

УДК 669.162.63

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

**І. О. Маначин**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., с.н.с., ORCID 0000-0001-9795-6751

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

**О. Л. Руденко**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-6068-9901

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНЖЕКЦІЙНОГО ВВЕДЕННЯ ГАЗОПОРОШКОВИХ СТРУМЕНІВ МЕТОДАМИ «ХОЛОДНОГО» МОДЕЛЮВАННЯ

**Анотація.** Метою роботи є вивчення на «холодних» моделях процесів інжекційного введення газопорошкових струменів в рідку ванну, визначення параметрів обробки. Для реалізації «холодного» моделювання на лабораторній базі Інститута чорної металургії була змонтована установка, яка забезпечує регульований ввід реагента. У якості реагентів використовувалися сода, вапно, оксид заліза (II). Моделювання проводили з видачею реагента у суху ємкість та у ємкість з водою, яка була імітацією ковша. Перед засипанням реагента у дозуючий пристрій проводилося просювання, діаметр комірки найменшого сита складав 1 мм. Також у реагент додавався ПАР для покращення руху реагенту. Під час роботи установки проводилася фіксація показників манометрів, які встановлені на трасі відведення газозносія та на дозувальному пристрою. Проведена тарування дозуючого пристрою. Також під час інжектування у ківш з водою проводилася відеофіксація поведінки струменя без реагенту при зануренні, а також початок подачі реагенту та поверхні «розплаву». Поведено низку обробок при різній витраті газозносія та при різній інтенсивності подачі реагенту. Отримано зведену таблицю результатів обробок, яка стала основою для подальшої обробки результатів досліджень на «холодного» моделювання. Показано систему рівнянь для одновимірного двофазного стаціонарного потоку. До цієї системи додано рівняння стану газу, рівняння для визначення теплообміну газу зі стінкою труби, рівняння міжфазової сили, приєднаної маси та для міжфазного теплового потоку. Виходячи з природних міркувань сформульовані граничні умови. З використанням розробленої методики виконано розрахунки перепаду тисків, швидкостей газової та твердої фаз для частинок CaO з діаметром 60, 100 мкм; FeO - 70, 450 мкм; Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> - 100 мкм).

**Ключові слова:** суміш реагентів, «холодна» модель, інжекція, комплексна обробка, гідродинаміка.

© 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>

**Посилання для цитування:** Дослідження інжекційного введення газопорошкових струменів методами «холодного» моделювання / В. Г. Кисляков, І. О. Маначин, В. І. Єлісєєв, О. Л. Руденко // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 186-198. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-186-198>.

**Стан питання.** В сучасних умовах вітчизняні металургійні підприємства, а особливо сталеплавильне виробництво в їх складі, зазнають значного негативного впливу дефіциту якісної сировини, відсутності стабільності шихтових матеріалів, що надходять. При цьому в світовій практиці для подолання зазначених проблем використовують технічні рішення, що до позапічної обробки шихтових матеріалів, зокрема й рідкого чавуну [1-3]. Таким чином, актуальним питанням вітчизняної металургійної науки є встановлення ефективності найбільш розповсюджених методів позапічної обробки чавуну стосовно сучасних реалій існування вітчизняного сталеплавильного виробництва.

Ефективним способом рафінування чавуну є інжектування порошкоподібних реагентів. Вдування реагентів у розплав забезпечує максимальну поверхню контакту і швидкість їхньої взаємодії з рідким металом. При цьому реагенти вдуваються в розплав струменем газу-носія, який також чинить певний рафінуючий вплив на метал. Усе це сприяє досягненню високої швидкості процесів масообміну і найповнішого видалення з металу шкідливих домішок за істотно меншої витрати реагентів [4].

**Мета роботи.** Вивчення на «холодних» моделях процесів інжекційного введення газопорошкових струменів в рідку ванну, визначення параметрів обробки

**Опис лабораторних досліджень.** Лабораторну установку реалізовано на лабораторній базі ІЧМ. На рис. 1. представлена схема установки з розмірами ділянок з'єднань між елементами. Зовнішній вигляд змонтованої установки представлено на рис. 2.

Для проведення досліджень були використані такі реагенти – кальцинована сода, негашене вапно, оксид заліза (II) та рідина ПАР.

