

## МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.184; 669.046

DOI 10.31319/2519-2884.34.2019.1

ПОХВАЛТИЙ А.А., к.т.н., доцент  
 СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор  
 ЧУБІН К.І., к.т.н., доцент  
 ПОЛІТАЄВ В.П., к.т.н., доцент  
 ПОХВАЛТА О.В., магістр

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### ФОРМУВАННЯ ГАЗОМЕТАЛЕВОГО ПОТОКУ В УМОВАХ «ХІМІЧНОГО» ВАКУУМУ У СТАЛЕВИПУСКНОМУ КАНАЛІ

**Вступ.** Удосконалення способів захисту залізовуглецевого розплаву на випуску з кисневого конвертера у сталківш від вторинного окислення залишається актуальним завданням. Вміст у розплаві 800...1200 ppm кисню та надходження останнього до розплаву по ходу випуску у кількості 1,65...3,35 кг/т [1] та 1,48...2,65 кг/т сталі [2] за рахунок ежекції кисню з оточуючої атмосфери негативно впливає на питому витрату розкислювачів під час позаагрегатної обробки.

В роботах [1, 2] розрахунок кількості кисню, засвоєного розплавом з оточуючої атмосфери, окремою статтею не виділений, але тренд – при збільшенні тривалості випуску загальна кількість кисню в розплаві збільшується – залишається незмінним. Згідно з моделлю ежекції повітря Охотського В.Б. [3], за умов 100% загального чаду Mn, на частку чаду за рахунок кисню, який потрапив до розплаву в результаті ежекції повітря, припадає 14...20% від загального. Подібні значення отримано в роботах Казачкова Є.А. [4] та Паримончика І.Б. [5].

Одним із способів обмеження впливу на розплав кисню оточуючої атмосфери може бути формування захисної газової оболонки навколо потоку розплаву за рахунок вдування аргону у робочий простір сталевипускного каналу [6, 7]. Таким чином утворюється штучний, так званий «хімічний» вакуум, формується газометалевий потік та захисна оболонка з аргону навколо зовнішньої границі потоку на виході з сталевипускного каналу. Необхідно відмітити, що інформація щодо закономірностей формування захисної оболонки та впливу режимів вдування аргону на структуру газометалевого потоку у доступних джерелах відсутня.

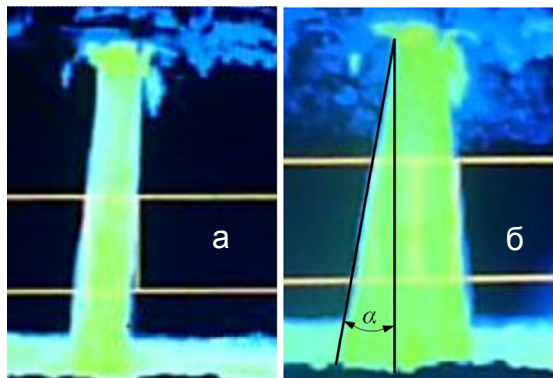
**Постановка задачі.** Метою роботи є дослідження гідрогазодинамічних закономірностей формування газометалевого потоку на випуску з конвертера в умовах створення «хімічного» вакууму за рахунок вдування аргону крізь сопла, розташовані у сталевипускному каналі.

**Результати роботи.** За результатами виконаної авторами даної роботи оцінки для умов конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський МК» джерела надходження кисню до розплаву при випуску з конвертера розподіляються наступним чином (табл.1).

Таблиця 1 – Розподіл джерел надходження кисню до сталерозливного ковшу по ходу випуску розплаву з конвертера

Статті надходження кисню	Кількість кисню, ppm	Ступінь чаду розкислювачів, %
Окисленість металевого розплаву	800-1200	30-35
Високоокислений шлак	1600-2000	50-60
Ежекція повітря потоком розплаву [3]	240-320	14-20

