

Акреев В.В., Мельник С.О., Приходько С.В., Овчарук А.М., Губа Р.М.

Вибір оптимальної витрати інертного газу при продуванні сталі в 250-тонному сталерозливному ковші

Akreev V.V., Melnyk S.O., Prikhodko S.V., Ovcharuk A.M., Huba R.M.

Choosing the optimum inert gas consumption when purging steel in a 250-ton steel ladle

В сучасному світі, під час стрімкого підвищення вимог ринку до «чистоти» сталі та неупинного розвитку сталеливарної промисловості, питання забезпечення якості позапічної обробки набуває особливої актуальності. Чистота сталі завжди була основним завданням для вторинного рафінування у сучасному сталеплавильному процесі на установках «під-ківш». Від ефективності рафінування значною мірою залежить багато показників технології, таких, як контроль компонентів та складових сталі, видалення шкідливих домішок та включень. Процес рафінування неможливо реалізувати без гомогенізації металу. За цю частину технології обробки відповідає продування сталевих ванн інертним газом, яке в першу чергу, здійснюється за допомогою продувальних пробок, встановлених у продувні вузли в днищі сталерозливного ковша. Робота присвячена визначенню оптимальної витрати інертного газу під час продування сталі в 250-тонному сталерозливному ковші. У футеруванні днища сталерозливного ковша використовуються продувні вузли з щілинними пробками з оптичними індикаторами зносу у вигляді металевих штифтів. Виконано комп'ютерне моделювання процесу продування сталі з різною витратою аргону (300 л/хв та 600 л/хв), вказані переваги та недоліки, приділено увагу питанню впливу на футерування.

Ключові слова: сталерозливний ківш, продування, продувний вузол, продувна пробка, витрати інертного газу, вплив на футерування ковша.

In the modern world, during the rapid increase of market requirements for the "purity" of steel and the relentless development of the steel industry, the issue of quality implementation of non-furnace processing is becoming particularly relevant. The purity of steel always has been the main task for secondary refining in the modern steelmaking process in ladle furnaces. Many indicators of the technology, such as control of steel components, removal of harmful impurities and inclusions, largely depend of the efficiency of refining. Impossible to implement refining process without homogenization of metal. Purging of the steel bath with inert gas is responsible for this part of the technology, which is primarily carried out purging plugs installed in purging units in the bottom of the steel ladle. This article is devoted to the determination of the optimal consumption of inert gas during purging of steel in 250-ton steel ladle. Purging units with slotted purging plugs and optical wear indicators with metal pin are used in the bottom lining of steel ladle. A computer simulation of the purging process was made with different argon flow rate (300 l/min and 600 l/min), advantages and disadvantages specified, paid attention to the issue of influence on the steel ladle lining.

Key words: steel ladle, purging, purging unit, purging plug, consumption of inert gas, influence on ladle lining.

Вступ. Промисловий процес продування металевих ванн здійснюється основними засобами (вузол для продування) та аварійними засобами (верхня монолітна бетонна фурма для продування аргонем у ковші). У цій роботі ми розглядатимемо нижнє продування через продувальні пробки (рис. 1).

Продувальна пробка – це вогнетривкий виріб в металевій обічайці, призначений для подачі газу від зовнішньої торцевої поверхні в заданому напрямку через внутрішню торцеву поверхню далі в металеву ванну ковша. Розрізняють такі основні типи пробок за керамічною частиною – щілинні, пористі, зі вставками, з керамічними пластинами, складові (гібридні) та динамічні.

У роботі проводиться моделювання перемішування та усереднення металу в сталерозливному ковші за допомогою щілинних пробок, кількість щілин – 30, розмір щілини 0,2 x 20 мм (рис. 2). Вибір

типорозміру пробки, її конструкції, кількості щілин, геометричних розмірів обумовлений технічним завданням комбінату на даний тип продукції.

Рух бульбашок інертних газів в ковші і перемішування металу залежить від тиску інертного газу в системі, геометричних розмірів пробки, місць встановлення, кількості щілин та інших конструктивних особливостей виробів.

Додаткову роль відіграють експлуатаційні фактори - обслуговування вузла продувки, очищення продувної пробки між плавками. Зокрема, інтенсивне продування киснем призводить до підвищеного зносу вогнетривкого виробу, в той час як недостатнє очищення пробки призведе до наморозування металу в щілинах виробу і, можливо, закупорювання продувних елементів. З рештою це вплине на процес перемішування металу в сталь ковші, знижуючи його інтенсивність [1,2].