Змонтована установка була перевірена на предмет витoku повітря. Були виконані роботи по його усуненню, що дозволило перейти до наступного етапу проведення випробувань.

На наступному етапі були зроблені випробування установки без реагентів (рис. 3, а), з використанням соди (рис. 3, б), з використанням вапна (рис 3, в) та з використанням суміші  $\text{CaO-Na}_2\text{CO}_3\text{-FeO}$  (рис. 3, г).

Перед засипанням реагента у дозуючий пристрій проводилося просіювання, діаметр комірки найменшого сита складав 1 мм. Також у

реагент додавався ПАР для покращення руху реагенту по трасі подачі матеріалу «шланг-фурма».

Під час роботи установки при зміні витрати газоносія, а також інтенсивності подачі реагента проводилася фіксація показників манометрів РТ1 і РТ2.

Проведено оціночне тарування дозуючого пристрою. Для цього на декількох фіксованих значеннях обертів електроприводу було проведено видачу реагенту в тару з подальшим зваженням матеріалу, що був виданий за заданий час.

Також під час інжектування у ківш з водою проводилася відеофіксація поведінки струменя без реагенту при зануренні, а також початок подачі реагенту.

У таблиці 1-4 представлені зведені дані про технологічні параметри проведених експериментів.

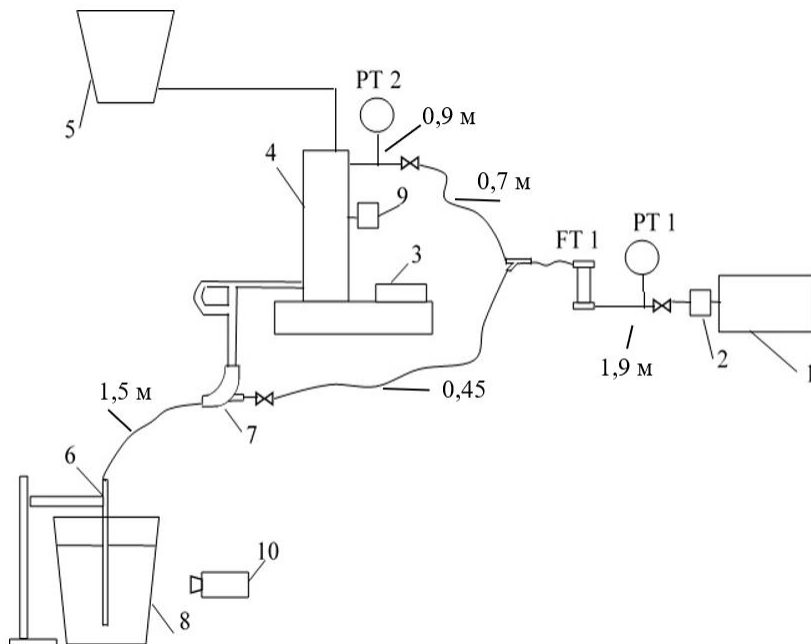


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки для холодного моделювання процесу вдування газових і двофазних потоків у рідку ванну: 1 – компресор, 2 – осушувач повітря, 3 – електропривід, 4 – дозувальний пристрій, 5 – видатковий бункер реагентів, 6 – фурма, 7 – аерокамера, 8 – ківш, 9 – вібратор, 10 – відеокамера



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд лабораторної установки.

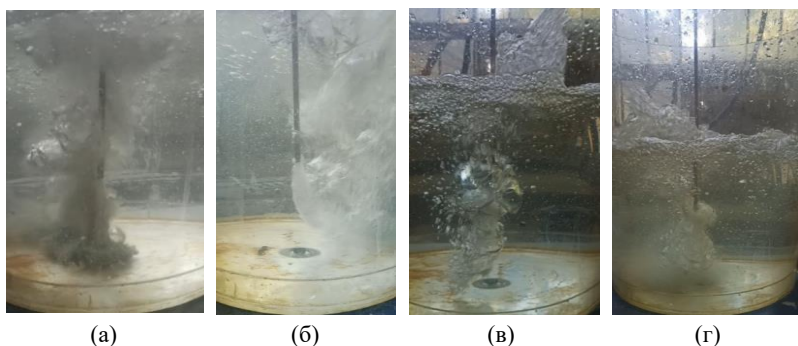


Рисунок 3 – Кадри інжекції без подачі реагентів (а), з подачею соди (б), з подачею вапна (в), з подачею суміші реагентів (г)

