

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.2
УДК 669.184.244.66:669.184.235.001.5

Молчанов Л.С., к.т.н., ст.досл., заввідділом, ORCID: 0000-0001-6139-5956,
e-mail: metall729321@gmail.com

Чернятевич А.Г., д.т.н., проф., г.н.с., ORCID: 0000-0002-4552-4997, e-mail: agchern@ua.fm

Голуб Т.С., к.т.н., ст.досл., с.н.с., ORCID: 0000-0001-9269-2953,
e-mail: isinasu.golubts@gmail.com

Какушкін Є.С., провідний інж., ORCID: 0009-0004-2158-8947

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Molchanov Lavr, PhD, senior researcher, the head of the department of Physical and technical problems of steel metallurgy

Cherniatevych Anatolii, D. Sc. (Tech.), Prof., chief scientist

Golub Tetiana, PhD, senior researcher, senior researcher

Kakushkin Yevhen, lead engineer

Iron and steel Institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНЕ ДВОФАЗНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОВЕДІНКИ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ НА ПОВЕРХНІ ТА В ОБ'ЄМІ ПРИ ПРОДУВАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ФУРМ, ЩО ВІДПОВІДАЮТЬ ЗА КОНСТРУКЦІЄЮ ФУРМАМ ДЛЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Наведені результати комплексного порівняльного аналізу низькотемпературного та високотемпературного дослідження процесів продувки рідкого розплаву крізь верхню продувну фурму за максимальної подоби технологічних умов продувки. Встановлено, що проведення двофазного моделювання конвертерного процесу з продувкою зверху з використанням у якості моделюючих фаз води та поліметилсиліконової олії можливо та доцільно проводити задля вирішення задачі дослідження перемішування та спінування фаз та оцінювання впливу другої фази на утворення сплесків під час продувки. При цьому вплив поліметилсиліконової олії на утворення кратеру взаємодії води з газовим струменем не відповідає дійсним процесам, які відбуваються протягом більшого часу продувки конвертерної ванни, а можуть бути тільки інтерпретацією, наприклад, останнього періоду продувки, коли шлак утворюється значно повільніше, ванна «осідає» та спостерігається «оголення» металу за рахунок відступу шлаку від центру ванни.

Ключові слова: низькотемпературне моделювання; високотемпературне моделювання; кисневий конвертер; киснева фурма; гідро-газодинаміка.

There are results of a comprehensive comparative analysis of low-temperature and high-temperature research of the blowing processes of liquid melt through the top blowing lance under maximum similarity of the technological blowing conditions. It was established that conducting a two-phase modeling of the converter process with blowing from above using water and polymethylsilicone oil as modeling phases is possible and advisable to carry out in order to solve the problem of studying the mixing and foaming of phases and assessing the influence of the second phase on the formation of surges during blowing. At the same time, the influence of polymethylsilicone oil on the formation of a crater of the interaction of water with a gas jet does not correspond to the actual processes that occur or most of the time of blowing the converter bath, but can only be an interpretation of, for example, the last period of the blowing, when slag is formed much more slowly, the bath "settles" and "exposing" the metal is observed due to the retreat of the slag from the center of the bath.

Keywords: low-temperature modeling; high-temperature modeling; oxygen converter; oxygen lance; hydro-gas dynamics.

Постановка проблеми

Не дивлячись на постійний заклик щодо переходу на електрометалургійну галузь, частка виробництва сталі у кисневих конвертерах від загального обсягу складає на рівні 70 %, завдяки гнучкості процесу та постійному вдосконаленню [1—3]. Найбільший відсоток вдосконалень у киснево-конвертерному процесі складають різні конструктивні особливості продувних пристроїв та розробка технологічних режимів їх експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процес вдосконалення конструкцій кисневих фурм та режимів їх експлуатації має у якості обов'язкового етапу включати перевірку спочатку доцільності використання запропонованої конструкції чи режиму, розробку режиму експлуатації, коли пропонується тільки конструкція, доопрацювання ефективності нового способу чи роботи елементу обладнання на реальному об'єкті — рідкій металевій ванні задля відпрацювання робочих режимів. На кожному етапі: чи то перевірка працездатності, чи то пошук раціонального режиму, чи, навіть, вдосконалення вже існуючих варіантів продувки, можна проводити дослідження за декількома напрямками: реальним промисловим дослідом (таке, в своїй більшості, залишилося в минулому через великий ризик під час проведення експериментів) [4—8], математичним моделюванням з перевіркою результатів шляхом порівняння з наявними у автора або опублікованими раніше іншими авторами даними щодо промислових правок [9—15], або даними низькотемпературного моделювання [16—21] та фізичним моделюванням (низькотемпературним [22—2] або високотемпературним [27, 28]). Останній варіант — високотемпературний, досить вартісний і його використання скоріше виняток. Варіант же натурального низькотемпературного моделювання досить розповсюджений, особливо коли модельним середовищем є вода, яку продувають повітрям, через низьку вартість матеріалів та їх доступність. Однак відомо, що не дивлячись на обов'язкове використання коефіцієнтів подоби під час проведення низькотемпературного моделювання, його результати носять більш якісний характер або потребують додаткових даних для перенесення їх на реальний об'єкт — рідкий розплав.

Формулювання мети дослідження

Відповідно актуальним є проведення досліджень щодо комплексного порівняльного аналізу результатів низькотемпературного та високотемпературного моделювання процесів продувки рідкого розплаву стосовно киснево-конвертерного типу продувки за умов застосування однакових продувних пристроїв.