© Акреев В.В. - УДУНТ
Мельник С.О. - УДУНТ
Приходько С.В. - УДУНТ
Овчарук А.М. - УДУНТ
Губа Р.М. - УДУНТ

© Akreev V.V. - USUST
Melnyk S.O. - USUST
Prikhodko S.V. - USUST
Ovcharuk A.M. - USUST
Huba R.M. - USUST



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

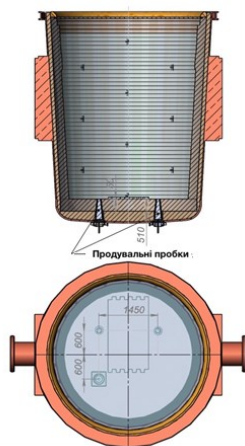


Рис. 1. Схема розташування продувальних пробок у ковші

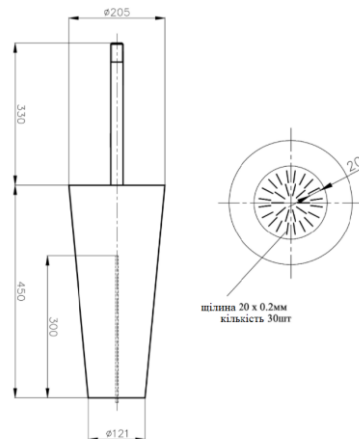


Рис. 2. Креслення продувальної пробки

Аналіз літературних даних та постановка задачі. Донний процес продування сталі в ковші за допомогою продувних вузлів має низку актуальних питань, на яких необхідно зупинитися [3]:

- сталь з конвертера, маючи температуру в межах від 1600 до 1700 °С потрапляє у ківш і входить у контакт із поверхнею пробки. Температура внутрішньої поверхні пробки при цьому різко підвищується до приблизно 1600 °С. Зовнішня поверхня продувальної пробки у випадку недостатнього прогріву футерування днища ковша має температуру в межах 300-400 °С, що спричиняє термічний удар та виникнення напружень в вогнетриві;

- при недостатньому тиску газу може скластися ситуація, коли сталь контактує з поверхнею щілин пробки. В наслідок локального перегріву в зонах контакту пробки з металом відбуваються фазові перетворення із зміною їх механічних властивостей, що викликає напругу у вогнетриві і призводить до його розтріскування і розшаровування.

- З іншого боку, при більш інтенсивній подачі газу, високої швидкості потоку, витрати газу буде відбуватися більш інтенсивне перемішування, що може призвести до випереджуючого зносу продувальної пробки через стирання і зворотного впливу газу (рис. 3).



Рис. 3. Основні механізми зносу продувних пробок

- корозія продувальної пробки внаслідок очищення поверхні киснем. Кисневе промивання здійснюється за допомогою високого тиску для видалення металевих і шлакових утворень в області продувального вузла. Ця операція необхідна задля підвищення надійності роботи пробки та високої ефективності барботування газу. Процес очищення пробки киснем характеризується критично високими температурами, а також утворенням хімічно-агресивного середовища з великою кількістю

оксидів заліза. Таке середовище дуже агресивне по відношенню до вогнетривкового матеріалу продувального вузла. Процес має бути закінчено, коли досягнуто повна працездатність продувальної пробки та досягнуто задану швидкість потоку газу [3].

- одним із ефективних способів, за допомогою якого можна максимізувати строк роботи продувальної пробки є наявність індикатора зносу вогнетриву. Цей засіб дозволяє контролювати рівень зносу вогнетриву пробки та уникати передчасного

виведення її з експлуатації.

Найпоширенішим прийомом формування індикатора зносу є використання матеріалу з більш високою теплопровідністю ніж основний матеріал пробки. Маючи вищу теплопровідність, матеріал індикатора охолоджується потоком газу до більш низької температури ніж основний матеріал пробки. Результатом цього буде наявність добре помітної темної плями на внутрішній поверхні продувальної пробки.

Другий тип індикатора зносу – це система з використанням металевго штифта. Штифт розміщують в пробці від вузького (внутрішнього) перерізу до рівня критичного зносу вогнетриву. В процесі роботи штифт спостерігається як темна точка на поверхні пробки і зникає після досягнення критичного рівня вогнетриву.

- зношення продувальної пробки через потрапляння та інфільтрацію сталі у щілини з наступним розколюванням тіла вогнетриву, ця інфільтрація відбувається під час фази випуску з конвертера. Це поширене явище - щілини з низькою швидкістю потоку газу негативно позначатимуться на продуктивності пробки, рух газу через них буде вкрай нестабільний. Конструкція продувної частини пробки, геометричні розміри щілин, продуктивність та швидкість руху газу мають бути підібрані ретельно до заводських умов для забезпечення стабільного, непульсуючого потоку [2].

