

УДК 669.23. 45.81

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-24>

ФЛОТАЦІЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ПІД ЧАС ПРОДУВАННЯ РІДКОЇ СТАЛІ АРГОНОМ

Єфімова Вероніка Гаріївна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри фізичної хімії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

доцент кафедри природничо-наукових

та загальноінженерних дисциплін

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-2372-8398

Скоробагатько Юлія Петрівна,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Фізико-технологічного інституту металів та сплавів

Національної академії наук України

ORCID ID: 0000-0002-1724-9895

У роботі показано, що в процесі розливання сталі через проміжні ковші МБРЗ застосовується продування металу інертним газом через продувальні пристрої різної конструкції. Висвітлено, що натеper проміжний ківш є останньою металургійною ємністю, де можна впливати на якість готової продукції в процесі безперервного розливання. З'ясовано, що в проміжному ковші на останньому етапі розливання можливо керувати такими параметрами, як масоперенос, рафінування, що буде забезпечувати стабільність розливання, а також покращення якості готової продукції шляхом видалення неметалевих включень різного розміру.

Показано, що застосування продувки інертним газом покращує характеристики потоків металу, знижує кількість застійних зон та є гасником турбулентності.

У роботі розглянуто теоретичні аспекти видалення неметалевих включень за допомогою газових пазурів інертного газу.

Представлено механізм процесу флотації інертним газом, який складається з таких етапів, як підхід пазури до включення, формування тонкої плівки рідкого металу між включенням та пазуром, ковзання включення на поверхні пазури, дренаж і розрив плівки металу з формуванням стійкого контакту трьох фаз: включення – пазур – розплав сталі, стабілізація агрегату пазур – включення, флотація агрегату включення – пазур.

Проведено детальний аналіз прикріплення включень до пазурів аргону. Показано, що спочатку відбувається потоншення рідкої плівки металу на поверхні пазури до критичних розмірів, за яких плівка розривається та формується ядро контакту із трьох фаз, з утворенням критичного радіусу змочування, а після відбувається розтяг лінії контакту трьох фаз із критичного радіусу до стабільного периметра змочування.

З'ясовано, що механізм прикріплення включень залежить від часових параметрів, до яких відноситься час зіткнення, час ковзання, час дренажування, час розширення і час індукції. Проведені теоретичні розрахунки показали, що ймовірність прикріплення включень до газового пазури залежить від розміру останнього. Показано, що найбільша ймовірність прикріплення спостерігається, якщо діаметр пазурів буде становити 1 та 3,25 мм.

З метою підтвердження теоретичних розрахунків було проведено фізичне моделювання гідродинамічних процесів у проміжному ковші в процесі його продування інертним газом. З'ясовано, що максимальний рафінувальний ефект досягається в разі використання продувки аргоном у поєднанні з реакційною камерою.

Ключові слова: неметалеві включення, проміжний ківш, продування аргоном, фізичне моделювання.

Yefimova Veronika, Skorobagatko Yuliya. Flotation of non-metallic inclusions during purge of liquid steel with argon

The paper shows that in the process of pouring steel through the intermediate ladles of the MBRZ, inert gas blowing is used through blowing devices of various designs. It is highlighted that today the intermediate ladle is the last metallurgical container where it is possible to influence the quality of the finished product in the process of continuous pouring. It is found that in the intermediate ladle at the last stage of pouring it is possible to control such parameters as mass transfer, refining, which will ensure the stability of pouring, as well as improving the quality of the finished product by removing non-metallic inclusions of various sizes.

It is indicative that the use of inert gas blowing will improve the characteristics of metal flows, reduce the number of stagnant zones and is a turbulence damper.

The paper considers theoretical aspects of removing non-metallic inclusions using inert gas bubbles.

The mechanism of the inert gas flotation process is presented, which consists of such stages as the approach of the bubble to the inclusion, the formation of a thin film of liquid metal between the inclusion and the bubble, the sliding of the inclusion on the surface of the bubble, drainage and rupture of the metal film with the formation of a stable contact of three phases, inclusion – bubble – molten steel, stabilization of the bubble – inclusion unit, flotation of the inclusion – bubble unit.

A detailed analysis of the attachment of inclusions to argon bubbles is carried out. It is shown that first there is a thinning of the liquid metal film on the surface of the bubble to critical dimensions, at which the film is torn and the core of the contact of 3 phases is formed, with the formation of a critical wetting radius, and then there is a stretching of the contact line of three phases from the critical radius to a stable wetting perimeter.

It was found that the mechanism of attachment of inclusions depends on the time parameters, which include the collision time, sliding time, drainage time, expansion time and induction time.