Таблиця 1 – Технологічні параметри експеримента без реагентів

Реагент	Зафіксована маса, гр	Концентрація	Витрата газоносія, м <sup>3</sup> /год	Тиск на вході установки, МПа	Тиск у витратному пристрої, МПа
Подача газоносія в дозуючий пристрій зверху закрита					
-	-	-	3,6	0,26	0,08
-	-	-	4,2	0,22	0,1
-	-	-	5,4	0,20	0,14
Подача газоносія в дозуючий пристрій зверху відкрита					
-	-	-	5,7	0,18	0,14

Таблиця 2 – Технологічні параметри експеримента з содою

Реагент	Інтенсивність, гр/хв	Концентрація, кг/м <sup>3</sup>	Витрата газоносія, м <sup>3</sup> /год	Тиск на вході установки, МПа	Тиск у витратному пристрої, МПа
Видача реагенту в атмосферу					
сода	400	6,66	3,6	0,15	0,08
сода	550	7,85	4,2	0,20	0,1
Видача реагента у ківш з водою					
сода	550	11,00	3,0	0,28	0,08
сода	550	9,17	3,6	0,24	0,1

Таблиця 3 – Технологічні параметри експеримента з вапном

Реагент	Інтенсивність, гр/хв	Концентрація, кг/м <sup>3</sup>	Витрата газоносія, м <sup>3</sup> /год	Тиск на вході установки, МПа	Тиск у витратному пристрої, МПа
Видача реагенту в атмосферу					
вапно	100	2,00	3,0	0,15	0,1
вапно	100	1,66	3,6	0,20	0,14
вапно	160	2,46	3,9	0,215	0,2
вапно	160	2,29	4,2	0,22	0,16
Видача реагента у ківш з водою					
вапно	160	3,56	2,7	0,24	0,12
вапно	160	2,90	3,3	0,22	0,08

Таблиця 4 – Технологічні параметри експеримента з сумішшю реагентів

Реагент	Інтенсивність, гр/хв	Концентрація, кг/м <sup>3</sup>	Витрата газоносія, м <sup>3</sup> /год	Тиск на вході установки, МПа	Тиск у витратному пристрої, МПа
Видача реагенту в атмосферу					
суміш	230	3,29	4,2	0,22	0,08
суміш	410	6,83	3,6	0,20	0,16
Видача реагента у ківш з водою					
суміш	230	4,18	3,3	0,22	0,08
суміш	410	8,2	3,0	0,22	0,10
суміш	230	3,54	3,9	0,22	0,1
суміш	410	6,31	3,9	0,21	0,1
суміш	410	9,11	2,7	0,28	0,006

**Результати дослідження.** Для розрахунків параметрів течії газу з твердими частинками використовуємо теорію багатофазних потоків. Вона набула свого розвитку в другій половині минулого століття в

роботах багатьох учених і нині має досить велику літературу, наприклад [5-7]. Найбільш повного представлення вона набула в роботах Нігматуліна [6] для газорідних потоків для випадку беззіштовхливого монодисперсного середовища. Результати цієї роботи повною мірою можна використати і в разі течії досить щільних дисперсних потоків за певних умов і припущень. Актуальність цієї теми останнім часом не слабшає, тому список робіт постійно поповнюється, наприклад, [8-11]. У них використовуються різні підходи та досліджуються різні деталі процесу транспортування. У цій роботі використовуємо теорію одновимірного двофазного стаціонарного потоку, відпрацьовану на реальних пневмотранспортних системах подачі сипучого порошку магнію для десульфурзації чавуну [12]. Випишемо основні рівняння:

$$\alpha_G \rho_G u_G S_T = G_G = \text{Const}, \quad (1)$$

$$\alpha_C \rho_C u_C S_T = G_C = \text{Const}, \quad (2)$$

$$G_G \frac{du_G}{dx} = -\alpha_G S_T \frac{dp}{dx} + \alpha_G 2\pi R_T \tau_G - \alpha_G n S_T (f_m + f_\mu) + \alpha_G \rho_G S_T g \text{Cos}\vartheta, \quad (3)$$