- є можливість додатково забезпечити пристрій зворотним клапаном. Зворотний клапан можна розмістити в тілі трубки продувної пробки, а також у системі подачі інертного газу на стальковші. Зворотний клапан дозволяє уникнути потрапляння металу в щілини пробки після закінчення продування інертним газом: після припинення подачі газу до виробу зворотний клапан створює залишковий тиск газу всередині пробки і не дозволяє металу проникнути в щілини виробу. Встановлення клапана якомога ближче до продувальної пробки зазвичай дозволяє унеможливити падіння тиску газу в пробці і тим самим уникнути проходження металу в продувальні щілини.

Результати досліджень та обговорення їх результатів. Для побудови геометрії 250-тонного стальківша використовувався програмний комплекс системи автоматичного проектування SolidWorks. Ґрунтуючись на проектних кресленнях, була підготовлена тривимірна модель металевго корпусу ківша, в неї встановили арматурне і робоче футерування відповідно до реального робочого проекту, встановили продувальні вузли зі змінними продувальними пробками (рис. 1, 2).

Під час підготовки умов моделювання враховувалися реальні значення - тиск інертного газу в

$$\frac{\partial \rho y_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i y_m) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((D_{mn} + D_{mn}^t) \frac{\partial y_m}{\partial x_i} \right) + S_m,$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

де D_{mn} , D_{mn}^t – молекулярна і турбулентна матриці дифузії, S_m – швидкість виробництва або споживання m -го компонента.

межах 6-10 ат, витрата інертного газу на рівні 300 л/хв та 600 л/хв [3-4].

Для формулювання математичної моделі були зроблені наступні припущення: розглядалися лише рідкий шлак, метал, інертний газ (1); інертний газ розглядався як стисливий ідеальний газ і, таким чином, дотримувалось співвідношення $pV = \nu RT$, а розплав – як ньютонівська рідина, що не стискається (2); в'язкість і поверхневий натяг усіх фаз були постійними (3); хімічними реакціями процесу плавки довелося знехтувати (3).

Додатковий модуль Flow Simulation дозволяє моделювати потоки рідини та газу для обчислення різних характеристик, таких як температура, швидкість потоку, об'ємна та масова концентрація рідини тощо. Модуль розв'язує рівняння Нав'є-Стокса, які є формулюваннями законів збереження маси, імпульсу та енергії для потоків рідини. Вираз доповнюються рівняннями стану рідини, що визначають природу рідини, і емпіричними залежностями густини рідини, в'язкості і теплопровідності рідини від температури. Непружні неньютонівські рідини розглядаються шляхом введення залежності їх динамічної в'язкості від швидкості зсуву потоку і температури, а стисливі рідини – шляхом введення залежності їх густини від тиску. Задача конкретизується визначенням її геометрії, граничних і початкових умов [5].

Програма для моделювання здатна передбачати як ламінарні, так і турбулентні потоки. Ламінарні потоки виникають при низьких значеннях числа Рейнольдса, коли число Рейнольдса перевищує певне критичне значення, потік стає турбулентним, тобто параметри потоку починають хаотично коливатися. Більшість потоків рідини, які зустрічаються в інженерній практиці, є турбулентними, тому модуль було розроблено в основному для моделювання та вивчення турбулентних потоків. Для прогнозування турбулентних потоків використовуються усереднені за Фавром рівняння Нав'є-Стокса, де враховуються усереднені за часом ефекти турбулентності потоку на параметри потоку, тоді як інші, тобто великомасштабні, залежні від часу явища враховуються безпосередньо. Завдяки цій процедурі в рівняннях з'являються додаткові члени, відомі як напруги Рейнольдса, для яких необхідно надати додаткову інформацію. Щоб закрити цю систему рівнянь, програмний модуль використовує рівняння переносу для турбулентної кінетичної енергії та швидкості її дисипації, так звану модель $k - \varepsilon$ [5].

Масообмін сумішах рідин визначається рівняннями збереження часток. Рівняння, що описують концентрації компонентів суміші, можна записати у вигляді:

У випадку закону дифузії Фіка:

$$D_{mn} = D \cdot \delta_{mn}, \quad D_{mn}^t = \delta_{mn} \cdot \frac{\mu_t}{\sigma}. \quad (2)$$

Між концентраціями видів має місце наступна алгебраїчна залежність:

$$\sum_m y_m = 1. \quad (3)$$

Якщо газоподібна (або рідка) речовина дифундує в газоподібній (або рідкій) рідині (якщо ця рідина тече і переносить іншу речовину, цю рідину зазвичай називають рідиною-носієм), і масова частка цієї речовини у в рідині носія занадто мала, тобто $y \ll 1$, то вона не може вплинути на

$$\frac{\partial \rho y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho y u_i - \frac{\rho RT}{pm} \left(\frac{\mu}{Pr \cdot Le} + \frac{\mu_t}{Pr_t \cdot Le_t} \right) \frac{\partial y}{\partial x_i} \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{m_1 m_2}{m^2} \left[\frac{\rho y v_i - y}{p} \left(\frac{\mu}{Pr \cdot Le} + \frac{\mu_t}{Pr_t \cdot Le_t} \right) \frac{\partial p}{\partial x_i} \right], \quad (4)$$