Методика дослідження

Дослідження були проведені методами прямого фізичного високотемпературного (на лабораторній дільниці ДДТУ) і низькотемпературного моделювання з подальшим порівнянням результатів. Основні фізичні параметри середовищ моделювання наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Співвідношення основних фізичних показників при низькотемпературному та високотемпературному моделюванні процесу продувки металу у кисневому конвертері

№	Параметр	Значення для моделювання	
		низькотемпературне	високотемпературне
1.	Рідина, що імітує металеву фазу	вода	рідка сталь
1.1	температура, °C	25	1550
1.2	густина, кг/м ³	1000	7000
1.3	в'язкість, Па·с	0,001	0,005
1.4	поверхневий натяг, Н/м	0,073	1,4
2.	Газ для продувки	повітря	кисень
2.1	густина, кг/м ³	1,23	1,43
2.2	тиск, Па	200-3200	200-3200
2.2	витрата, м ³ /год.	0,4 – 4,6	1 – 11
2.3	температура, °C	20	1500
2.4	атомна будова	двоатомний*	двоатомний

Продовження таблиці 1

3.	Рідина, що імітує шлаковий розплав	поліметил-силіконова олія	рідкий шлак
3.1	в'язкість динамічна η , Па·с	0,19	0,10 – 0,30
3.2	густина, кг/м ³	968	3200 – 4000
3.3	поверхневий натяг, Н/м	0,021	0,586 – 0,616

* - враховуючи складну будову з декількох газів, умовно прийнято, що повітря є двоатомним газом

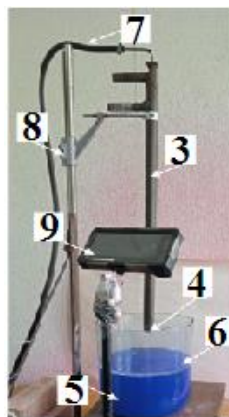
З метою коректного співставлення результатів фізичного низькотемпературного та високотемпературного моделювання для продувки рідкої ванни використовувалися однакові фурми, конструктивні параметри яких представлені у таблиці 2. Високотемпературні дослідження проводилися з використанням спеціальної установки — 60 кг моделі кисневого конвертера (фото на рис. 1, а), з продувкою залізвуглецевого розплаву технічним киснем крізь верхню одно та трисоплову фурму з наведенням на поверхні розплаву основного шлаку шляхом додавання вапна. Для встановлення аналогій з високотемпературними дослідженнями було проведено фізичне низькотемпературне моделювання на водяній 8 кг моделі кисневого конвертера з продувкою зверху (фото на рис. 1, б). Висота ванни під час низькотемпературного моделювання складала 150 мм (подібна до висоти металу під час високотемпературного моделювання).

Таблиця 2. Основні конструктивні параметри кисневої фурми, що використовувалися для верхньої продувки у ході експериментів

№	Параметр	Значення	
1.	Тип фурми	Для верхньої продувки	
2.	Кількість сопел	1	3
3.	Тип сопла	Лавалія	Лавалія
4.	Критичний діаметр, мм	2,3	1,5
5.	Кут нахилу сопла до вертикальної осі, град.	0	14



а



б

Рис. 1. Фотографії лабораторних установок для високотемпературного (а) та низькотемпературного (б) дослідження газо- гідродинамічних особливостей верхніх продувних фурм: 1 — конвертер; 2 — верхня киснева фурма; 3 — продувна фурма; 4 — наконечник продувної фурми; 5 — ємність з підфарбованою рідиною — водою; 6 — поліметилсиліконова олія; 7 — система подачі стисненого повітря; 8 — кронштейни; 9 — відеокамера

При низькотемпературному моделюванні для імітації шлакової фази використовували поліметилсиліконову олію в кількості 10 % від рідини, що імітує металеву фазу за аналогією кількості шлакового розплаву відносно металевій рідкій фазі. Для візуалізації поверхні ванни рідину підфарбували фарбою, яка не розчиняється у олії. Дослідження на обох моделях проводилися за стаціонарних умов розташування сопла відносно поверхні спокійної ванни на визначеній відстані у 40 калібрів.

У якості модельного критерію подоби використовували модифікований критерій Фруда:

$$Fr = \frac{\rho_g \cdot u^2}{g \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot d} \quad (1)$$

де ρ_g та ρ_p — густина продувального газу та рідини, яка продувається, відповідно, кг/м³; d — діаметр продувального сопла, м; u — середня швидкість газу на виході з сопла, м/с.

Відповідно до рівності цих критеріїв реального об'єкта та холодної моделі витрата продувального газу на низькотемпературній моделі складає 0,00004 від витрати на промисловому об'єкті а для високотемпературних досліджень — 0,0001 (тобто співвідношення витрат при високотемпературному моделюванні та низькотемпературному складало 2,5). Витрата газу на продувку змінювалася у діапазоні 0,23 — 4,6 м³/год для низькотемпературного моделювання та 1 — 11 м³/год для високотемпературного моделювання, а тиск складав 200 — 3200 Па для обох випадків. Витрату газу контролювали ротаметром.

Виклад основного матеріалу

Аналіз відеозйомки результатів низькотемпературного моделювання представлений для різних витрат продувального газу та використання одно- та трисоплової продувної фурми на рис. 2.

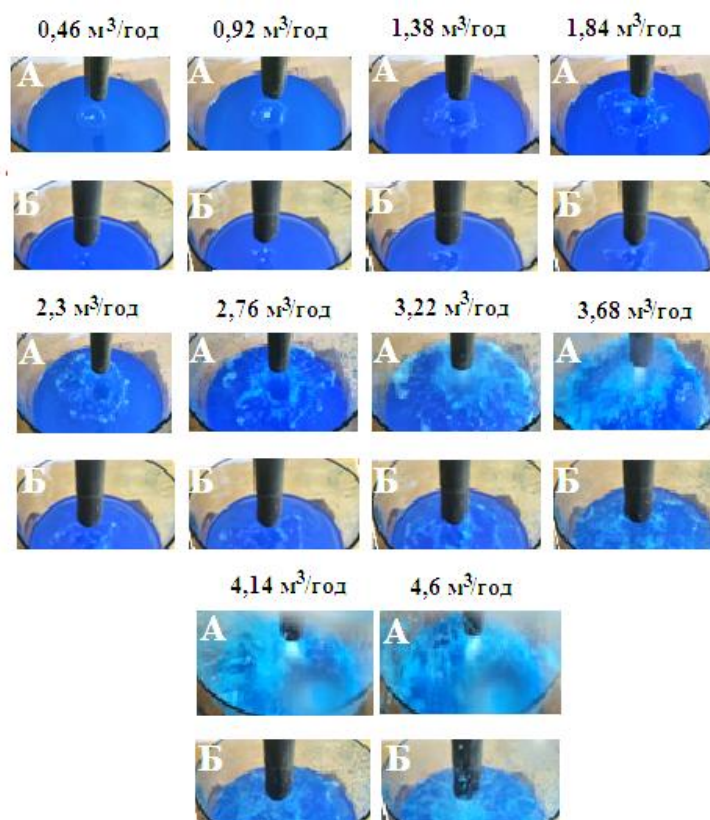


Рис. 2. Характерні фото продувки ванни крізь одно соплову (А) та три соплову (Б) фурми при положенні 40 калібрів відносно положення дзеркала спокійної ванни (витрата продувального газу вказана над фото)