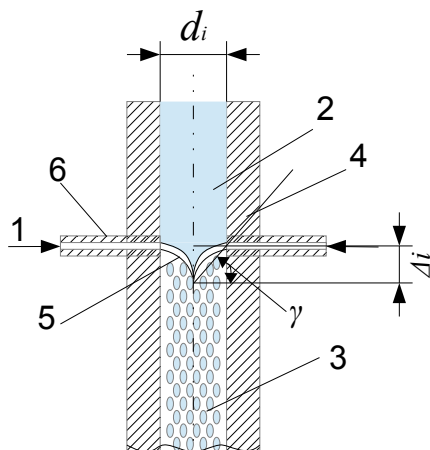
При випуску з конвертера кут розкриття потоку розплаву (ступінь організації  $\alpha$ ) залежить від остаточної глибини конвертерної ванни та знаходиться в межах від  $1-3^\circ$  до  $10-12^\circ$  (рис.1).



а – потік з високим ступенем організації ( $\alpha = 1-3^\circ$ ); б –  $\alpha = 10-12^\circ$

Рисунок 1 – Стан газометалевого потоку на випуску з конвертера

Витрата компресорного повітря на моделі складала  $0,1 \dots 0,6 \text{ м}^3/\text{хв.}$ , що відповідає витратам аргону для 250-т конвертера у  $2,6 \dots 26 \text{ м}^3/\text{хв.}$  або  $0,1 \dots 1,0 \text{ м}^3/\text{т}$  сталі. Модельний сталевипускний канал оснащено блоками, що містили від 2-х до 6-ти циліндричних сопел діаметром  $1,8 \dots 2,3 \text{ мм}$ . Сопла розташовували попарно, перпендикулярно до потоку рідини, у «реакційній зоні» з відносною довжиною  $l_i/l_0 = 0,25 \dots 0,75$  від повної довжини каналу (друга камера). Тут  $l_i$  – довжина другої камери, м;  $l_0$  – довжина сталевипускного каналу, м.



$d_i$  – відстань між соплами, м;  
 $\Delta l_i$  – глибина воронки рідини, м;  
 $\gamma$  – кут нахилу газових струменів, град.

Рисунок 2 – Схема формування ГРП при вдуванні повітря у робочий простір сталевипускного каналу по ходу витікання рідини

Дослідження гідрогазодинамічних закономірностей формування газометалевого потоку у робочому просторі та на виході з сталевипускного отвору проводили з використанням методів низькотемпературного моделювання [8] з дотриманням критеріїв гідродинамічної подібності за  $We=idem$ ,  $Fr=idem$ ,  $Ho=idem$  (за критерієм  $Re$  автотельності).

Для дослідження закономірностей формування газорідного потоку використовували модель двокамерного сталевипускного каналу у масштабі 1:5 до 250-т конвертера ПАТ «Дніпровський МК» [9, 10], у якості модельних речовин – воду, компресорне повітря та/або аргон – у якості середовищ, що моделюють металевий розплав та аргон відповідно.

Для візуалізації та визначення характеру впливу газових струменів з сопел на формування газорідного потоку (ГРП) використовували модель сталевипускного каналу прямокутної форми з прозорими стінками [9]. Відстань між блоками сопел складала  $0,05 \text{ м}$  при відносній довжині «реакційної зони»  $l_i/l_0 = 0,5$ .

Схему формування газорідного потоку наведено на рис.2.

