

К.С. Красніков, М.В. Лижов

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ІНТЕНСИВНОСТІ ШЛАКОВОГО ПІНОУТВОРЕННЯ В КОНВЕРТОРІ ПІД ЧАС ПРОДУВАННЯ ГАЗОМ

Анотація. Роботу присвячено математичному опису процесу піноутворення шлаку в металургійному конверторі і визначенню оптимального об'єму газу для продування і для уникнення переповнення конвертора газошлаковою піною. Кисневі конвертори широко використовуються у виробництві сталі, тому актуальною є побудова математичної моделі для підвищення ефективності означеного процесу. Всередині конвертора розташовується товстий шар шлаку на поверхні розплавленого металу. Шар має високу в'язкість і під час продування він швидко накопичує спливаючі бульбашки, формуючи піну, яка складається з шлаку і переважно газу. Піна збільшує свою товщину і може переповнити конвертор, що є небажаною подією з загрозливими наслідками. Запропоновано математичну модель, яка включає рівняння збереження імпульсу розплаву шлаку та об'ємної частки газу в ньому з граничними умовами для розв'язання рівнянь, що дозволяє оцінити швидкість піноутворення в залежності від інтенсивності продування. Для проведення чисельних дослідів дискретизацію диференціальних рівнянь пропонується зробити методом центральних різниць і реалізувати математичну модель у комп'ютерній програмі на розповсюдженій мові програмування C#. Застосування інтерфейсу користувача у вигляді екранних форм дозволить користувачеві вводити початкові умови чисельного досліду та одержувати інформацію про поточний стан системи, а також виводити на екран статистичні дані про поля швидкості та газу із можливістю їх збереження.

Ключові слова: математична модель, метод центральних різниць, кисневий конвертор, газошлакова піна.

Постановка проблеми. Сьогодні багато металургійних заводів використовують кисневі конвертори у виробництві сталі. Всередині конвертора є товстий шлаковий шар зверху розплаву металу. Шар має високу в'язкість і під час продування газом швидко збирає бульбашки, формуючи піну, яка складається з шлаку і переважно газу. Піна збільшує свою товщину і може переповнити конвертор, що є небезпечною ситуацією з можливими великими втратами. Переважним чинником піноутворення є

вдування газу під тиском, а значить важливо знайти оптимальний об'єм газу, який унеможливить переповнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження процесу спінення, включаючи визначення висоти, швидкості масоперенесення та в'язкості шлаку для виробництва сталі проводяться багато років. У роботі [1] автори визначають формулу для розрахунку швидкості бульбашок, враховуючи у розрахунку діаметр пузирів, поверхневий натяг і в'язкість. У проміжку шлакових густин від 3000 кг/м^3 до 3265 кг/м^3 автори одержують швидкості спливання, починаючи від $0,418 \text{ м/с}$ до $1,074 \text{ м/с}$, які достатньо добре відповідають вимірним значенням. Автори припускають, що діаметр бульбашок дорівнює біля 3 сантиметрів з газовмістом 0.9. Автори подають розраховану швидкість бульбашок других вчених на рисунках для порівняння результатів. Деякі з них мають істотну різницю у 10 разів.

У статті [2] автори розраховують ріст шлакової піни в основні періоди процесу видалення вуглецю в промисловому конверторі. Під час цього процесу виникають великі об'єми газу, який спливає через шар шлаку. Авторська формула враховує наступні фізичні властивості шлаку: в'язкість, густина і поверхневий натяг в газошлаковому шарі. Відповідно до результатів максимальна висота піни сягає 5 метрів на 6-й хвилини і зменшується приблизно до нуля до 16-ї хвилини. Таким чином піна росте під час першої стадії продування газом.

Автор роботи [3] презентує механізм піноутворення шлаку завдяки оксидам вуглецю в електродуговій печі, наводячи позитивні наслідки спінення на зменшенні кількості хімічних домішок і збереженні температури металевого розплаву. Також дослідник зауважує про такий побічний наслідок, як сплески шлаку, які можуть вилітати з горловини печі. Автор пропонує спосіб спостереження над індексом піноутворення, дійсного та реактивного току за допомогою апаратури для фіксації випромінювання.