де ρ – густина рідини-носія і суміші речовини (оскільки $y \ll 1$, то ρ можна вважати густиною рідини-носія); t – час; x_i – i -та компонента використуваної системи координат; u_i – i -та складова швидкості несучої рідини (речовина має однакову швидкість); p – статичний тиск рідини-носія; R – універсальна газова стала; m – молярна маса рідини-носія та суміші речовини; m_1 – молярна маса речовини; m_2 – молярна маса рідини-носія; v_i – питомий об'єм речовини; μ – ламінарна в'язкість рідини-носія; μ_t – турбулентна в'язкість рідини-носія; Pr , Pr_t – ламінарне та турбулентне числа Прандтля несучої рідини; Le , Le_t – ламінарне та турбулентне числа Льюїса несучої рідини.

Рівняння розв'язується в обчислювальній області (або її підобласті) із заданими користувачем граничними умовами, початковими умовами та джерелами об'єму речовини, що переноситься потоком рідини (або газу). В нашому випадку завдання зведено до того, що обчислювальна область визначена як внутрішня порожнина сталерозливного ковша, обумовлена його робочим футеруванням, рідина – це розплав, газ подається через щільну продувальну пробку із заданими умовами, параметри моделювання ідеальні (стальківш розташований строго вертикально).

У процесі моделювання в ковші розраховувалася об'ємна концентрація розплаву в часі при одночасній роботі двох продувальних вузлів з однаковою витратою інертного газу. Стрілки на зображенні демонструють вектори швидкостей, а лінії, що об'єднують стрілки – лінії течії (криві, які проведені в середині потоку так, що в даний момент часу вектори швидкостей у всіх точках цієї кривої дотичні до неї) [5, 6]. Для проведення аналізу та зіставлення результатів між двома рівнями витрати газу, обрані наступні часові проміжки – 0,5 с; 1 с; 2 с; 4 с; 6 с; 12 с; 15 с; 17 с; 23 с та 27 с. На кожному рисунку витрата газу в 300 л/хв зображена у лівій частині, 600 л/хв у правій частині зображення.

На рис. 4, а зображено початок продування сталерозливного ковша на часовій позначці 0,5 с. В цей час ми можемо спостерігати початкову циркуляцію розплаву в області продувальних пробок, до того ж відмінності у правій та лівій частині зображення

властивості потоку рідини-носія (швидкість, тиск, температуру), а потім на розподіл цієї речовини в обчислювальній області через перенесення її потоком рідини та її дифузії в цю рідину. Згідно з цією опцією, дифузія цієї речовини оцінюється в попередньо розрахованому стаціонарному або нестаціонарному потоці рідини-носія шляхом вирішення наступного рівняння, враховуючи нерівномірність концентрації речовини та градієнт тиску рідини-носія (лише для газоподібних рідин) [5]:

практично відсутні або мінімальні. Фіксується повільний рух рідини вздовж стін сталерозливного ковша. Область в середній частині металевої ванни по всій висоті практично не рухається, хоча у варіанті з витратою 600 л/хв ця зона здається візуально меншою, ніж при 300 л/хв.

Часовий проміжок 1,0 с має певні особливості (рис.4, б). Область циркуляції рідини біля продувальних вузлів розширилася і збільшилася в перерізі моделювання, спостерігається характерний турбулентний, нестаціонарний рух рідини. Область «без руху» в середині ванни стала значно меншою і тепер більш явно відрізняється у правій та лівій частинах зображення. Разом з тим, циркуляція розплаву біля стін стала розширюватися від стіни у бік середини (вертикальної осі) ковша. З'явилася нова область руху – в шлаковій зоні, де лінії течії проходять від шлакового поясу ковша всередину ванни до вертикальної осі і потім розділяються. Частина з них спрямована вздовж осі вгору до поверхні ванни, частина – вниз у напрямку днища сталевих ковша. Процес перемішування в обох випадках на рис. 4, б збільшує свою інтенсивність у порівнянні з рис. 4, а.

Початкова стадія продування сталевих ковша закінчується приблизно на четвертій секунді моделювання процесу, див. рис. 4, в. Так можна висловитися ґрунтуючись на тому, що внутрішня область ванни металу «без руху» зменшується на 2,0 с, на часовій позначці в 4,0 с при витраті 300 л/хв перетворюється на маленьку пляму, а при витраті 600 л/хв її більше немає. Рух частинок по паралельних лініях, добре помітний на рис. 4, а та б, тепер вже відсутній. Течія стає неурегульованою, рух частинок зазнає хаотичних змін в напрямі в координатах площини і в часі.