$$G_C \frac{du_C}{dx} = -\alpha_C S_T \frac{dp}{dx} + \alpha_C 2\pi R_T \tau_C + \alpha_G n S_T (f_m + f_\mu) + \alpha_C \rho_C S_T g \text{Cos}\vartheta, \quad (4)$$

$$G_G \frac{d(c_p T_G)}{dx} = G_G \frac{dp}{\rho_G dx} + n S_T q_{GC} + 2\pi R_T \alpha_G q_G + \alpha_G n S_T (f_m + f_\mu) (u_G - u_C) \quad (5)$$

$$G_C \frac{d(c_T T_C)}{dx} = -n S_T q_{GC} + 2\pi R_T \alpha_C q_C, \quad (6)$$

де  $x$  - поздовжня координата;  $\alpha_G, \alpha_C$  - об'ємні частки фаз;  $\rho_G, \rho_C$  - щільності;  $u_G, u_C$  - проекції швидкостей відповідних фаз;  $p$  - тиск;  $n$  - концентрація дисперсної фази;  $f_m$  - проекція сили у поздовжньому напрямку, пов'язана з приєднаною масою;  $f_\mu$  - проекція сили в'язкої міжфазної взаємодії;  $g$  - прискорення вільно падаючого тіла;  $T_G, T_C$  - температури фаз;  $q_{GC}$  - міжфазні теплові потоки;  $q_G, q_C$  - теплові потоки від стінки до фаз;  $S_T$  - площа перерізу циліндричної труби;  $R_T$  - радіус труби;  $G_G, G_C$  - витрати, відповідно, газу та дисперсного середовища;  $c$  - коефіцієнт теплоємності матеріалу частинок;  $c_p$  - коефіцієнт теплоємності газу при постійному тиску;  $\tau_G, \tau_C$  - напруги на стінці для газу та дисперсного матеріалу. (параметри розглядаються, як усереднені).

Ця система записана у припущенні, що між дисперсною та дисперсійною середовищами відсутній масообмін, крім того відкинута дисипативні та пульсаційні члени для несучого середовища, так як передбачається, що енергія міжфазової взаємодії значно перевищує ці енергетичні втрати. До записаних рівнянь необхідно додати рівняння

стану газу:

$$p = \rho_G R_G T_G, \quad (7)$$

де  $R_G$ - газова постійна газу-носія.

Виведемо тепер величини в правих частинах рівнянь (3 - 6), що визначають перебіг аналізованого середовища. Використовуємо для цього добре відомі формули, що описують взаємодії однорідних середовищ з твердими поверхнями каналів. Для розрахунків величини  $\tau_G$  для турбулентних потоків набула широкого застосування формула вигляду [13]:

$$\tau_G = \frac{1}{8} \xi \rho_G u_G^2, \quad \xi = 0.316 Re_T^{-1/4} \text{ при } Re_T \leq 10^4, Re_T = \frac{\rho_G u_G R_T}{\mu_G};$$

$$\xi = (1.82 \lg Re_T - 1.64)^{-2} \text{ при } 10^4 \leq Re_T \leq 5 \cdot 10^6, \quad (8)$$

де  $\mu_G$ - динамічний коефіцієнт в'язкості газу;  $Re_T$  - число Рейнольдса для труби.

Для визначення теплообміну газу зі стінкою труби є також добре апробовані формули, наприклад [14]:

$$q_G = \alpha_T (T_T - T_G), \quad \alpha_T = \frac{\lambda_G}{2R_T} Nu_T,$$

$$Nu_T = \frac{\xi Re_T Pr_G}{8k + 12.7 \sqrt{8\xi} (Pr_G^{1/2} - 1)}, \quad k = 1 + 900/Re_T, \quad Pr = \frac{c_p \mu_G}{\lambda_G}, \quad (9)$$

де  $\alpha_T$ - коефіцієнт тепловіддачі стінки;  $\lambda_G$  - коефіцієнт теплопровідності газу;  $Nu_T$  - число Нуссельта для каналу;  $Pr_G$  - число Прандтля для газу.