Відповідно до отриманих результатів відеозйомки можна сказати, що, завдяки різниці у густині рідина, яка імітує шлакову фазу, знаходилася зверху на поверхні рідини, що імітувала металеву фазу. Відповідно двофазна продувка на низькотемпературній моделі характеризується проникненням газового струменя спочатку в рідину, що імітує шлаковий розплав, а після повного проникнення другої фази на поверхні — появою кратеру із заглибленням у воді. Відповідно для продувки крізь односплову фурму на поверхні утворюється один кратер, а при продувці крізь трисоплову фурму — три кратери, які при витраті продувального газу більше $1,38 \text{ м}^3/\text{год}$ зливаються у загальне трикутне утворення із рухливими межами в середині. При витраті продувального газу більше $3,68 \text{ м}^3/\text{год}$ інтенсивність взаємодії газового струменя з рідиною стає такою, що спостерігати за розмірами кратерів неможливо через сильні, високі та часті сплески.

Рідина, яка імітує шлакову фазу — олія, має менший у три рази поверхневий натяг, ніж рідина, що імітує металеву фазу — вода, тому під дією газового струменя олія відступає від центра струменя на більшу відстань, ніж вода. Це добре видно вже при витраті $0,92 \text{ м}^3/\text{год}$ при односпловій продувці та $1,84 \text{ м}^3/\text{год}$ при трисопловій (рис. 3), тобто при односпловій продувці взаємодія газу більш жорстка.

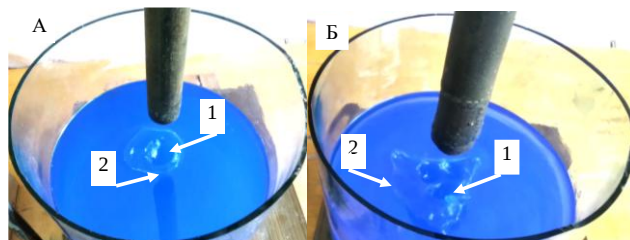


Рис. 3. Фрагменти продувки крізь односплову (А) та трисоплову (Б) верхні фурми із наочною взаємодією різних модельних рідин з газовою фазою: 1 — межа водного кратеру, що утворився під дією газового струменя; 2 — межа олії, що відступила від центра ванни під дією газового струменя.

Також відповідно до отриманих відеоматеріалів було відмічено, що, завдяки більшій в'язкості рідни, що імітує шлаковий розплав, можна було зафіксувати особливості формування бризок фази, яка імітує металеву фазу, та їх потрапляння на поверхню шлаку у вигляді крапель (рис. 4). Для односплової продувки це явище можна було чітко спостерігати при витраті продувального газу $1,84\text{—}2,3 \text{ м}^3/\text{год}$, а за умов трисоплової продувки — при витраті $2,3\text{—}2,76 \text{ м}^3/\text{год}$.

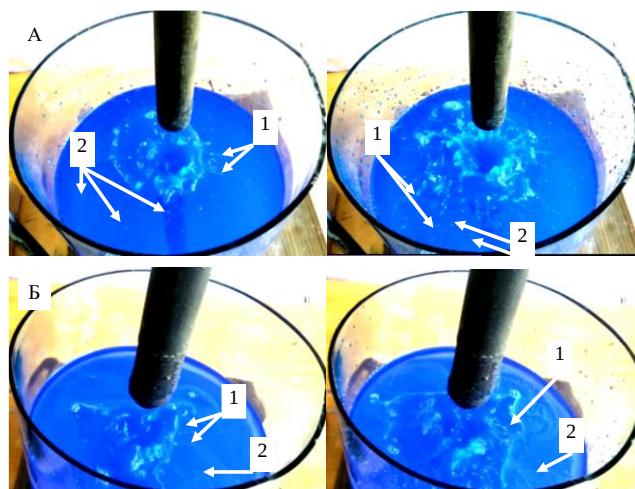


Рис. 4. Фрагменти продувки крізь односплову (А) та трисоплову (Б) фурми із формуванням бризок фази, що імітує металеву — 1, та їх осіданням на фазі, що імітує шлакову — 2

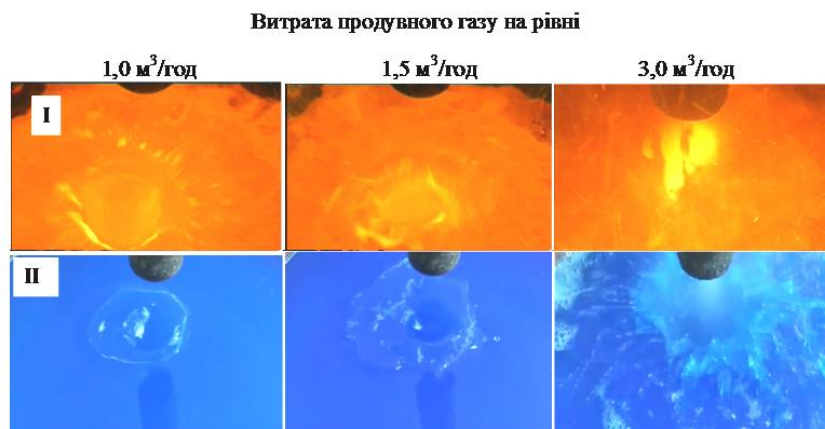


Рис. 5. Співставлення результатів високотемпературного (I) та низькотемпературного (II) моделювання процесу продувки конвертерної ванни крізь односоплову фурму при її розташуванні висоті 40 калібрів від поверхні ванни