Зони турбулентності з'являються вже в різних місцях металевої ванни, але особливо чітко їх видно при витраті інертного газу в 600 л/хв на четвертій секунді (рис. 4, в).

Відзначається хаотичне та інтенсивне перемішування рідини поблизу стін ковша. В такому режимі продування може вплинути на термін служби робочого футерування стін ковша.

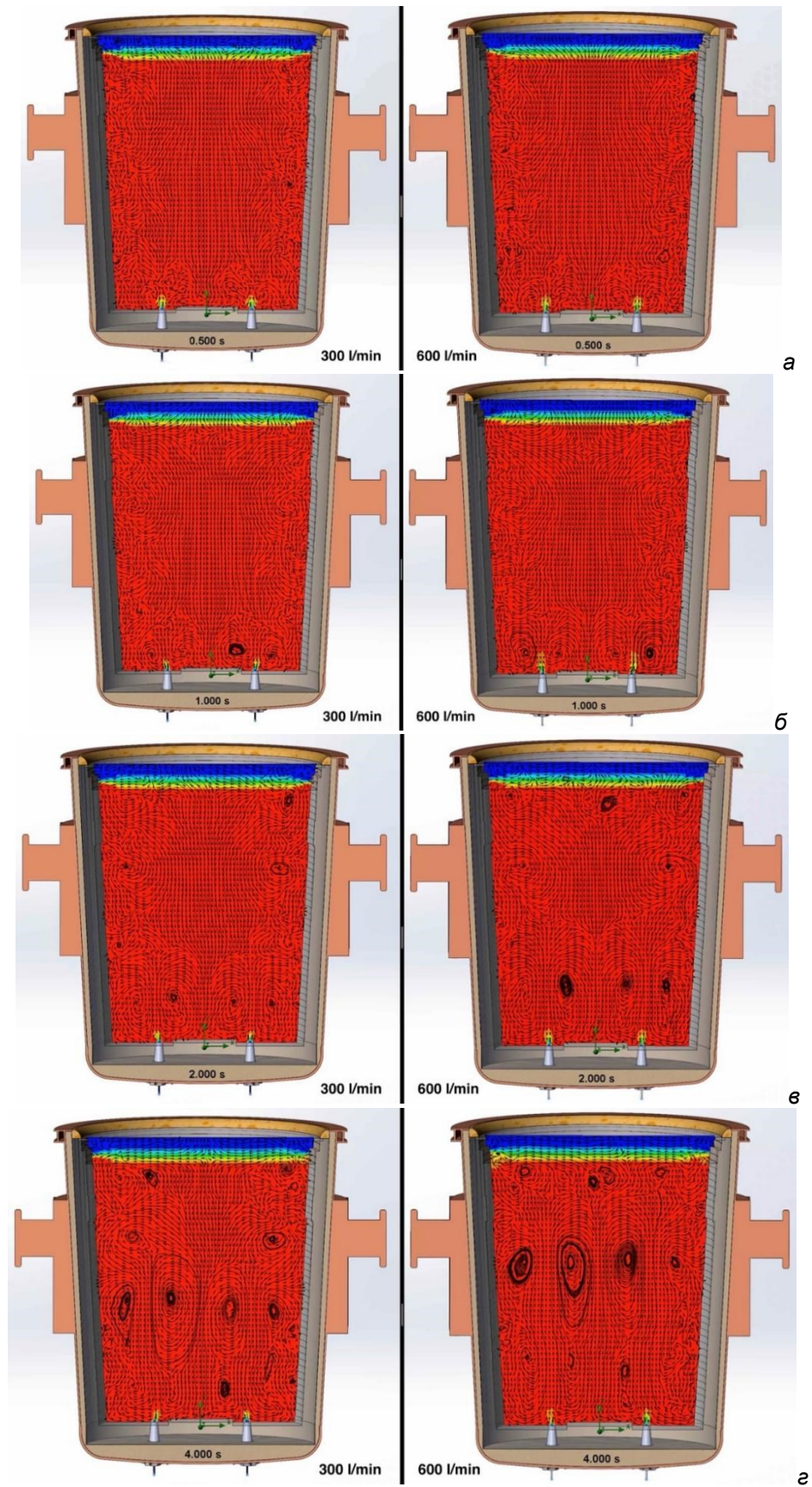


Рис. 4. Продування, часова позначка: а - 0,5 с; б - 1,0 с, в – 2,0 с; г - 4,0 с

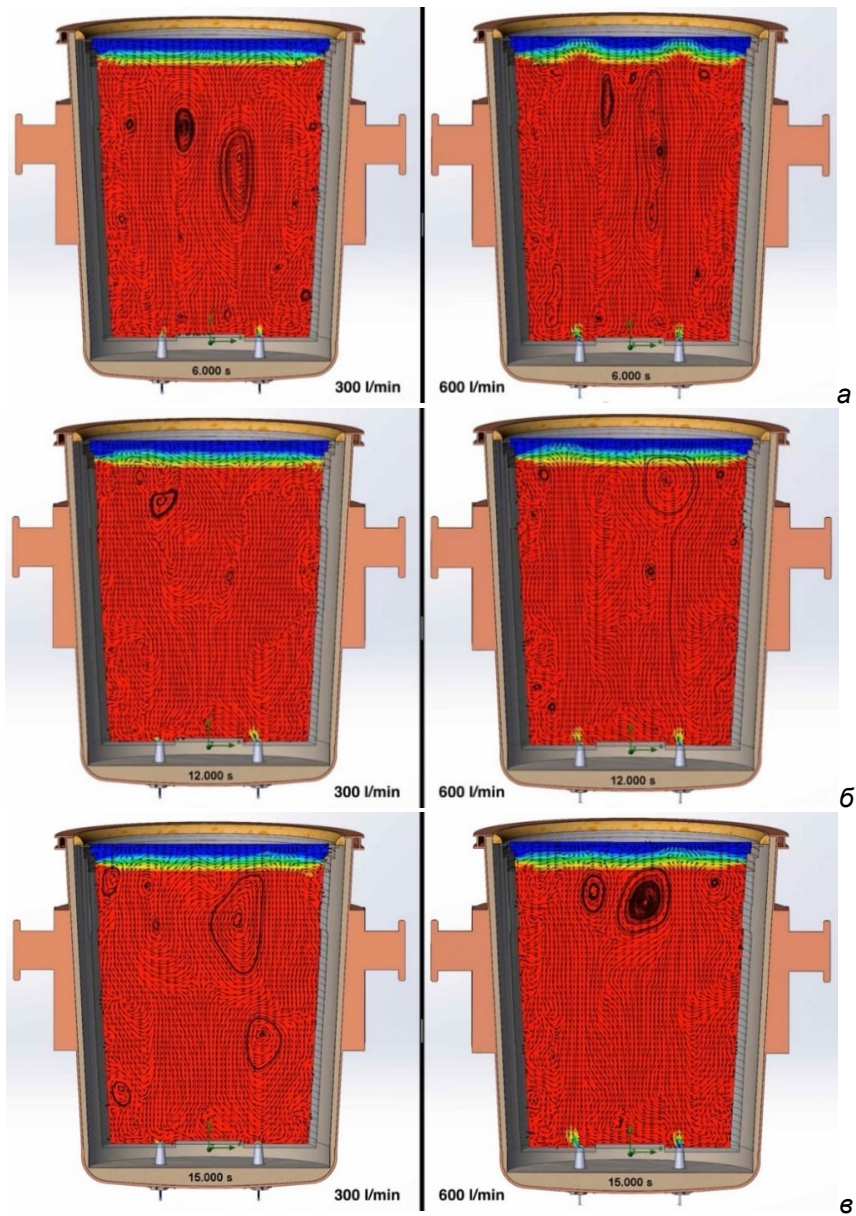