Міжфазова сила, визначається [6]:

$$f_\mu = \frac{1}{2} c_\mu \rho_G \pi R_G^2 |u_G - u_C| (u_G - u_C),$$

$$c_\mu = c_\mu^* = \frac{24}{Re_{GC}} + \frac{4.4}{Re_{GC}^{1/2}} + 0.42, \quad \alpha_C \leq 0.08,$$

$$c_\mu = c_\mu^{**} = \frac{4}{3\alpha_G} \left( 1.75 + \frac{150\alpha_C}{\alpha_G Re_{GC}} \right), \quad \alpha_C \geq 0.45,$$

$$c_\mu = \frac{(\alpha_C - 0.08)c_\mu^{**} + (0.45 - \alpha_C)c_\mu^*}{0.37}, \quad (10)$$

а силу приєднаної маси

$$f_m = \frac{2}{3} \pi R_G^3 \rho_G \left( \frac{du_G}{dt} - \frac{du_C}{dt} \right), \quad (11)$$

Також, матимемо вирази для міжфазного теплового потоку [6]

$$q_{GC} = 4\pi R_C^2 \alpha_{GC} (T_G - T_C), \quad \alpha_{GC} = \frac{\lambda_G}{2R_C} Nu_C,$$

$$Nu_C = 2 + 0.6 Re_{GC}^{1/2} Pr_G^{1/3}, \quad Re_{GC} = 2 \frac{\rho_G R_C |u_G - u_C|}{\mu_G}, \quad (12)$$

де  $\alpha_{GC}$  - коефіцієнт тепловіддачі;  $Nu_C$  - число Нуссельта для частинок,  $Re_{GC}$  - число Рейнольдса для частинок,  $R_C$  - радіус частинок.

Значні труднощі у визначенні становить величина, що значною мірою залежить від морфології поверхонь каналу та частинок, і навіть від локальних турбулентних пульсацій. У нашому випадку, враховуючи, що величина порівняно невелика, а стінки і частинки є металевими, тобто мають хорошу теплопровідність, в даній роботі відкинемо цей член в рівнянні (12). Величину  $\tau_C$  представимо у вигляді суми [12]:

$$\tau_C = \tau_C^W + \tau_C^G, \quad (13)$$

де, згідно [15]

$$\tau_C^G = \frac{1}{2} B_G \rho_C \frac{u_C R_T^2}{u_G R_C} g, \quad (14)$$

а  $\tau_C^W$  приймемо у вигляді

$$\tau_C^W = \frac{1}{2} B_W \rho_C u_G u_C \frac{R_T}{R_C}, \quad (15)$$

де  $B_G, B_W$  - коефіцієнти Бусройда, що підлягають визначенню з експерименту.

Вираз (15) одержуємо множенням формули (14) на число Фруда  $Fr = \frac{u_G^2}{D_T g}$ , внаслідок чого сила опору частинкам на вертикальній ділянці стає, згідно [16], незалежною від  $g$ . Наявність напруги  $\tau_C^G$  забезпечується тими силами, які діють на частинку в горизонтальних потоках [17], звісно, насамперед силою тяжіння, внаслідок чого в (14) присутня  $g$ . У вертикальних же потоках  $\tau_C^W$  викликано турбулентними пульсаціями та зіткненням частинок. Граничні умови (початкові умови при  $x = 0$ ) повинні задаватися з природних міркувань, однак вони не завжди відомі, зокрема швидкість газу та швидкості частинок. У нашому випадку величинами, що задаються, будемо вважати  $G_G, G_C, R_T, R_C, p_L$  - тиск на кінці труби. У початковій точці з гарним ступенем ймовірності можна прийняти, що температура газу та температура частинок дорівнюють атмосферній температурі. Швидкість газу та швидкості частинок при  $x = 0$  можна отримати при заданні, наприклад  $\alpha_C$ . Для даного процесу початкова величина або швидкість частинок



відіграють важливу роль, внаслідок чого ці значення досить суттєво можуть вплинути на визначені параметри і, зокрема, визначення коефіцієнта Бусройда.