Автори дослідження [4] розглядають піноутворення як розширення двохскладової стисливо-нестисливої рідини. Для чисельного обчислення полів швидкості, тиску і концентрації газу вони використовують

прямокутну розрахункову область. Також автори подають чисельний розв'язок рівнянь, оснований на перервному Галеркінському наближенні, яке зберігає масу і розсіює енергію відповідно до закону, відображеному у системі рівнянь.

У роботі [5] для опису просторового розповсюдження бульбашок і динаміки течії двох речовин (рідина і газ) у круглому тубусі з врахуванням формування пузиря використовується рівняння Кана-Гіліярда-Нав'є-Стокса. У рівнянні збереження імпульсу присутній доданок поверхневого натягу. Він розраховується на основі потенціального поверхневого натягу. Автори застосовують осьову симетрію тубусу і розглядають його одну четвертину у якості розрахункової області для чисельного розрахунку поверхні розділу газ-рідина, що формується під час вдування газу у тубус. Рисунки показують однакові результати для двовимірної та тривимірної постановки без осьової симетрії. Також автори показують, що радіальна відстань від стінок до вхідного отвору тубусу може сильно впливати на форму пузиря.

Формулювання мети дослідження. Дану роботу присвячено математичному опису процесу спінення шлаку в металургійному конверторі і визначенню оптимального об'єму газу для продування і для уникнення переповнення конвертора газошлаковою піною.

Викладення основного матеріалу дослідження. Припущення для математичної моделі є наступними:

- 1) Геометрія конвертора є циліндричною (рис. 1);
- 2) Існує симетрія відносно вісі конвертора для даної задачі;
- 3) Поверхня шару газошлаку і межа шлак-метал є плоскими. Поверхня має вертикальну швидкість змінну у часі, яка розраховується у залежності від поля швидкості розплаву шлаку;
- 4) Розплав шлаку є в'язкою Н'ютонівською рідиною – середовищем, яка прискорюється металом на межі шлак-метал і газовими бульбашками;
- 5) Газові пузири моделюються середовищем, яке проходить наскрізь рідкого шлаку та спричиняють його вертикальне збільшення через місцеву концентрацію газу.

Газ вдувається в розплав верхньою фурмою продування, яку розміщено на вісі конвертора. Рух газошлакової суміші визначається в постійних точках простору конвертора, який займає шар шлаку зверху рідкого заліза. Для прогнозування руху газошлакового середовища використовуються рівняння Нав'є–Стокса і перенесення–розсіювання з врахуванням ненульової розбіжності поля барицентричної швидкості відповідно до означених припущень. Система циліндричних координат ідеально відповідає геометрії задачі і вісь симетрії можна використати у спрощенні математичної моделі до двовимірної постановки (радіальна вісь r та вертикальна вісь z).

Розплав у шарі газошлаку представляється двоскладовим середовищем з барицентричною швидкістю, враховуючи ефективну його стисливість [6].

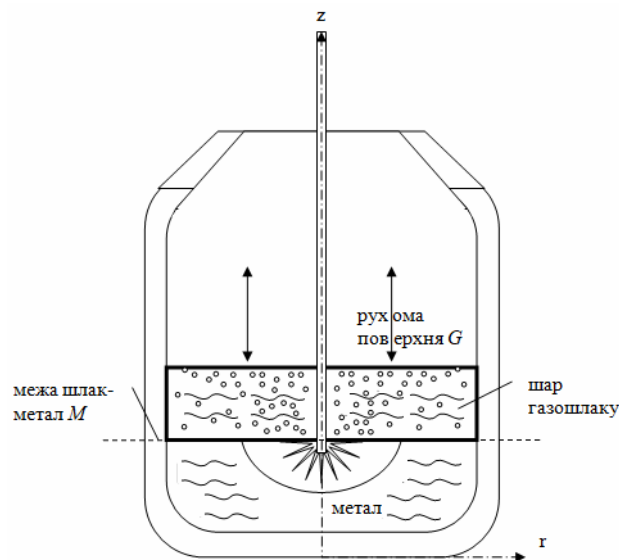


Рисунок 1 – Схематичний вид конвертора, осьовий переріз із виділеною розрахунковою областю