Рис. 5. Продування, часова позначка: а - 6,0 с; б - 12,0 с; в - 15,0 с

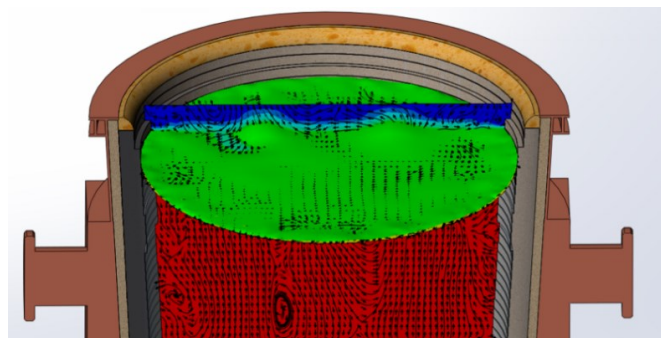


Рис. 6. Збурення при продуванні на 600 л/хв

На рис. 5, а при витраті інертного газу 600 л/хв видно, що потік газу «вертикально пробиває» ванну металу і утворює прямі, лінії течії практично паралельні від продувних пробок на днищі сталківша до шлакової зони вгорі ванни. На поверхні рідини

утворилися дві «хвилі», що нагадують сплески рідини, які при розгляді поверхні з різних проекцій є хвилеподібним короточасним підйомом рідини округлої форми.