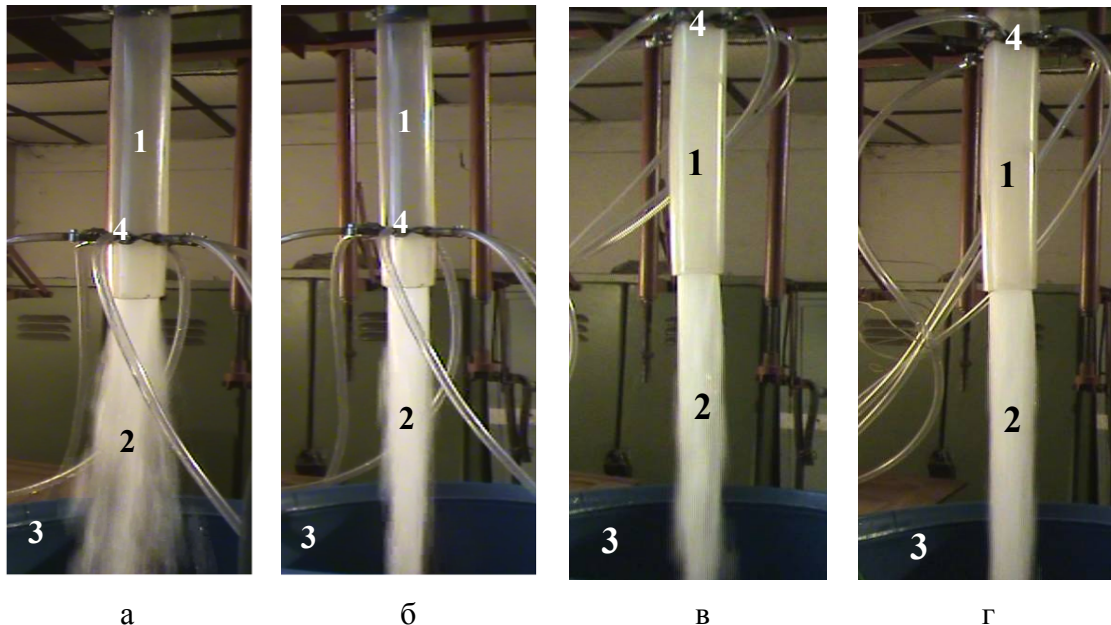
З метою виявлення факторів, які впливають на ступінь організації ГРП, проведено серію експериментів з перемінною кількістю сопел ( $n$ ) при зміні питомої витрати газу на одне сопло  $Q_{g,1} = Q_g / n$ .

Вигляд відкритої частини газорідного потоку при вдуванні газу крізь 2 і 6 сопел при відносній довжині реакційної зони  $0,25$  і  $0,75$  наведено на рис.3. Обробкою результатів досліджень отримано математичну залежність, що харак-

теризує взаємний вплив відносної довжини «реакційної зони» і витрат газу на одне сопло на кут розкриття ГРП:

$$\alpha = -160 \cdot Q_{g,1} \cdot \frac{l_i}{l_0} + 160 \cdot Q_{g,1} + 4 \cdot \frac{l_i}{l_0} - 4 \quad (1)$$

$$\text{при } 0,25 \leq \frac{l_i}{l_0} \leq 0,75; \quad 0,05 \leq Q_{g,1} \leq 0,10.$$



1 – сталевипускний канал; 2 – газорідний потік; 3 – ківш; 4 – блок сопел

Рисунок 3 – Вигляд структури газорідного потоку для  $l_i/l_0 = 0,25$  (а, б) та  $0,75$  (в, г) відповідно з подачею газу крізь два (а, в) та чотири (б, г) сопла

Результати розрахунків впливу витрат газу та довжини «реакційної зони» на кут розкриття газорідного потоку з використанням виразу (1) наведено на рис.4.

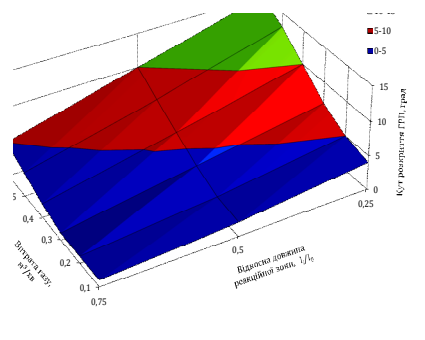


Рисунок 4 – Поверхня відгуку, що характеризує вплив витрати газу та довжини «реакційної зони» на кут розкриття газорідного потоку

Встановлено, що для  $l_i/l_0 = 0,25$  при питомій витраті газу на одне сопло у  $0,05 \text{ м}^3/\text{хв}$ . формується газорідинний потік з кутом розкриття  $\alpha = 3^\circ$ , а при  $l_i/l_0 = 0,75$  існує можливість для підвищення витрати газу вдвічі зі збереженням показників ступеня організації ГРП. Збільшення кількості блоків сопел у сталевипускному каналі буде сприяти пом'якшенню режиму продувки газом і формуванню ГРП з розвиненою міжфазною поверхнею та високим ступенем його організації.