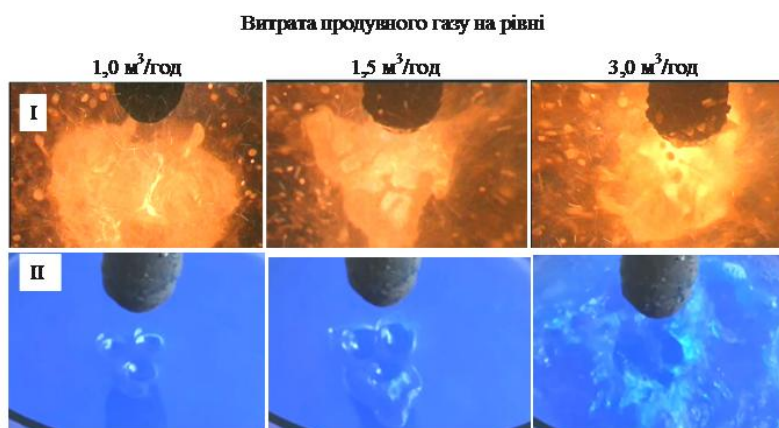


Рис. 6. Співставлення результатів високотемпературного (I) та низькотемпературного (II) моделювання процесу продувки конвертерної ванни крізь трисоплову фурму при її розташуванні висоті 40 калібрів від поверхні ванни

Співставлення характерних фото продувки низькотемпературної та високотемпературної моделей при близьких витратах відповідно до критеріїв подібності наведено на рис. 5 та рис. 6 для односоплової та трисоплової продувки відповідно. За фрагментами двох типів моделювання було обчислено площу «оголеного металу» (у вигляді відсотку відкритої поверхні до загальної), що утворюється під дією газового струменя (рис. 7). Відмічено, що відповідно до низькотемпературного моделювання зі збільшенням витрати продувного газу відсоток поверхні, що «оголюється» від шлаку, значно зростає відповідно до експоненційної залежності. Це свідчить про значно зростаючу можливість втрати рідини, яка імітує метал, під час продувки через розбризкування.

Проте, у реальному процесі взаємодії шлако-металевої фази з газовим потоком відбувається постійна активна реакція взаємодії — окислення складових металу з утворенням нових порцій шлаку, тому при збільшенні витрати продувного газу частка «оголеного» металу навпаки зменшується в період активного шлакоутворення. Тобто проведення двофазного моделювання з використанням поліметилсиліконової олії щодо оцінки поведінки поверхні ванни при взаємодії з газовим струменем є не досить адекватним. Однак раціональним за низькотемпературного моделювання є оцінювання спінювання шлаку на поверхні ванни за умов близького значення динамічної в'язкості реального шлакового розплаву та рідини, що його імітує, та бли-

зких значень співвідношення поверхневих натягів рідин металу й шлаку та речовин, що їх імітують. Для цього відеозйомку додатково проводили з бокової сторони моделі. Результати, відповідно, для умов продувки крізь односоплову та трисоплову фурми наведено на рис. 8.

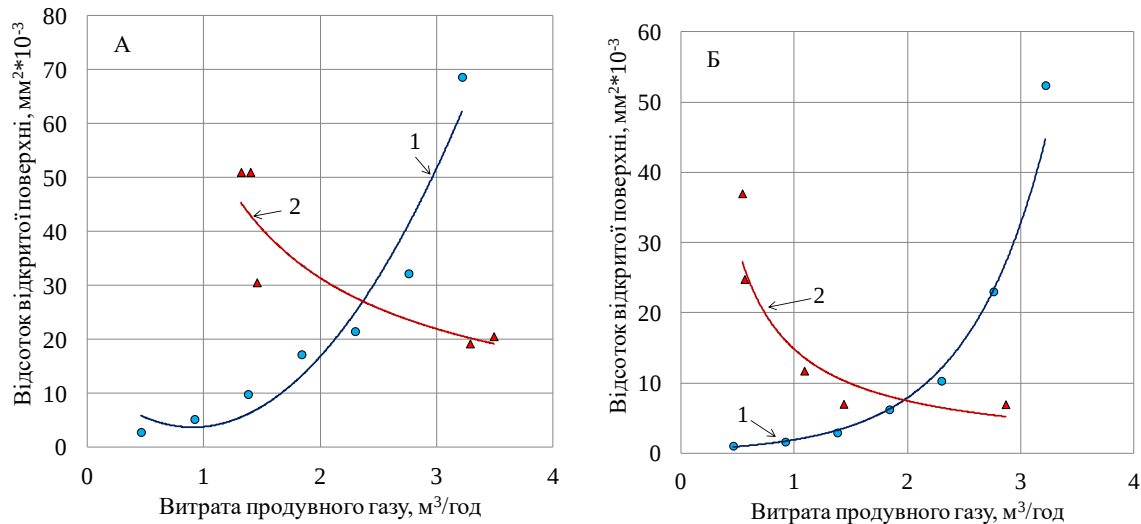


Рис. 7. Відсоток відкритої під дією газового струменя поверхні рідини, що імітує метал при продуванні одно сопловою фурмою — А та три сопловою фурмою — Б за результатами низькотемпературного — 1 та високотемпературного — 2 моделювання

