, M. J., Fabritius, T. M. J., & Harkki, J. J. (2004). The effect of bottom nozzle configuration on the bath behavior in the BOF. *ISIJ Int.*, 44(5), 809–816

42. Sabah, S., & Brooks, G. (2016). Study of cavity modes in BOF by analysis of sound. *Ironmak. Steelmak*, 43(6), 473–480

43. Shi, J., Luo, X., Li J., & Jiang, J. (2016). Investigation on penetration model of shaped charge jet in water. *Mod. Phys. Lett. B.*, 30(2), 1–15

44. Kamkina, L. V., Mishalkin, A. P., Kamkin, V. Yu., Mianovska, Ya. V., Dvorkovyj O. I., & Isaeva L. Ye. (2022). Modeluvannia vplyvu rezhymu produvannia vanny na masoobminni process ta shlakoutvorannia u kysnevomu konverteri [Simulation of the bath blowing mode in the mass exchange process and slag removal in the sour converter]. *Theory and practice of metallurgy*, (1), 27–37

45. Gerlach, F., & Froberg, M. G. (1993). Mass transfer in bottom blowing cold model converter. *Steel Res.*, 64(1), 7–14

46. Deo, B., Overbosch, A., Snoeijer, B., Das, D., & Srinivas, K. (2013). Control of slag formation, foaming, slopping and chaos in BOF. *Trans. IndianInst. Met. Dec.*, 66(5–6), 543–554

47. Ascanio, G. (2015). Mixing time in stirred vessels: a review of experimental techniques. *Chin. J Chem. Eng.*, 23(7), 1065–1076
48. Melton, L. A., Lipp, C. W., Spredling, R. W., & Paulson, K. A. (2002). Determination of mixing time through color changes. *Chem. Eng. Comm.*, 189(3), 322–228
49. Ascanio, G., Foucault, S., & Tanguy, P. A. (2004). Time-periodic mixing of shear-thinning fluids. *Chem. Eng. Res. Des. Sep.*, 82(9), 1199–1203
50. Kuo, T. Y., & Kuo, J. C. (2011). Determination of mixing time in a ladle-refining process using optical image processing. *ISIJ Int.*, 51(10), 1597–1600
51. Wuppermann, C., Giesselmann, N., Ruckert, A., Pfeifer, H., Odenthal, H. J., & Hovestadt, E. (2012). A novel approach to determine the mixing time in a water model of an AOD converter. *ISIJ Int.*, 52(10), 1817–1823
52. Kumar, A., Malathi, M., Godiwalla, K. M., Chacko, E. Z., Ajmani, S. K., & Ranganathan, S. (2014). Cold model study of submerged peripheral gas bubbling from a cylindrical dispenser. *ISIJ Int.*, 54(10), 2239–2247
53. Rosseburg, A., Fitschen, J., Wutz, J., Wucherpfennig, T., & Schluter, M. (2018). Hydrodynamic inhomogenities in large scale stirred tanks – influence on mixing time. *Chem. Eng. Sci.*, 188, 208–220
54. Chen, C., Rui, Q., & Cheng, G. (2013). Effect of salt tracer amount on the mixing time measurement in a hydrodynamic model of gas-stirred ladle system. *Steel Res. Int.*, 84(9), 900–907
55. Martin, M., Rendueles, M., & Diaz, M. (2005). Global and local mixing determinations for steel converter analysis. *Chem. Eng. Sci.*, 60(21), 5781–5791
56. Stisovic, T., & Koch, K. (2002). Bottom blowing investigations on a cold model reactor to optimize mixing behavior in metallurgical processes. *Steel Res.*, 73(9), 373–377
57. Martin, M., & Diaz, M. (2002). Gas–liquid and gas-liquid-liquid reactors with top and bottom blowing: I. Fluid dynamic regimes. *Chem. Eng. Common.*, 189(2), 543–570
58. Martin, M., Rendueles, M., & Diaz, M. (2004). Emulsion analysis in a gas/liquid reactor with top blowing. *Can. J Chem. Eng.*, 82, 249–255
59. Kawabe, Y., Uddin, M. A., Kato, Y., Seok, M. O., & Lee, S. B. (2017). Correlation between liquid/liquid and gas/liquid mass transfer in top/bottom blowing converter. *ISIJ Int.*, 57(2), 296–303
60. Cao, L. L. (2019). *Modeling of gas-slag-metal multiphase fluid during basic oxygen steelmaking process*. Ph.D. Thesis, University of Science and Technology Beijing, Beijing, China.
61. Balkos, T., Batham, J., Russo, T., Fash, R., & Howanski, B. (2006). Cold shroud-boosting converter performance. *Proceedings of the 6th European Oxygen Steelmaking Conference, Aachen, Germany, 26–28 June 2006*. P. 179–185.
62. Cherniatevych, A. G., Vakulchuk, V. V., Molchanov, L. S., Yushkevich, P. O., Sigarev, Ye. N., Chubin, K. I., & Chubina, Ye. A. (2017). Vysokotemperaturnoe modelirovanie produvki konvertersnoy vannoy s ispolzovaniem dvuhjarusnoy kislorodnoy furny [High temperature modeling of converter bath blowdown using a double-level oxygen lance]. *Theory and practice of metallurgy*, (3-4), 79–85
63. Cherniatevych, A. G., Sigarev, Ye. N., & Cherniatevych, I. V. (2010). Novye