При зменшенні довжини «реакційної зони» екстремум настає при менших витратах газу, а значення «докритичної» витрати газу мають більший діапазон. Отримана математична залежність представлена поліноміальним рівнянням другого ступеню, якому відповідає наявність одного екстремуму:

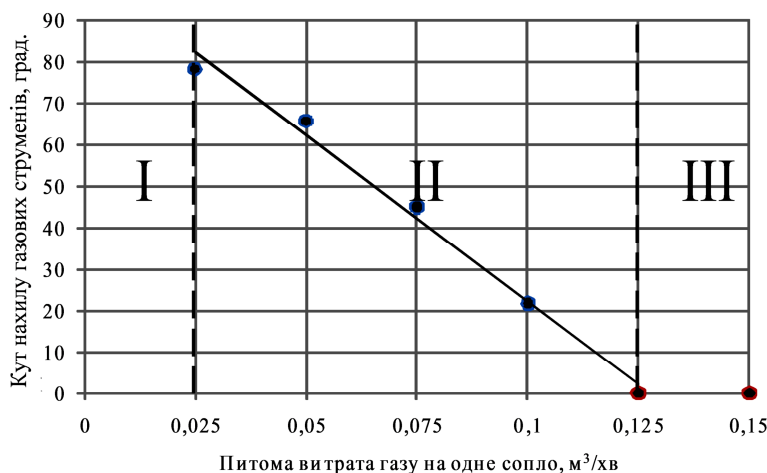
$$\alpha = 16,1 \frac{l_i}{l_0} Q_g^2 + 11 Q_g^2 - 41,8 \frac{l_i}{l_0} Q_g + 23,7 Q_g + 1,3 \frac{l_i}{l_0} + 1 \quad (2)$$

$$\text{при } 0,25 \leq \frac{l_i}{l_0} \leq 0,75; \quad 0,1 \leq Q_g \leq 0,6.$$

Витрату газу ( $Q_g$ ), яка відповідає екстремальному значенню функції, умовно позначили як критичну ( $Q_{g,кр}$ ). Встановлено, що за умови  $Q_g > Q_{g,кр}$  показник тривалості випуску рідини стабілізується та у меншому ступені залежить від витрати газу (рис.4).

Кут розкриття газорідинного потоку (рис.2) при відносній довжині реакційної зони  $l_i/l_0 = 0,75$  у дослідженому діапазоні витрат газу не перевищує  $\alpha = 5^\circ$ . В той же час, при  $l_i/l_0 = 0,25$   $\alpha = 10...15^\circ$  при перевищенні критичної витрати газу.

Вплив витрати газу, який вдувають у потік рідини, на зміну кута нахилу газових струменів у робочому просторі сталевипускного каналу та запропоновану класифікацію режимів продувки рідини наведено на рис.5.



I, II, III – режими продувки потоку рідини газом у сталевипускному каналі

Рисунок 5 – Вплив витрати газу на кут нахилу газових струменів в робочому просторі сталевипускного каналу

З використанням результатів експериментів та врахуванням даних, наведених на рис.5, отримали математичну залежність:

$$Q_{g,1} = \frac{Q_g}{n} \cdot (1 - 0,01 \cdot \gamma). \quad (3)$$

Для оцінки впливу ступеня організації ГРП на закономірності формування захисної газової оболонки навколо потоку провели серію досліджень з використанням аргону у якості газу для вдування у потік. Ефективність захисної дії оболонки з аргону оцінювали за вмістом кисню в спливаючих у ковші бульбашках газу, що утворювались при потрап-

лянні ГРП у ківш, за допомогою газоаналізатора типу ОКСИ-5М.