Представлений експериментальний матеріал цікавий тим, що він містить різний матеріал з різними фізичними параметрами. При цьому тверда фаза тут представлена, як однорідна маса, так і у вигляді суміші. Отримані експериментальні дані дозволили отримати оціночні величини необхідних коефіцієнтів. Для цього скористалися тільки тими величинами, які отримано під час витікання двофазного середовища в атмосферний простір, тобто з відомим кінцевим тиском, що дорівнює атмосферному. В експериментах, проведених із водою, присутній невідомий протитиск у бульбашках, унаслідок цього ці дані не розглядаються.

Наведемо результати розрахунків.

**Сода.** Довжина горизонтальної ділянки – 1,5 м; діаметр трубки – 6 мм; довжина вертикальної ділянки - 1 м; діаметр трубки – 4 мм;  $V_G = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $V_W = 2 \cdot 10^{-5}$ ; діаметр частинок – 0,1 мм.

Таблиця 5 – Порівняння фактичних показників тиску з розрахунковими при інжектванні соди

Інтенсивність, гр/хв	Концентрація, кг/м <sup>3</sup>	Витрата газоносія, м <sup>3</sup> /год	Тиск на вході установки, МПа	Тиск за розрахунками, МПа
400	6,66	3,6	0,15	0,17
550	7,85	4,2	0,20	0,19

**Вапно.** Довжина горизонтальної ділянки – 1,5 м; діаметр трубки – 6 мм; довжина вертикальної ділянки – 0,8 м; діаметр трубки - 4 мм;  $V_G = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $V_W = 2 \cdot 10^{-5}$ ; діаметр частинок – 0,1 мм.

Таблиця 6 – Порівняння фактичних показників тиску з розрахунковими при інжектванні вапна

Інтенсивність, гр/хв	Концентрація, кг/м <sup>3</sup>	Витрата газоносія, м <sup>3</sup> /год	Тиск на вході установки, МПа	Тиск за розрахунками, МПа
100	2,00	3,0	0,15	0,15
100	1,66	3,6	0,20	0,16
160	2,46	3,9	0,215	0,19
160	2,29	4,2	0,22	0,19

**Смесь (0,6 – вапно, 0,3 – FeO, 0,1 – сода).** Довжина горизонтальної ділянки – 1,5 м; діаметр трубки - 6 мм; довжина вертикальної ділянки – 0,8 м; діаметр трубки - 4 мм;  $V_G = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $V_W = 2 \cdot 10^{-5}$ ; діаметр частинок – 0,1 мм.

Таблиця 7 – Порівняння фактичних показників тиску з розрахунковими при інжектуванні суміші

Інтенсивність, гр/хв	Концентрація, кг/м <sup>3</sup>	Витрата газоносія, м <sup>3</sup> /год	Тиск на вході установки, МПа	Тиск за розрахунками, МПа
230	3,29	4,2	0,22	0,21
410	6,83	3,6	0,20	0,24

Зіставляючи отримані в результаті розв'язання вписаної системи з даними в таблицях 2 - 4, видно, що ці результати в деяких випадках відрізняються, що свідчить про необхідність ретельнішого відпрацювання експериментальної методики і, відповідно, проведення самих експериментів. Водночас видно, що за більш масивного об'єму експериментальних даних можна точніше підібрати необхідні коефіцієнти й отримати параметри течії двофазних потоків у каналах.

### Висновки

Таким чином, розроблена методика забезпечує можливість теоретично оцінити вплив характеристик двофазних потоків і характеристики траси, що транспортує двофазний потік, на параметри двофазного потоку, в т. ч. на виході з фурми, зануреної в рідкий чавун.

