

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ АРГОНУ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ З МЕТАЛЕВИМ РОЗПЛАВОМ ПІД ЧАС НАПОВНЕННЯ

*Анотація. Стаття присвячується математичному опису розповсюдженого на металургійних комбінатах процесу наповнення проміжного ковша з подачею аргону в падаючий стовп металевого розплаву. Металургійні заводи використовують проміжний ківш для надійного постачання розплаву в машину неперервного лиття заготовок. Також важливим завданням проміжного ковша є видалення неметалевих включень за допомогою аргону, який вдувається в потік розплаву, падаючий з сталерозливного ковша. Гарне розподілення аргонних бульбашок у проміжному ковші впливає на швидке видалення небажаних компонентів розплаву, наприклад водню і азоту. З огляду на необхідність спливання газу швидкість розплаву в проміжному ковші повинна бути достатньо низькою. Проведення дослідів під час роботи металургійного заводу є небажаним, коштовним і супроводжується складнощами, пов'язаними з високою температурою та непрозорістю розплаву. Тому часто досліди процесу проводять у лабораторіях на, так званих, холодних моделях, де розплав заміняють водою, аргон – повітрям, а ківш – прозорою ємністю прямокутної форми при виконанні умов спорідненості. Недивлячись на очевидні переваги такого холодного моделювання сьогодні більшість дослідів все таки проводять на математичних моделях, які є значно дешевшим і низько-помилковим способом передбачення розвитку означеного процесу в різних умовах. Математичне моделювання руху розплаву допомагає обрати оптимальну геометрію проміжного ковша, а також необхідну кількість аргону. В статті запропоновано використовувати рівняння розсіювання-перенесення для поля аргону і рівняння Нав'є-Стокса – для поля швидкості. Розв'язок методом кінцевих об'ємів є добре перевіреною і забезпечує достатню точність. До того ж цей метод легко розпаралелити для пришвидшення обчислень на сучасних багатоядерних процесорах. Програмний додаток з графічним інтерфейсом користувача дозволяє відобразити стан системи на екрані для подальшого огляду і прийняття рішень щодо технологічного впровадження.*

*Ключові слова: проміжний ківш, продування розплаву аргонном, суцільне багатоскладове середовище, рівняння розсіювання-перенесення і Нав'є-Стокса.*

**Постановка проблеми.** Ввід аргонних бульбашок у проміжний ківш під час його наповнення добре впливає на видалення неметалевих включень,

наприклад, водню і азоту. З іншого боку необхідність спливання газу зумовлює потребу у зменшенні швидкості розплаву в проміжному ковші за допомогою спеціальних перешкод і перегородок, які встановлюються на шляху рідини від падаючого стовпа до стаканів-дозаторів. Математичне моделювання руху металевго розплаву і газу в ньому дозволить знайти застійні місця, а також швидкість розплаву в ковші.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Чисельні дослідження руху розплаву у проміжному ковші одержали розповсюдженість серед науковців. Автори у роботі [1] надають такі дані для семи металургійних заводів, як геометричні характеристики труби, витрату аргону і розплаву через трубу, оцінку його кількості у падаючому потоці розплаву. Проведено фізичне моделювання руху розплаву з вдуванням аргону за допомогою води, прозорої труби і контейнера. У висновках автори пишуть про неадекватність використання методу дискретних фаз розплав–газ, тому що у ході досліду газ швидко змішується з рідиною.

У роботі [2] автори досліджують вплив швидкості лиття на динаміку розплаву у проміжному ковші. Подано геометричні властивості ковша, а також порівняння розрахунків з експериментальними даними, які добре збігаються один з одним.

Автор роботи [3] чисельно моделює рух розплаву у проміжному ковші для визначення кількості неметалевих включень, які потрапляють у стакани-дозатори. Надано відсоток включень у готовому продукті у проміжку діаметрів, одержаний у ході промислового досліду. Виявлено, що наявність бар'єру на шляху потоку від місця падіння розплаву до стаканів-дозаторів очевидно зменшує кількість включень, потрапляючих у готовий продукт.

Статтю [4] присвячено моделюванню руху розплаву із змінним полем його температури в невеликому промковші з одним стаканом-дозатором і перегородкою. Для пошуку оптимальної висоти перегородки розглядається три варіанти: низька, середня і висока. Промисловий дослід з п'ятьма точками виміру показав достатньо гарну адекватність чисельних результатів моделювання. Автор робить висновки про незмінність температурної стабільності розплаву через різну висоту перегородки і збільшення неметалевих включень разом з висотою.