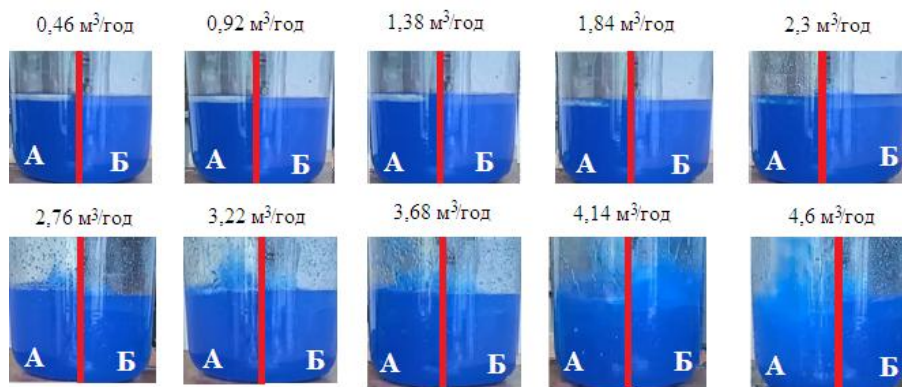


Рис. 8. Характерні фото продувки ванни крізь одно соплову (А) та три соплову (Б) фурми при положенні фурми 40 калібрів, отримані з бокової сторони моделі (витрата продувального газу вказана над фото)

Слід відзначити, що при продуванні крізь односоплову фурму спінювання шлаку проходило не дуже активно. Значно активніше відбувалося повне перемішування ванни з формуванням високих сплесків рідини. Навпаки, при продуванні крізь трисоплову фурму можна було спостерігати спінювання другої рідкої фази, яка імітувала шлакову, з формуванням менш високих сплесків. Результати оцінювання спінювання та сплескоутворення низькотемпературною моделлю наведені на рис. 9 та 10. Встановлено, що за витрати продувального газу до 2,3 м³/год спінювання ванни при продуванні трисопловою фурмою відбувається на 23—33 % відн. більше ніж при продуванні крізь односоплову фурму. Подальше зростання витрати продувального газу до 3,68—4,14 м³/год відповідало ще більшій різниці у величині спінювання — до 72 % відн. І лише за витрати 4,6 м³/год різниця у величині спінювання скоротилася до 30 % відн.

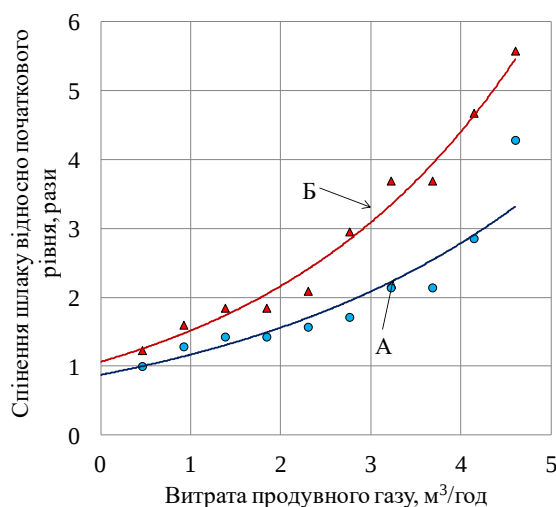


Рис. 9. Залежність висоти спінювання другої фази, що імітує шлак, відносно початкового рівня під час продувки крізь одно соплову фурму — А та три соплову фурму — Б

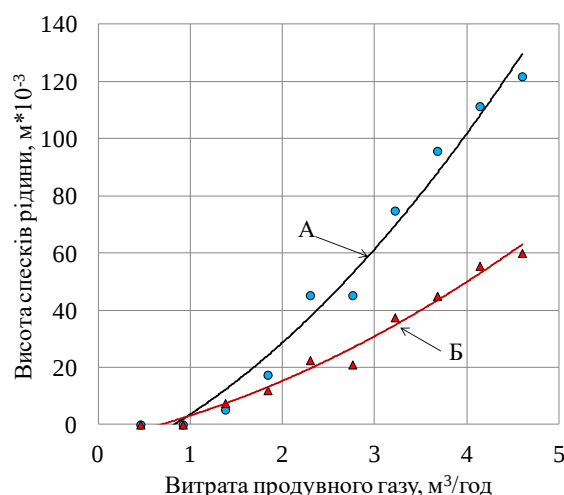


Рис. 10. Залежність висоти сплесків від витрати продувального газу під час продувки крізь односоплову фурму — А та трисоплову фурму — Б

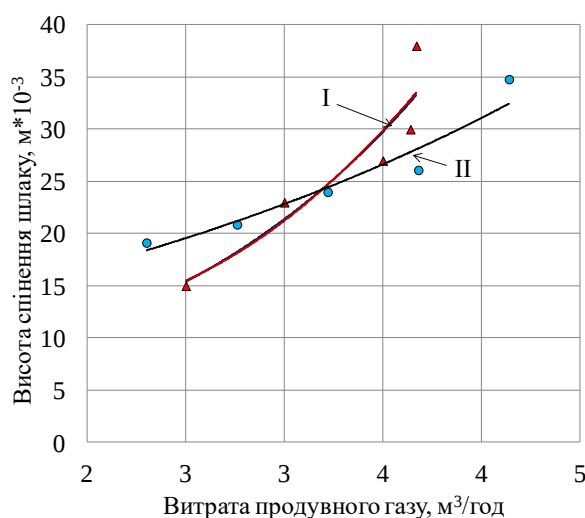


Рис. 11. Порівняння висоти спінювання шлаку на високотемпературній (I) та низькотемпературній (II) моделях за умов близьких значень витрати продувального газу при використанні три соплової верхньої продувної фурми

го газу (за умов перерахунку витрати відповідно до коефіцієнтів подоби для низькотемпературної моделі) проведено для продувки трисоплової фурми (рис. 11). Вимір висоти спінювання шлаку на високотемпературній моделі проводився шляхом занурення металевго стрижня на однакову глибину ванни з «намерзанням» шару шлаку на ньому (для високотемпературної моделі данні отримані на різних продувках з використанням однієї фурми).