Рівняння руху газошлакового середовища включає прискорення від місцевої частки газу, використовуючи наближення Бусінеска:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = R(\vec{v}, v_e, \zeta_e, \alpha) - \nabla P, \quad (1)$$

$$R(\vec{v}, v_e, \zeta_e, \alpha) = \left(\vec{v} \times \nabla \times \vec{v} - \frac{1}{2} \nabla \vec{v}^2 \right) + v_e \Delta \vec{v} + \zeta_e \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) - \alpha \vec{g}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = \Phi(\vec{v}, \alpha), \quad (3)$$

$$\Phi(\vec{v}, \alpha) = \psi_\alpha + \nabla \cdot (\alpha \vec{w}_\alpha^c + D_\alpha \nabla \alpha), \quad (4)$$

де P – кінематичний тиск; v_e і ζ_e – коефіцієнти ефективних зсувної і об’ємної кінематичних в’язкостей; ψ_α – об’ємне джерело газу; w_α^c – вертикальна швидкість спливання газу, далі вважається незмінною величиною у припущенні миттєвого досягнення максимального значення, яке можна одержати в тому числі і експериментально; D_α – ефективний коефіцієнт розсіювання газу в шлаку, включаючи молекулярну і вихорну складові. Кінематичні тиск і в’язкості є наслідками ділення рівняння імпульсу на густину.

Місцева зміна об’ємної частки газової речовини α за одиницю часу природно залежатиме від функції Φ (4):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = \Phi(\vec{v}, \alpha), \quad (5)$$

де Φ – функція, яка включає внутрішнє (вдування газу) і поверхневе (розсіювання газу) об’ємні джерела газу.

Вертикальна швидкість поверхні G газошлаку залежить від об’єму газових витрат через фурму і від об’єму газу, звільненого з поверхні:

$$v_G = \frac{1}{A} \left(\psi_\alpha - w_\alpha^c \oint_G \alpha \cdot dG \right), \quad (6)$$

де A – площа поверхні G ; dG – частина поверхні з часткою газу α .

Система рівнянь (1) – (5) доповнюється граничними умовами відповідно фізичному сенсу. На твердих поверхнях S (в тому числі на вісі симетрії) для складової швидкості, перпендикулярної до поверхні, встановлено умову зупинки потоку, і для складових, паралельних до поверхні S – умова вільного ковзання; на рухомій поверхні G газошлакового шару – умова вільного ковзання і течії; на межі шлак-метал M швидкість подається вектор-функцією в залежності від умов руху металу і продування фурмою:

$$\vec{v}_\perp|_S = 0, \quad \vec{n} \cdot \nabla \vec{v}_\parallel|_S = 0, \quad (7)$$

$$\vec{n} \cdot \nabla \vec{v}_\perp|_G = 0, \quad \vec{n} \cdot \nabla \vec{v}_\parallel|_G = 0, \quad (8)$$

$$\vec{v}|_M = \vec{\varphi}(r), \quad (9)$$

де n – нормаль до відповідної поверхні.

Для газового поля α на твердих поверхнях і вісі симетрії встановлено умову ізоляції; на рухомій поверхні – нульової концентрації; на

межі шлак-метал – функція ε в залежності від умов руху металу і продування:

$$\vec{n} \cdot \nabla \alpha|_S = 0, \quad (10)$$

$$\alpha|_G = 0, \quad (11)$$

$$\alpha|_M = \varepsilon(r) \quad (12)$$

де n – нормаль до поверхні S .

Висновки. Запропоновано математичну модель, яка включає рівняння збереження імпульсу розплаву шлаку та об'ємної частки газу в ньому з граничними умовами для розв'язання рівнянь, що дозволяє наблизити параметри до оптимальних умов процесу. В координатах $r - z$ циліндричної системи рівняння (1) – (5) мають меншу кількість доданків ніж у рівняннях тривимірної постановки. Метод центральних різниць має достатній порядок точності, тому він обраний для чисельного розв'язку рівнянь. Мова програмування C# є популярною і програми на ній є достатньо швидкими, а застосування інтерфейсу користувача у вигляді екранних форм дозволить користувачеві вводити початкові умови чисельного досліду та одержувати інформацію про поточний стан системи, а також виводити на екран статистичні дані про поля швидкості та газу.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Misra P., Deo B., Chhabra R. P. Dynamic model of slag foaming in oxygen steelmaking converters // The iron and steel international journal. – 1998, № 38 (11), pp. 1225–1232.
2. Cicutti C., Valdez M., Perez T., Donayo R., Petroni J. Analysis of slag foaming during the operation of an industrial converter // Latin American Applied Research – 2002, № 32 (3), pp. 237–240.
3. Dicker J. Monitoring of slag foaming and other performance indicators in an electric arc furnace. Thesis submitted for the Degree of Master of Engineering]. New South Wales, 2014. 155 p.
4. Repossi E., Rosso R., Verani M. A phase-field model for liquid-gas mixtures: mathematical modelling and discontinuous Galerkin discretization // Modeling and scientific computing. – 2016, № 27, pp. 1–36.