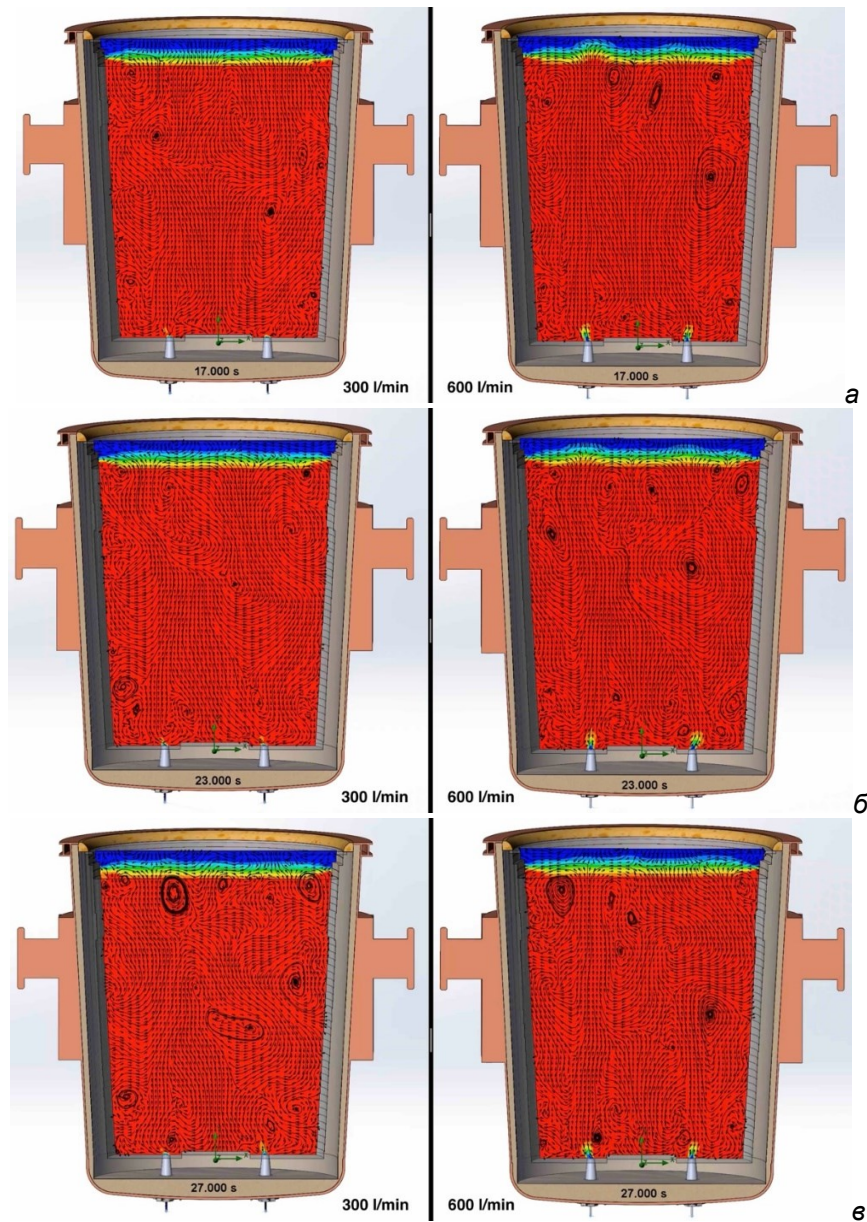


Рис. 7. Продування, часова позначка: а - 17,0 с; б - 23,0 с; в - 27,0 с

Відсутність даного явища в лівій частині зображення наочно показує нижчу інтенсивність вдування інертного газу в ванну. Також видно, що лінії течії не паралельні (або паралельні на менших ділянках і меншою мірою), в шлаковій зоні вони змінюють свій напрямок, поверхня рідини не має виступів, як на правій частині зображення. Стає помітним цікавий момент. Перемішування вже заповнило ванну повністю в обох випадках (300 та 600 л/хв), областей «без руху» не лишилося. Але ж перемішування є непередбачуване, воно не набуло стабільного, постійного характеру.

Розглянемо рис. 5, б і в з позначками часу 12,0 та 15,0 с. Рух частинок рідини характеризується випадковістю зміни траєкторії, турбулентна течія виникає в різних областях металеві ванни, як при витраті газу 300 л/хв, так і при 600 л/хв. На поверхні рідини при 600 л/хв утворюються збурення (див. рис. 6) і тепер їх поява вже має циркулюючий

характер без постійної частоти, з випадковим місцем появи. Можемо відзначити, що з точки зору збурення поверхні ванни, враховуючи можливі сплески і викиди металу з ковша (одночасно не зважаючи на інтенсивність перемішування в ковші), з міркувань безпеки, кращим буде продування з меншою витратою газу. Слід відзначити, що при перемішуванні ванни поблизу стіни сталюковша на проміжках часу в 12,0 та 15,0 с, спостерігається більш «закручені» лінії течії з одночасною появою ділянок турбулентності у безпосередній близькості до стін. В такому режимі продування остаточно буде впливати на термін служби робочого футерування стін ковша.