Слід відзначити досить близькі значення висоти спінювання шлаку при використанні даної фурми як на низькотемпературній так і на високотемпературній моделях. Відповідно характер спінювання шлаку, в першу чергу, обумовлюється типом продувального пристрою, який

Продувка крізь односоплову фурму відрізнялась високою інтенсивністю сплескоутворення. Сплески спостерігалися за витрати продувального газу вище за 1,38 м³/год: на 30—50 % вищі за сплески, що утворювалися при продувці крізь трисоплову фурму. Таким чином, можна констатувати, що продувка крізь три соплову фурму створює умови більш прийнятні для проведення процесу конвертування щодо формування та спінювання шлакової фази та утворення менших сплесків ванни.

Порівняння фактичних вимірів висоти спінювання шлаку, яке відбувається у своїй більшості за рахунок дії газового струменя (тобто у період, коли шлак вже сформувався під час продувки на високотемпературній моделі та вже відбувся основний процес окислення вуглецю — після 70—80 % тривалості продувки) з висотою спінювання шлаку за близьких значень витрати продувального

чинить механічний вплив на рідку ванну, як у даному випадку — три сопловою верхньою фурмою. Це значить, що з достатньою надійністю можна передбачити такі особливості взаємодії шлаку та продувного пристрою, як спінювання, за допомогою низькотемпературного двофазного моделювання з використанням поліметилсілонової олії як імітатора шлакової фази.

Висновки

У роботі розглянуто гідро-газодинамічні особливості поведінки двофазної системи у складі конвертерної ванни при продувці зверху при використанні одно- та трисоплової кисневих фурм.

Відзначено, що проведення двофазного низькотемпературного моделювання конвертерного процесу з продувкою зверху з використанням у якості моделюючих фаз води та поліметилсілонової олії доцільно задля вирішення наступних задач: дослідження ступеня перемішування двох фаз, встановлення активності та висоти спінювання фази, що імітує шлакову, на поверхні рідини, що імітує рідкий метал, за рахунок взаємодії з газовими струменями, оцінювання впливу другої фази (що імітує шлакову) на характер утворення сплесків під час продувки. Однак вплив поліметилсілонової олії на утворення кратеру взаємодії води з газовим струменем не відповідає дійсним високотемпературним процесам взаємодії продувного струменя зі шлако-металевою емульсією, які відбуваються протягом більшого часу продувки конвертерної ванни (зі значним зануренням фурми у емульсію). Відповідно, такий варіант моделювання може бути тільки інтерпретацією, наприклад, останнього періоду продувки, коли новий шлак утворюється значно повільніше, ванна «осідає» та спостерігається «оголення» металу за рахунок відступу шлаку від центру ванни.

Список використаної літератури

1. 2025 World Steel in Figures URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf>
2. Ocheri C., Ajani O.O., Daniel A., Agbo N. The steel industry: A stimulus to national development. *J. Powder Metall. Min*, 2017. Vol. 6. P. 2–5.
3. Cavaliere P. Basic oxygen furnace: Most efficient technologies for greenhouse emissions abatement. *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes*. Springer, Cham., 2019.
4. Semykin S.I., Golub T.S. Investigation of electric potential difference during the top oxygen blowing in converter. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2018, Vol. 88(1), P. 35–40.
5. Semykin S.I., Golub T.S., Dudchenko S.A. Improving the efficiency of the low-voltage potential application method at top oxygen blowing in converter. *Sci. in nov.*, 2020. Vol. 16, no. 2. P. 72–79.
6. Семькина Т.С., Семькин С.И. Анализ распределения элементов между металлом и шлаком при выплавке стали в конвертере. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, 2006. Вип. 13. С. 71–75.
7. 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
8. Сущенко А.В., Попов Е. С., Сідорчук Р.С., Лігус М.М., Орліченко М.П. Модернізація соплового блоку кисневої фурми та вдосконалення дуттьового режиму плавки при зміні шихтових та виробничих умов в ККЦ ПАТ «МК «Азовсталь». *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, 2014. Вип. (27). С. 29–39.
9. Laciak M., Kačur J., Terpák J., Durdán M., Flegner P. Comparison of different approaches to the creation of a mathematical model of melt temperature in an LD converter. *Processes*, 2022. Vol. 10(7). P. 1378.
10. Singha P., Shukla A.K. Contribution of hot-spot zone in decarburization of BOF steel-making: Fundamental analysis based upon the FactSage-Macro program. *Metals*, 2022. Vol.12(4). P. 638.
11. Kadrolkar A., Dogan N. Model development for refining rates in oxygen steelmaking: Impact and slag-metal bulk zones. *Metals*, 2019. Vol. 9(3). P. 309.
12. Hewage A.K., Rout B.K., Brooks G., Naser J. Analysis of steelmaking kinetics from IMPHOS pilot plant data. *Ironmaking & Steelmaking*, 2016. Vol. 43(5). P.358–370.