За результатами досліджень побудовано поверхню відгуку (рис.6) та отримано залежність

$$\{\hat{f}_2\} = 13,9 \frac{l_i}{l_0} Q_g^2 + 3,5 Q_g^2 - 33,9 \frac{l_i}{l_0} Q_g + 19,6 Q_g + 1,14 \frac{l_i}{l_0} + 1. \quad (4)$$

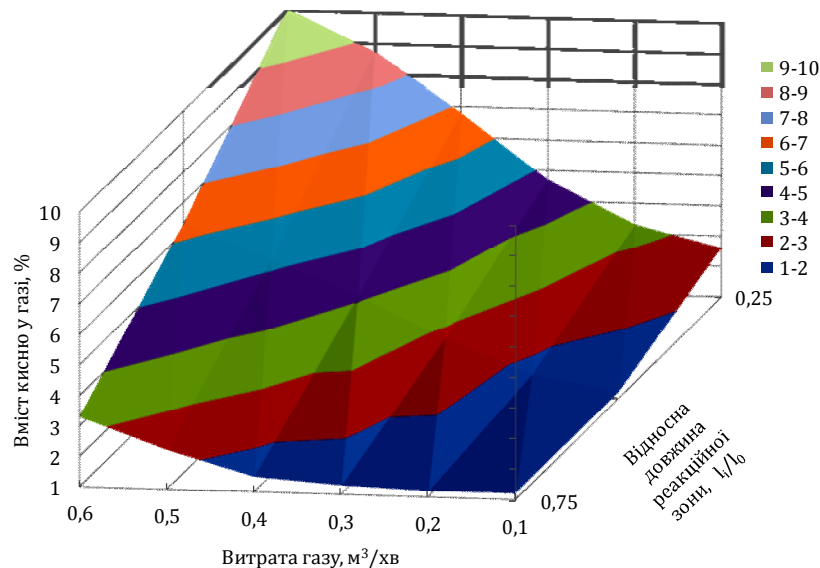


Рисунок 6 – Вплив витрати аргону на залишковий вміст кисню у газі в ковші з рідиною при різній відносній довжині «реакційної зони» у сталевипускному каналі

Ефективність захисної дії аргону оцінювали з використанням виразу

$$K_{Ar} = \frac{\left( 100 - \left( \frac{100 \cdot (\{O_2\} - \{O_2\}_{Ar})}{21} \right) \right)}{100}, \quad (5)$$

де  $K_{Ar}$  – коефіцієнт ефективності захисної дії газової оболонки;  $\{O_2\}_{Ar}$  – вміст кисню у технічно чистому аргоні, %.

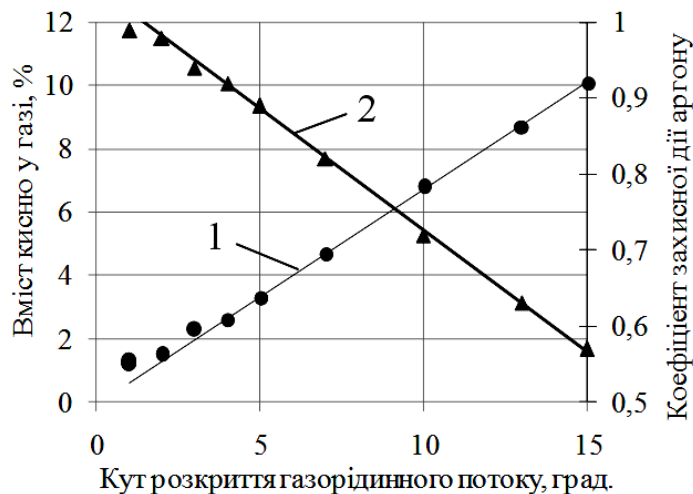


Рисунок 7 – Вплив кута розкриття ГРП на вміст кисню у газовій оболонці навколо потоку (1) і ступінь захисної дії аргону (2)

Показано, що збільшення кута розкриття ГРП призводить до зменшення ефективності захисної дії аргону (рис.7). При збільшенні кута розкриття ГРП з 1...3° до 10° ефективність захисної дії аргону знижується з 0,99 до 0,72.

Необхідно відмітити, що без використання аргону, навіть при куті розкриття ГРП  $\alpha = 0^\circ$ , вміст кисню у спливаючих у ковші бульбашках знаходився на рівні 21% (рис.7, (1)).

За результатами розрахунків за виразом (5) встановлено, що при відносній довжині «реакційної зони» у 0,75 коефіцієнт ефективності захисної дії газової

оболонки знаходиться у діапазоні 0,89...0,99 (рис.7), що підтверджує можливість формування ГРП з високим показником захисної дії аргону.