**Формулювання мети дослідження.** Метою роботи є математичне формулювання руху металевго розплаву з аргонем у проміжному ковші, який наповнюється, на основі законів збереження у вигляді рівнянь Нав'є–Стокса і рівняння розсіювання–перенесення для прогнозування розвитку означеного процесу.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Основні припущення математичної моделі:

- 1) Геометрія ковша – прямокутна, за виключенням північної стінки, яка охоплює місце падіння розплаву (рис. 1).
- 2) Форма розплаву є симетричною відносно падаючого стовпа.
- 3) Поверхня розплаву є плоска і рухається вертикально із заданою швидкістю.
- 4) Розплав є нестисливою в’язкою Ньютонівською рідиною.
- 5) Розплав падає у проміжний ківш вертикально з постійною швидкістю.
- 6) Геометрія падаючого стовпа розплаву є циліндричною.
- 7) Бульбашки аргону представлені суцільним середовищем, яке має постійну швидкість спливання і прискорює поле швидкості розплаву силою Архімеда.

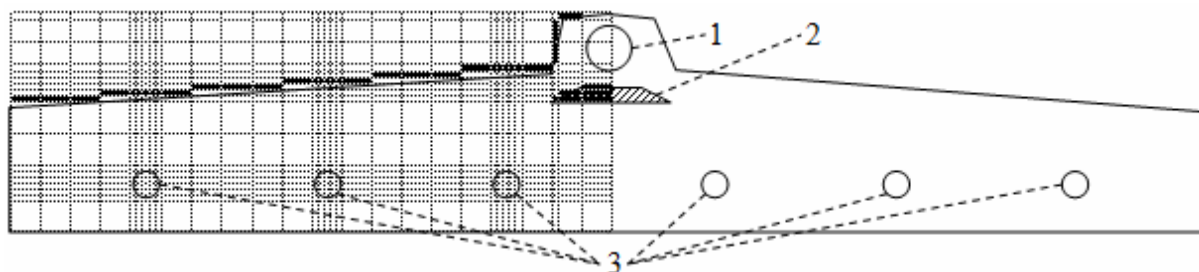


Рисунок 1 – Вид зверху проміжного ковша, що розглядається.

Темним кольором позначено тверді поверхні всередині розрахункової області.  
Позначення: 1 – місце падіння розплаву; 2 – перегородка; 3 – стакани-дозатори.

Динаміка розплаву визначається рівняннями Нав’є–Стокса з доданком Архімедової сили [5]. Поле тиску знаходиться з умови нестисливості середовища:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}\tilde{p} + \nu_e\Delta\vec{v} - \alpha\vec{g}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (2)$$

Рух поля аргону визначається полем швидкості розплаву і ефективним розсіюванням:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\alpha(\vec{v} + \vec{w}_a^c)] = \vec{\nabla} \cdot (D_\alpha \vec{\nabla}\alpha) + \psi_\alpha, \quad (3)$$

$$\psi_\alpha = \frac{q}{V} \frac{T_m - 300}{300} \quad (4)$$

де  $\nu_e$  – ефективна в’язкість середовища;  $\vec{w}_a^c$  – швидкість спливання бульбашок, яка розраховується експериментально;  $D_\alpha$  – коефіцієнт

ефективного розсіювання аргону у розплаві;  $\psi\alpha$  – джерело об’ємної частки аргону поблизу фурми;  $q/V$  – частка витрат аргону за одиницю часу і об’єму барботажною областю поблизу фурми продування.

**Висновки.** Подано математичну модель, для якої підходить прямокутна система координат з розв’язком методом кінцевих об’ємів в тривимірній постановці. Розрахункова область поблизу стаканів-дозаторів має більш щільний шар комірок для економії процесорного часу і концентрації чисельної точності. Північна стінка і перегородка моделюються граничними умовами твердої поверхні всередині розрахункової області. Пропонується в граничних умовах враховувати швидкість і діаметр падаючого потоку розплаву, а також діаметр стаканів-дозаторів і висоту стопорів, що сумарно суттєво впливатиме на швидкість наповнення ковша.