13. Wang J., Fang Q., Jia J., Huang K., Shi W., Liu C., Zhang H. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023. Vol. 27. P. 7047–7058.
14. Dering D., Swartz C., Dogan N. Dynamic modeling and simulation of basic oxygen furnace (BOF) operation. *Processes*, 2022. Vol. 8(4). P. 483.
15. Gao M., Gao J.T., Zhang Y.L. Yang S.F. Two-dimensional temperature distribution and heat transfer during scrap melting. *JOM*, 2020. Vol. 72. P. 1943–1952.
16. Cao L., Wang Y., Liu Q., Feng X. Physical and mathematical modeling of multiphase flows in a converter. *ISIJ International*, 2018. Vol. 58. Iss. 4. P. 573–584.
17. Sun J., Zhang J., Jiang R. Feng X., Liu Q. Numerical simulation of droplet splashing behavior in steelmaking converter based on VOF-to-DPM hybrid model and AMR technique. *Metall Mater Trans B*, 2024. Vol. 55. P. 1098–1116.
18. Lv M., Che, S., Yang L., Wei G. Research progress on injection technology in converter steelmaking process. *Metals*, 2022. Vol. 12(11). P. 1918.
19. Kemminger A., Krause F., Odenthal H.J. CFD simulation of top-blown converters. 9th EOSC European Oxygen Steelmaking Conference, Aachen, October 2022.
20. Sun J., Zhang J., Lin W., Cao L., Feng X., Liu Q. Effect of impact cavity shape induced by supersonic oxygen jet on the dynamic characteristics of molten bath in converter. *Steel research international*, 2021. Vol.92. Iss.9. P. 2100179
21. Wang X, Liu K, Liu G, Han P, Ma H. Effect of cavity shape caused by jet impact of swirl-type oxygen lance on molten bath mixing efficiency. *Ironmaking & Steelmaking*, 2024. Vol. 51(5). P. 460–469.
22. Filho A.C.P.C., Barbosa A.L.L., Maia B.T., de Almeida E.N., de Melo G.M.S., Gargano J.P.P.S., da Silva K.L. M.M., de Vasconcelos L.H.L., Lemos L.R., da Costa Viana L.A. , da Silva R.C. Jet over water penetration and equations — 04 nozzle variations. Proceedings of the Seminar on Steelmaking, Casting and Non-Ferrous Metallurgy. 53rd Seminar on Steelmaking, Casting and Non-Ferrous Metallurgy, 2024. Vol. 53. No. 53. P. 3–17.
23. Семикін С.І., Голуб Т.С., Вакульчук В.В. Дослідження на фізичній моделі особливостей поведінки двофазної ванни при верхньому продуванні через наконечник зі складеними соплами. *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії*, 2020, №34. С. 129–138.
24. Семькин С.И., Голуб Т.С., Дудченко С.А., Вакульчук В.В. Исследование на физической модели с верхней продувкой газодинамического напора и параметров струи при ее истечении из кольцевого коаксиального щелевого сопла в жидкую ванну. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, 2018. Вып. 32. С. 220–228.
25. Cai X.-Y., Duan H.J., Li D.-H., Xu A.-J., Zhang L.-F. Water modeling on fluid flow and mixing phenomena in a BOF steelmaking converter. *J. Iron Steel Res. Int.*, 2024. Vol. 31. P. 595–607.
26. Naito K., Kitamura S., Ogawa Y. Effects of BOF top blowing and bottom stirring conditions on suppressing excessive oxidation. *Ironmaking & Steelmaking*, 2002. Vol. 29. Iss. 3. P. 208–213
27. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы. *Металл и литье Украины*, 2017. № 6-7. С. 17–21.
28. Semykin S.I., Golub T.S. In situ investigation of slag-metal interactions in top blown oxygen converter upon low-voltage application. *JOM*, 2018. Vol. 70(10). P. 2262–2269.

LOW-TEMPERATURE TWO-PHASE STUDY OF HYDRODYNAMIC FEATURES OF THE BEHAVIOR OF A METAL BATH ON THE SURFACE AND IN THE VOLUME DURING BLOWING USING LANCES THAT CORRESPOND TO THE DESIGN OF LANCES FOR HIGH-TEMPERATURE MODELING

Verification of the effectiveness of specific technical solutions regarding the design of blowing devices can be done in several directions: real industrial experiment, mathematical modeling with comparison of results or with available data in the literature, or with a physical experiment, and physical modeling (low-temperature or high-temperature). The option of full-scale low-temperature model-

ing is quite widespread, especially when the model medium is water, which is blown with air, due to the low cost of materials and their availability. Despite the mandatory use of similarity coefficients during low-temperature modeling, its results are quality indexes or require additional data to transfer them to a real object - liquid melt. It is relevant to conduct research on a comprehensive comparative analysis of the results of low-temperature and high-temperature modeling of liquid melt blowing processes according to the oxygen-converter type of blowing under the conditions of using the same blowing devices and maximum similarity of the technological conditions of blowing.

The studies were conducted using direct full-scale physical modeling methods of both high-temperature and low-temperature three phase models (metal — slag — gas phases) with subsequent comprehensive comparison of the results obtained. The main feature was the use of the same blowing lance and similar blowing conditions.

Comparative studies have established that two-phase modeling of the converter process with top blowing using water and polymethylsilicone oil as modeling phases is possible and advisable to conduct when studying mixing and foaming of phases, assessing the influence of the second phase on the formation of splashes during blowing. At the same time, the influence of polymethylsilicone oil on the formation of a crater of the interaction of gas jet with water does not correspond to the actual processes that occur during a longer time of blowing the converter bath, but can only be an interpretation of, for example, the last minutes of blowing, when new slag is formed much more slowly, the bath “settles” and uncovered metal is observed due to the retreat of the slag from the center of the bath.

References

- [1] 2025 World Steel in Figures. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf>
- [2] Ocheri C., Ajani O.O., Daniel A., Agbo N. (2017) The steel industry: A stimulus to national development. *J. Powder Metall. Min.* vol. 6. P. 2–5.
- [3] Cavaliere P. (2019) Basic oxygen furnace: Most efficient technologies for greenhouse emissions abatement. *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes*. Springer, Cham.
- [4] Semykin S.I., Golub T.S. (2018) Investigation of electric potential difference during the top oxygen blowing in converter. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. vol. 88(1). P. 35–40.
- [5] Semykin S.I., Golub T.S., Dudchenko S.A. (2020) Improving the efficiency of the low-voltage potential application method at top oxygen blowing in converter. *Sci. in nov.* vol. 16(2). P. 72–79.
- [6] Semykina T.S., Semykin S.I. (2006) Analiz raspredelenia elementov mezdu metalom i shlakom pri vyplavke stali v konvertere [Analysis of element distribution between metal and slag during steelmaking in a converter]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*. vol. 13. P. 71–75. [in Russian]
- [7] Cherniatevych A.H., Sigarev Ye.N., Cherniatevych I.V. (2010) Novye razrabotki konstruktssii kislorodnykh furn i sposobov produvki vanny 160-t konverterov PJSC ArcelorMittal Kryvyi Rih. [New developments in oxygen tuyeres and bath blowing methods for 160-ton converters at PJSC ArcelorMittal Kryvyi Rih]. *Theory and Practice of Metallurgy*. vol. 2. P. 31–38. [in Russian]
- [8] Sushenko A.V., Popov E.S., Sidorchuk R.S., Ligus M.M., Orlichenko M.P. (2014) Modernizatsiia soploвого блока kysnevoi furny ta vdoskonalennia duttiiovogo rezhymu plavky pry zmini shyhtovyh ta vyrobnychym umov KKTs PJSC “MK ”Azovstal”. [Modernization of the nozzle block of the sour tuyere and upgrading of the blast melting mode when changing the charge and smelting minds in the BOF of PJSC “MK ”Azovstal”]. *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*. vol.(27). P. 29–39. [in Ukrainian]
- [9] Laciak M., Kačur J., Terpá K.J., Durdán M., Flegner P. (2022) Comparison of different approaches to the creation of a mathematical model of melt temperature in an LD converter. *Processes*. vol. 10(7). P.1378.
- [10] Singha P., Shukla A.K. (2022) Contribution of hot-spot zone in decarburization of BOF steel-making: Fundamental analysis based upon the FactSage-Macro program. *Metals*. vol.12(4). P. 638.
- [11] Kadrolkar A., Dogan N. (2019) Model development for refining rates in oxygen steelmaking: Impact and slag-metal bulk zones. *Metals*. vol. 9(3). P. 309.
- [12] Hewage A.K., Rout B.K., Brooks G., Naser J. (2016) Analysis of steelmaking kinetics from IMPHOS pilot plant data. *Ironmaking & Steelmaking*. vol. 43(5). P. 358–370.