На рис. 7 зображене продування ванни на часових ділянках 17,0, 23,0 та 27,0 с. Щілинні продувальні пробки демонструють нерівномірне, якоюсь мірою пульсуюче, але постійне і інтенсивне перемішування в об'ємі. Після введення інертного газу в

рідину утворюються бульбашки, вони трансформуються, стикаються та розпадаються під час підйому вгору через взаємодію між рідиною та газом, стінами.

Для порівняння результатів, були взяті витрати інертного газу під час продування в 300 л/хв та 600 л/хв. Була отримана візуалізація ділянок, частково з високою турбулентністю потоків металу, та проаналізований їх можливий вплив на стійкість вогнетривного футерування сталюковша:

З точки зору «збурення» поверхні ванни (рис. 6), враховуючи можливі сплески і викиди металу з ковшу (одночасно не зважаючи на інтенсивність перемішування), продування при 300 л/хв виглядає більш стабільним та надійним.

Інтенсивність перемішування ванни металу, при використанні продування в 600 л/хв, вище, що може привести до скорочення тривалості прибуття металу в ковші, підвищення продуктивності і стійкості футерування, зниженню питомих витрат.

Інтенсивність перемішування ванни, при використанні продування на 600 л/хв, значно вище також і біля стін, що може призвести до випереджального зносу ділянок футерування.

Інтенсивність перемішування при використанні продування на 300 л/хв не має такої кількості турбулентних завихрень біля стін, що здається більш безпечним для футерування. Але в той же час тривалість перебування металу в ковші збільшується, що може позначитися на футерування негативно.

Отримання більш точних чисельних значень для оцінки часу прибування металу в ковші при тій чи іншій продуктивності перемішування, так само як і більш точна оцінка зносу футеровки в залежності від часу прибування металу в ковші та зносу шляхом вимивання через перемішування, вимагають більш об'ємної поставки задачі по моделюванню, а також доданням в розрахунок впливу температури та хімічних реакцій процесу плавки.

Перелік посилань

1. Воскобойников В. Г., Еднерал Ф. П., Кудрін В. А., Якушев А. М. Загальна металургія. Видання 2-ге, перероблене; 1973 р.
2. Пашинський В. Ф., Пархоменко Д. М. Довідник металурга - 2-ге вид., перероб. та дод. - Донецьк: Донбас; 1982 р.
3. Дніпровський металургійний комбінат. Виплавка, позапічне оброблення та розливання в злитки конвертерної сталі. Технологічна інструкція – ТІ 230-K320-94; 1994 р.
4. Pa-ha-ge / Viersen, Magnesitwerk Aken GmbH, АО «НТМК». Інструкція по експлуатації продувальних систем; № 06/97; 1997 р.
5. Linmin Li, Baokuan Li, Zhongqiu Liu. Modeling of Gas-Steel-Slag Three-Phase Flow in Ladle Metallurgy: Part II. Multi-scale Mathematical Model. *ISIJ International*. 2017. Vol. 57. №11. P. 1980-1989. <https://web.archive.org/web/20180728114007/https://www.jstage.jst.go.jp/article/i>
6. Технічна довідка. Solidworks Flow Simulation - англійська версія; 2022 р.

References

1. Voskoboynikov, V. G., Edneral, F. P., Kudrin, V. A., & Yakushev, A. M. (1973). *Zagalna metalurgiya*. 2-nd editin
2. Pashinskij, V. F., & Parhomenko, D. M. (1982). *Dovidnik metalurga*. 2-nd editin. Donbas
3. *Viplavka, pozapichne obroblennya ta rozlivannya v zlitki konverternoyi stali*. (1994). Tehnologichna instrukciya – ТІ 230-K320-94. Dniprovskij metalurgijij kombinat.
4. *Instrukciya po ekspluataciji produvalnih sistem* No. 06/97 (1997). Pa-ha-ge / Viersen, Magnesitwerk Aken GmbH, АО "NTMK"
5. Li, L., Li, B., & Liu, Z. (2017). Modeling of Gas-Steel-Slag Three-Phase Flow in Ladle Metallurgy: Part II. Multi-scale Mathematical Model. *ISIJ International*, 57(11), 1980-1989.
6. *Tehnichna dovidka. Solidworks Flow Simulation - angljska versiya* (2022).

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 04.06.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.08.2024