**Висновки.** Визначено вплив конструктивних параметрів двокамерного сталевипускного каналу (довжина реакційної зони, кількість і місце розташування газових со-

пел) і витрат газу на ступені організації і захисту газорідного потоку при вдуванні газу у робочий простір сталевипускного каналу. Встановлено, що при витраті газу нижче критичної ступінь організації потоку складає  $1...3^\circ$ , а при перевищенні критичної витрати зменшується до  $10...15^\circ$ .

Показано, що збільшення кількості газових сопел у сталевипускному каналі сприяє пом'якшенню режиму продувки та формуванню газорідного потоку з розвинутою міжфазною поверхнею і високим ступенем організації. При збільшенні кута розкриття потоку від  $1^\circ$  до  $10^\circ$  ефективність захисної дії аргону зменшується з 0,99 до 0,72. При відносній довжині «реакційної зони» у каналі, що дорівнює 0,75, коефіцієнт ефективності захисної дії оболонки аргону складає 0,89...0,99.

Запропоновано класифікацію режимів продувки потоку рідини у сталевипускному каналі у залежності від кута нахилу газових струменів ( $\gamma$ ), у відповідності до якої виділено:

I – режим «розімкнення» ( $\gamma > 78^\circ$ ), при якому газові струмені розімкнуті, формування газорідного потоку не відбувається. Режим продувки потоку не раціональний;

II – режим «змикання» ( $0 < \gamma < 78^\circ$ ), при якому газові потоки об'єднані, формується газорідний потік з розвинутою міжфазною поверхнею і високим ступенем організації. Рекомендований режим продувки розплаву у сталевипускному каналі;

III – режим «пробою» ( $\gamma = 0^\circ$ ), при якому подальше збільшення витрати газу, яка перевищує критичну, призводить до пробою і руху газорідного потоку у дисперсно-кільцевому режимі із зменшенням ступеня організації потоку. Продувку в такому режимі проводити не рекомендується.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Бородин Д.И., Фоменко В.А., Зинченко С.Д. Баланс кислорода при раскислении металла в ковше. *Труды седьмого конгресса сталеплавильщиков*. Магнитогорск, 2002. С.55-58.
2. Черепнев А.С., Котельников Г.И., Косырев К.Л. Процессы вторичного окисления в сталеплавильном производстве. *Труды девятого конгресса сталеплавильщиков*, г.Старый Оскол, 17-19 октября 2006 г. Москва, 2007. С. 462-466.
3. Охотский В.Б., Джусов А.А. Модель инъекции воздуха при выпуске стали из конвертера. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1992. №9. С.7-9.
4. Казачков Е.А., Федоров В.А., Сушич Ф.А., Кравченко В.Я. Взаимодействие металлов и газов в современных процессах производства стали. *Сборник научных трудов МИСиС*. М.: Металлургия, 1973. №79. С.154-156.
5. Паримончик И.Б., Яковлев Ю.Н., Казачков И.П. Инжектирование воздуха сталью при выпуске ее из печи. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1971. №4. С.54-57.
6. Пристрій для відділення металу і шлаку: пат. №36516 Україна: МПК C21C 5/46, F27D 3/15. № u200807519; заявл. 02.06.2008; опубл. 27.10.2008, Бюл. №20.
7. Patent 03-236414 of Japan C21C 5/46. Method for tapping molten metal / Sumita Morihiko // NIPPON STEEL CORP; Appl. № 02-031183; Filed 09.02.1990; Date of Patent 22.10.1991.
8. Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии. М.: Металлургия, 1984. 119с.
9. Кулик А.Д., Кащеев М.А., Похвалитый А.А. Совершенствование выпуска стали из конвертера. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2013. №1. С.18-20.
10. Похвалитый А.А., Огурцов А.П., Кулик А.Д., Кащеев М.А. Совершенствование выпуска стали из конвертера. Двухкамерная летка. *Труды тринадцатого конгресса сталеплавильщиков*, г. Полевское, 12-18 октября 2014 г. Москва, 2014. С.105-108.

Надійшла до редколегії 19.03.2019.