5. Cai X., Wörner M., Marschall H., Deutschmann O. CFD simulation of liquid back suction and gas bubble formation in a circular tube with sudden or gradual expansion // Emission control science and technology. – 2017, № 3, pp. 289–301. doi: 10.1007/s40825-017-0073-3.
6. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е., Надрыгайло Т.Ж. Методы расщепления в задачах гидродинамики и тепломассопереноса. – Днепропетровск: системные технологии, 2003. – 260 с.

REFERENCES

1. Misra P., Deo B., Chhabra R. P. Dynamic model of slag foaming in oxygen steelmaking converters. The iron and steel international journal, 1998, № 38 (11), pp. 1225–1232.
2. Cicutti C., Valdez M., Perez T., Donayo R., Petroni J. Analysis of slag foaming during the operation of an industrial converter. Latin American Applied Research, 2002, № 32 (3), pp. 237–240.
3. Dicker J. Monitoring of slag foaming and other performance indicators in an electric arc furnace. Thesis submitted for the Degree of Master of Engineering]. New South Wales, 2014. 155 p.
4. Reposi E., Rosso R., Verani M. A phase-field model for liquid-gas mixtures: mathematical modelling and discontinuous Galerkin discretization. Modeling and scientific computing, 2016, № 27, pp. 1–36.
5. Cai X., Wörner M., Marschall H., Deutschmann O. CFD simulation of liquid back suction and gas bubble formation in a circular tube with sudden or gradual expansion. Emission control science and technology, 2017, № 3, pp. 289–301. doi: 10.1007/s40825-017-0073-3.
6. Ogurtsov A.P., Samokhvalov S.E., Nadrygailo T.G. Splitting methods in problems of hydrodynamics and thermomasstransfer. – Dnipro: System technologies, 2003, – 260p.

Received 11.11.2019.

Accepted 13.11.2019.

Математическое описание интенсивности шлакового вспенивания в конвертере во время продувания газом

Работа посвящена математическому описанию процесса вспенивания шлака в металлургическом конвертере и определению оптимального объема газа для продувки и во избежание переполнения конвертера. Кислородные конвертеры широко используются в производстве стали. Внутри конвертера пена увеличивается в глубину и может переполнить конвертер, что является нежелательным событием с опасными последствиями. Предложена математическая модель, которая включает уравнение сохранения импульса

расплава шлака и объемной доли газа в нем, что позволяет оценить скорость вспенивания в зависимости от интенсивности продувки. Для проведения численных опытов дискретизацию дифференциальных уравнений предлагается сделать методом центральных разностей, и реализовать математическую модель в компьютерной программе на распространенном языке программирования C#.

Mathematical description of slag foaming intensity in convertor during gas blowing

The work is devoted to mathematical description of slag foaming process in a metallurgical convertor and determination of an optimal gas volume for blowing and to avoid overflow of convertor. Oxygen convertors are widely used in steelmaking process. Inside convertor the foam increases its depth and can overflow the convertor, which is an unwanted situation with dangerous consequences. Presented mathematical model includes equations of molten slag impulse conservation and volumetric part of gas in it, which allows to estimate foaming speed depending on blowing intensity. For conducting of numeric experiments it is proposed to make discretization of differential equations using the central difference method, and to implement the mathematical model in computer program using a widespread programming language C#.

Красніков Кирило Сергійович – к.т.н., старший викладач кафедри програмного забезпечення Дніпровського державного технічного університету.

Лижов Микита Володимирович – аспірант кафедри прикладної математики Дніпровського державного технічного університету.

Красников Кирил Сергеевич – к.т.н., старший преподаватель кафедры программного обеспечения Днепровского государственного технического университета.

Льжов Никита Владимирович – аспирант кафедры прикладной математики Днепровского государственного технического университета.

Krasnikov Kyrylo Serhiiovych – PhD, senior lecturer at systems software department of Dniprovskiy state technical university.

Lyzhov Mykyta Volodymyrovych – PhD graduate at applied mathematics department of Dniprovskiy state technical university.