Математична модель реалізується на комп’ютерній мові C#, яка достатньо часто застосовується для виконання складних обчислень, в тому числі з застосування розпаралелювання. Графічний інтерфейс користувача комп’ютерної програми дозволить ввести початкові дані і умови чисельного досліду і візуалізувати результати, а підсистема виводу – зберігати їх через заданий проміжок часу. Комп’ютерна програма надаватиме можливість оцінити вплив конструкції і умов процесу на наявність застійних зон, а також на швидкість розплаву поблизу стаканів-дозаторів. Результати планується використати у якості рекомендацій для металургів-технологів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Mazumdar D., Singh P. K., Tiwari R. K. Shrouded transfer of molten steel from ladle to tundish: current understanding, mathematical modelling and new insight // ISIJ International, Vol. 58 (2018), No. 8, pp. 1545–1547.
2. He F., Wang H., Zhu Zh. Numerical investigation of effect of casting speed on flow characteristics of molten steel in multistrand tundish // ISIJ International, Vol. 59 (2019), No. 7, pp. 1250–1258.
3. Warzecha M. Numerical modelling of non-metallic inclusion separation in a continuous casting tundish. Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications, Prof. Igor Minin (Ed.), ISBN: 978-953-307-169-5, InTech. – 2011.
4. Cwudzinski A. Numerical simulation of influence of changing a dam height on liquid steel flow and behaviour of non-metallic inclusions in the tundish, ed. I. V. Minin, O. V. Minin, IntechOpen, – 2011. DOI: 10.5772/23699
5. Огурцов А. П., Самохвалов С. Є. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах / Київ : Наукова думка. — 2001. — 409 с.

#### REFERENCES

1. Mazumdar D., Singh P. K., Tiwari R. K. Shrouded transfer of molten steel from ladle to tundish: current understanding, mathematical modelling and new insight // ISIJ International, Vol. 58 (2018), No. 8, pp. 1545–1547.
2. He F., Wang H., Zhu Zh. Numerical investigation of effect of casting speed on flow characteristics of molten steel in multistrand tundish // ISIJ International, Vol. 59 (2019), No. 7, pp. 1250–1258.

3. Warzecha M. Numerical modelling of non-metallic inclusion separation in a continuous casting tundish. Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications, Prof. Igor Minin (Ed.), ISBN: 978-953-307-169-5, InTech. – 2011.
4. Cwudzinski A. Numerical simulation of influence of changing a dam height on liquid steel flow and behaviour of non-metallic inclusions in the tundish, ed. I. V. Minin, O. V. Minin, IntechOpen, – 2011. DOI: 10.5772/23699
5. Ogurtsov A.P., Samokhvalov S.E. Mathematical modeling thermophysical processes in multiphase mediums / Kyiv: Naukova dumka. – 2001. – 409 p.

Received 15.01.2020.

Accepted 21.01.2020.

UDC 669.1:004.942:532.54

K.S. Krasnikov

### **MATHEMATICAL MODELING OF THE DISTRIBUTION OF ARGON IN A TUNDISH WITH A MOLTEN METAL DURING FILLING**

The article is devoted to the mathematical description of the process of filling an intermediate ladle (tundish) with argon, which is blown into the melt stream falling from the steel casting ladle, which is common at metallurgical plants. Metallurgical plants use an intermediate ladle to reliably supply a continuous casting machine for the melt. Also important for the tundish is the removal of non-metallic inclusions using argon. The good distribution of argon bubbles in the tundish significantly influences the removal of unwanted melt components such as hydrogen and nitrogen. Given the need for gas to escape, the melt speed in the intermediate ladle should be sufficiently low, especially near outflow holes, where melt needs to be homogeneous and slow for a high-quality casting. Conducting experiments during the operation of a metallurgical plant is undesirable, costly and is accompanied by difficulties associated with high temperature and opacity of the melt. Therefore, the experiments are often carried out in laboratories on the so-called cold models, where the melt is replaced by water, argon – by air, and the tundish – by the transparent container of the rectangular shape under the conditions of similarity. Despite the obvious advantages of such cold modeling, today most experiments are still conducted on mathematical models, which are a much cheaper and low-erroneous way of predicting the development of a given process under different conditions. Mathematical modeling of melt motion helps to select the optimal geometry of the tundish, as well as the required amount of argon and usefulness of barriers on a way of melt streams. The article proposes to use the convection-diffusion equation for the argon field and the Navier-Stokes equations – for the velocity field. The numerical solution using finite volume method is well tested and provides sufficient accuracy. In addition, this method is easily parallelized to speed up computing on modern multi-core processors. A graphical

user interface software application allows you to display the status of the system on the screen for further review and adoption decisions.

**Keywords:** intermediate ladle, argon melt blowing, solid multilayer medium, convection-diffusion equation, Navier-Stokes equations.

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

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

*Krasnikov Kyrylo Serhiiiovych* – PhD, senior lecturer at systems software department of Dniprovskiyi state technical university