razrabotki konstrukcij kislorodnyh furn I sposobov produvki vanny 160-t konverterov PJSC "ArcelorMittal Kryvyj Rig" [New developments in the design of oxygen tuyeres and methods for purging the bath of 160-ton converters of PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih"]. *Theory and practice of metallurgy*, (2), 31–38

64. Murashov, I. & Stroganov, Y. (2019). Method of determining vehicle speed according to video stream data. *IOP Publishing. J. Phys.: Conf. Ser.*, 1419, 012020

65. Hashim, K. M. (2022). Suggest a mathematical model to measure the speed of vehicles via video. *Journal of Education for Pure Science- University of Thi-Qar*, 12(2), 130–139

66. Jawad, H. M., & Husain, T. A. (2017). Measuring object dimensions and its distances based on image processing technique by analysis the image using sony camera. *Eurasian Journal of Science & Engineering*, 3(2), 100–110

67. Viola, P., & Jones, M. (2004). Robust real-time object detection. *Intl. J. Computer Vision.*, 57(2), 137–154

L. S. Molchanov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6139-5956

T. S. Golub¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9269-2953

S. I. Semykin¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7365-2259

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

METHODOLOGICAL ASPECTS OF ANALYSIS AND INTERPRETATION OF THE RESULTS OF PHYSICAL MODELING OF THE PROCESSES OF INTERACTION OF GAS JETS WITH LIQUID PHASES OF AN OXYGEN-CONVERTER BATH

Abstract. The steel industry is an integral part of modern heavy industry and a base for other industries, as it provides structural materials, among which steel of various grades occupies an important place. In the world, a larger share of steel production falls on oxygen converter process. That fact determines the relevance of constant development and improvement of the process from both technological and environmental aspects. However, any innovation requires research and testing that cannot be carried out in industrial conditions due to the possibility of harming current production and wasting time and resources. Because of this, the direction of modeling the oxygen converter process is actively developing. Modeling can take place physically on cold models or high temperature models, or virtually using mathematical models. However, the latter require preliminary research on physical models to search for patterns that will become their basis. Thus, physical full-scale modeling is an integral basis and source of information about all processes that accompany the production of steel. However, each obtained result must be adequately interpreted. Thus, the paper proposes options for studying and interpreting the dynamic indicators of the blowing process based on the results obtained by physical modeling. The developed methods were used to evaluate various options for cold modeling using aqueous two-phase models, where water simulating liquid steel and other liquid simulating slag are used as model liquids; and high-temperature modeling on a real metal melt on a small scale. The dynamic features of the movement of phases during top blowing were established, that were determined using the specified

modeling methods, namely the speed of movement of particles of one phase simulating slag when entering another phase simulating steel melt during blowing; movement of the bath surface depending on technological parameters and based on the results of high temperature modeling, the features of the pulsation of the blowing well, which creates by a jet of blowing gas, have been established.

Key words: oxygen-converter process, cold modeling, high temperature modeling, blowing, velocity of phase movement.

For citation: Molchanov, L. S., Golub, T. S., & Semykin, S. I. (2024). Methodological aspects of analysis and interpretation of the results of physical modeling of the processes of interaction of gas jets with liquid phases of an oxygen-converter bath. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 232-252. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-232-252>

Стаття надійшла до редакції збірника 01.11.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)