### Перелік посилань

1. Ueda M., Shiota Y., Yamamoto T. Development of continuous impurity removal process on blast furnace chute Scaninject IV. 4th International Conference on Injection Metallurgy, Lulea, Sweden, June 11-13, 1986, Proceedings
2. Eawasaki Sh., Aoki M., Kashimori A., Takagi H., Kshiwaku, Onishi T. Dephosphorization and desulfurization in the pretreatment of pig iron. 4th International Conference on Injection Metallurgy, Lulea, Sweden, June 11-13, 1986, Proceedings
3. Yoshimura M., Yoshikawa S. Production of ultrapure steels and their fatigue properties. Scaninject II. 2nd International Conference on Injection Metallurgy, Lulea, Sweden, June 12-13, 1980 : Proceedings
4. Смирнов Н. А. Рафинирование стали вдуванием порошкообразных материалов Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15, № 3. С. 33–42.
5. Soo S. L. Fluid dynamics of multi-phase systems. Toronto-London : Blaisdell. 1967.
6. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. I. – М. : Наука, 1987, 464с.
7. Накорчевский А. И., Басок Б. И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках / Под ред. А. А. Долинского. Киев : Наукова думка, 2001, 346 с.
8. Кондратьев А. С., Нья Т. Л., Швыдько П. П. Инженерные методы расчета гидротранспортирования твердых частиц в горизонтальных и вертикальных трубах. Инженерный журнал: наука и инновации 2018, № 3. С. 1–19. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1740>

9. Криль С. И., Чальцев М. Н. К вопросу о методиках расчета основных параметров пневмотранспорта сыпучих материалов по горизонтальным трубам. Прикладна гідромеханіка. 2010. Том 12, № 4. С. 36 – 44.

10. Тарасов В. П., Мухопад К. А. Развитие теории работы однотрубной пневмотранспортной установки. Теор. Основы хим. технологии. 2019. Т. 53. № 3, с. 349 – 360.

12. Тимошенко В. И., Кньшенко Ю. В. Пневмотранспорт сыпучих материалов с повышенным давлением несущего газа. Наука та інновації. 2013. Т. 9. № 1. С. 5—17.

13. Елисеев В. И., Толстопят А. П., Флеер Л. А., Совит Ю. П., Шевченко А. Ф., Шевченко С. А. Движение двухфазного потока в фурме. Вісник Дніпропетровського університету. Серія Механіка, Вип. 23, Т., 2019, Т. 27, № 5. С. 21 – 34.

14. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов 7 изд. М. : Дрофа, 2003. 840 с.

15. Тимошенко В. И. Газовая динамика высокотемпературных технологических процессов. Днепропетровск: Институт технической механики НАНУ и НКАУ, 2003. 460 с.

16. Волошин А. И., Пономарев Б. В. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов. Киев : Наукова думка, 2001, 520 с.

17. Шрайбер А. А., Милютин В. Н., Яценко В. П. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом. Киев : Наукова думка, 1980, 250 с.

19. Вараксин А. Ю., Протасов М. В., Яценко В. П. Анализ механизмов осаждения твердых частиц на стенки каналов. Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 5. С. 738 -746.

## References

1. Ueda, M., Shirota, Y., & Yamamoto, T. (1986). Development of continuous impurity removal process on blast furnace chute Scaninject IV. 4th International Conference on Injection Metallurgy, Lulea, Sweden, June 11-13, 1986, Proceedings

2. Eawasaki, Sh., Aoki, M., Kashimori, A., Takagi, H., & Kshiwaku, Onishi T. (1986). Dephosphorization and desulfurization in the pretreatment of pig iron. 4th International Conference on Injection Metallurgy, Lulea, Sweden, June 11-13, 1986, Proceedings

3. Yoshimura, M., & Yoshikawa, S. (1980). Production of ultrapure steels and their fatigue properties. Scaninject II. 2nd International Conference on Injection Metallurgy, Luleå, Sweden, June 12-13, 1980, Proceedings

4. Smirnov, N. A. (2015). Rafinирование стали вдвуванием poroshkoобразnyh materialov *Vestnik YuUrGU. Seriya "Metallurgiya"*, 15(3), 33–42

5. Soo, S. L. (1967). *Fluid dynamics of multi-phase systems*. Blaisdell

6. Nigmatulin, R. I. (1987). *Dinamika mnogofaznyh sred*. Part 1. Nauka

7. Nakorchevskij, A. I., & Basok, B. I. (2001). *Gidrodinamika i teplomassoperenos v geterogennyh sistemah i pulsiruyushih potokah*. Naukova dumka

8. Kondratev, A. S., Na, T. L., & Shvydko, P. P. (2018). Inzhenernye metody rascheta gidrotransportirovaniya tverdyh chastic v gorizontalnyh i vertikalnyh trubah.

*Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii*, (3), 1–19. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1740>

9. Kril, S. I., & Chalcev, M. N. (2010). K voprosu o metodikah rascheta osnovnykh parametrov pnevmotransporta sypuchih materialov po gorizontalnym trubam. *Prikladna gidromehanika*, 12(4), 36–44

10. Tarasov, V. P., & Muhopad, K. A. (2019). Razvitie teorii raboty odnotrubnoj pnevmotransportnoj ustanovki. *Teor. Osnovy him. tehnologii*, 53(3), 349–360

11. Timoshenko, V. I., & Knyschenko, Yu. V. (2013). Pnevмотransпорт sypuchih materialov s povyshennym davleniem nesushogo gaza. *Nauka ta innovaciyi*, 9(1), 5–17

12. Yeliseyev, V. I., Tolstopyat, A. P., Fleyer, L. A., Sovit, Yu. P., Shevchenko, A. F., & Shevchenko, S. A. (2019). Dvizhenie dvuhfaznogo potoka v furme. *Visnik Dnipropetrovskogo universitetu. Seriya Mehanika*, 27(5), 21–34

13. Lojcyanskij, L. G. (2003). *Mehanika zhidkosti i gaza*. Drofa

14. Timoshenko, V. I. (2003). *Gazovaya dinamika vysokotemperaturnykh tehnologicheskikh processov*. Institut tehnicheckoj mehaniki NANU i NKAU

15. Voloshin, A. I., & Ponomarev, B. V. (2001). *Mehanika pnevmotransportirovaniya sypuchih materialov*. Naukova dumka

16. Shrajber, A. A., Milyutin, V. N., & Yacenko, V. P. (1980). *Gidromehanika dvuhkomponentnyh potokov s tverdyim polidispersnym veshestvom*. Naukova dumka

17. Varaksin, A. Yu., Protasov, M. V., & Yacenko, V. P. (2013). Analiz mehanizmov osazhdeniya tverdyh chastic na stenki kanalov. *Teplofizika vysokih temperatur*, 51(5), 738–746

**V. H. Kysliakov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0002-1775-5050

**I. O. Manachyn**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9795-6751

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

**O. L. Rudenko**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6068-9901

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

## STUDY OF GAS-POWDER JETS INJECTION BY COLD MODELING METHODS

**Abstract.** The aim of the work is to study the processes of injecting gas-powder jets into a liquid bath on cold models and determine the processing parameters. To implement the cold modeling, an installation was mounted at the laboratory base of the Institute of Ferrous Metallurgy, which provides a controlled reagent injection. The reagents used were soda, lime, and iron (II) oxide. The simulation was carried out with the reagent being dispensed into a dry container and into a container with water, which was an imitation of a ladle. Before pouring the reagent into the dosing device, sieving was performed, the mesh diameter of the smallest sieve was 1 mm. A surfactant was also added to the reagent to improve the movement of the reagent. During the operation of the installation, the readings of the manometers installed on the gas carrier outlet route and on the dosing device were recorded. The dosing device

was calibrated. Also, during injection into a bucket of water, the behavior of the jet without reagent during immersion was video recorded, as well as the beginning of the reagent supply and the surface of the "melt". A number of treatments were carried out at different gas flow rates and at different intensities of reagent supply. A summary table of the results of the treatments was obtained, which became the basis for further processing of the results of the cold modeling studies. The system of equations for a one-dimensional two-phase steady-state flow is shown. This system includes the equation of state of the gas, the equation for determining the heat transfer between the gas and the pipe wall, the equations for the interfacial force, the attached mass, and the interfacial heat flux. Boundary conditions are formulated based on natural considerations. Using the developed methodology, we calculated the pressure drop, velocities of the gas and solid phases for CaO particles with a diameter of 60 and 100  $\mu\text{m}$ ; FeO - 70 and 450  $\mu\text{m}$ ; Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> - 100  $\mu\text{m}$ ).

**Keywords:** reagent mixture, cold model, injection, complex treatment, hydrodynamics.

**For citation:** Kysliakov, V. H., Manachyn, I. O., Yeliseiev, V. I., & Rudenko, O. L. (2024). Study of gas-powder jets injection by cold modeling methods. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 186-198. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-186-198>

*Стаття надійшла до редакції збірника 28.09.2024 р.*  
*Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)*