- [13] Wang J., Fang Q., Jia J., Huang K., Shi W., Liu C., Zhang H. (2023) Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. vol. 27. P. 7047–7058.
- [14] Dering D., Swartz C., Dogan N. (2022) Dynamic modeling and simulation of basic oxygen furnace (BOF) operation. *Processes*. vol. 8(4). P. 483.
- [15] Gao M., Gao J.T., Zhang Y.L. Yang S.F. (2020) Two-dimensional temperature distribution and heat transfer during scrap melting. *JOM*. vol. 72. P. 1943–1952.
- [16] Cao L., Wang Y., Liu Q., Feng X. (2018) Physical and mathematical modeling of multiphase flows in a converter. *ISIJ International*. vol. 58 (4). P. 573–584.
- [17] Sun J., Zhang J., Jiang R. Feng X., Liu Q. (2024) Numerical simulation of droplet splashing behavior in steelmaking converter based on VOF-to-DPM hybrid model and AMR technique. *Metall. Mater. Trans. B*. vol. 55. P. 1098–1116.
- [18] Lv M., Che S., Yang L., Wei G. (2022) Research progress on injection technology in converter steelmaking process. *Metals*. vol.12(11). P. 1918.
- [19] Kemminger A., Krause F., Odenthal H.J. (October 2022) CFD simulation of top-blown converters. 9th EOSC European Oxygen Steelmaking Conference, Aachen.
- [20] Sun J., Zhang J., Lin W., Cao L., Feng X., Liu Q. (2021) Effect of impact cavity shape induced by supersonic oxygen jet on the dynamic characteristics of molten bath in converter. *Steel research international*. vol. 92(9). P. 2100179.
- [21] Wang X, Liu K, Liu G, Han P, Ma H. (2024) Effect of cavity shape caused by jet impact of swirl-type oxygen lance on molten bath mixing efficiency. *Ironmaking & Steelmaking*. vol. 51(5). P. 460–469.
- [22] Filho A.C.P.C., Barbosa A.L.L., Maia B.T., de Almeida E.N., de Melo G.M.S., Gargano J.P.P.S., da Silva K.L.M.M., de Vasconcelos L.H.L., Lemos L.R., da Costa Viana L.A., da Silva R.C. (2024) Jet over water penetration and equations — 04 nozzle variations. Proceedings of the Seminar on Steelmaking, Casting and Non-Ferrous Metallurgy. 53rd Seminar on Steelmaking, Casting and Non-Ferrous Metallurgy. vol. 53(53). P. 3—17.
- [23] Semykin S.I., Golub T.S., Vakulchuk V.V. (2020) Dosligzenia na fizychnii modeli osoblyvostei povedinky dvofaznoi vanny pry verhniomu produvanni cherez nakonechnykh zi skladyenyi soplami. [Investigation on a physical model of the peculiarities of the behavior of a two-phase bath with top blowing through a tip with folded nozzles]. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. vol. 34.P. 129–138. [in Ukrainian]
- [24] Semykin S.I., Golub T.S., Dudchenko S.O., Vakulchuk V.V. (2018) Issledovanie na fizicheskoi modeli s verhnei produvkoj gazodinamicheskogo napora i parametrov strui pri ee estechenii iz koltsevogo koaksialnogo shchelevogo sopla v zidkuu vannu. [A study on a physical model with top blowing of the gas-dynamic pressure and parameters of the jet as it flows out of an annular coaxial slot nozzle into a liquid bath] Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. vol. 32. P. 220–228. [in Russian]
- [25] Cai X.-Y., Duan H.J., Li D.-H., Xu A.-J., Zhang L.-F. (2024) Water modeling on fluid flow and mixing phenomena in a BOF steelmaking converter. *J. Iron Steel Res. Int*. vol. 31. P. 595–607.
- [26] Naito K., Kitamura S., Ogawa Y. (2002) Effects of BOF top blowing and bottom stirring conditions on suppressing excessive oxidation. *Ironmaking & Steelmaking*. vol. 29 (3). P. 208–213.
- [27] Cherniatevych A.H., Molchanov L.S., Yushkevych P.O. (2017) Vysokotemperaturnoe modelirovanie produvki konverternoi vanny s primeneniem trehyarusnoi furmy. [High-temperature modeling of converter bath blowing using a three-tier lance]. Metal and Casting of Ukraine. vol. 6—7. P. 17–21. [in Russian]
- [28] Semykin S.I., Golub T.S. (2018) In situ investigation of slag-metal interactions in top blown oxygen converter upon low-voltage application. *JOM*. vol. 70(10) P. 2262–2269.

Надійшла до редакції 09.10.2025

Прийнята після рецензування 21.10.25

Опублікована 23.10.2025