Theoretical calculations have shown that the probability of attachment of inclusions to a gas bubble depends on the size of the latter. It is shown that the highest probability of attachment will be observed if the diameter of the bubbles is 1 and 3.25 mm.

In order to confirm the theoretical calculations, physical modeling of hydrodynamic processes in the tundish during its purging with an inert gas was carried out. It was found that the maximum refining effect is achieved when using argon purging in combination with a reaction chamber.

Keywords: non-metallic inclusions, tundish, argon purging, physical modeling.

Вступ. Нині універсальним металургійним агрегатом безперервної дії на технологічній лінії МБРЗ є проміжний ківш, призначений для додаткового рафінування сталі, усереднення хімічного складу та температури металу. Його конструкція, а також конструкція окремих елементів визначають параметри течії сталі. Це дозволяє керувати процесами тепло- та масо-переносу в проміжному ковші, що забезпечує стабільність технологічного процесу розливання, значно знижує вміст неметалевих включень і підвищує якість литої заготовки [1–4].

Відомо, що продування інертним газом у проміжному ковші покращує характеристики потоку і є гасником турбулентності, що своєю чергою призводить до зменшення застійних зон та збільшення резидентного часу [5].

Однак натеper відсутня фундаментальна теорія процесу флотації бульбашок із розплаву сталі бульбашками аргону. Тому метою роботи є визначення механізму взаємодії між пузирем аргону і включенням, що найкраще буде сприяти рафінуванню сталі.

Методи та методики дослідження.

Завданнями наших досліджень було:

- 1) проведення теоретичного аналізу процесів рафінування неметалевих включень під час продування інертним газом;
- 2) розрахунок імовірності прикріплення, зіткнення та адгезії;
- 3) перевірка теоретичного аналізу та математичних розрахунків на холодній моделі проміжного ковша.

Механізм флотації неметалевих включень пузирями аргону з рідкої сталі складається з таких етапів:

- 1) підхід пузиря до включення;
- 2) формування тонкої плівки рідкого металу між включенням та пузирем;
- 3) ковзання включення на поверхні пузиря;
- 4) дренаж та розрив плівки металу з формуванням стійкого контакту трьох фаз: включення – пузир – розплав сталі;
- 5) стабілізація агрегату пузир – включення;
- 6) флотація агрегату включення – пузир.

У роботі [6] було проведено детальний аналіз прикріплення включень до пузиря, який показав, що успішність прикріплення залежить від таких стадій, як:

- 1) потоншення рідкої плівки металу на поверхні пузиря до критичних розмірів, за яких плівка розривається;
- 2) розрив плівки та формування ядра контакту трьох фаз, з утворенням критичного радіусу змочування;
- 3) розтяг лінії контакту трьох фаз із критичного радіусу до стабільного периметра змочування.

Цей механізм залежить від часових параметрів, як-от:

- τ_c – час зіткнення, який необхідний для зіткнення пузиря з включенням;
- τ_s – час ковзання, що необхідне включенню для ковзання вздовж поверхні пузиря;
- τ_d – час дренажу, що необхідний для формування рідкої плівки, товщиною, критичних розмірів, між пузирем газу і частинкою включення;
- $\tau_{КТФ}$ – час розширення, що необхідний для розтягування рідкої плівки з утворенням критичного радіусу змочування та його стабілізації;
- $\tau_{и}$ – час індукції, що необхідний для розриву плівки між пузирем і включенням і формування агрегату пузир – включення.

Головну роль у процесі флотації включень відіграють такі тимчасові параметри, як τ_c , τ_s і τ_{II} .

З даних роботи [7] відомо, що якщо:

$\tau_c > \tau_{II}$ – включення прикріплюються до пузиря за допомогою зіткнення;

$\tau_c < \tau_{II}$ – включення відскакує від пузиря і ковзає по його поверхні;

$\tau_s > \tau_{II}$ – адгезія включення здійснюється в процесі ковзання;

$\tau_s < \tau_{II}$ – включення прослизає й адгезія не відбувається.

Якщо траєкторії пузиря та включення збігаються, то відбувається зіткнення, за якого поверхня пузиря деформується з виникненням розрядження, що супроводжується осциляцією розплаву на його поверхні. Час зіткнення включає деформацію пузиря включенням із подальшим відновленням його форми. За даними роботи [7], воно виражається як:

$$\tau_c = \left(\frac{\pi^2 \rho_b}{12 \sigma_{cmali}} \right)^{\frac{1}{2}} d_b^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

де ρ_b – густина включень, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

σ_{cmali} – поверхневий натяг розплаву заліза, який становить $1,6 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$;

d_b – діаметр включень, мкм.

Однак деякі частинки не прикріплюються до поверхні пузиря в процесі зіткнення, а починають ковзати вздовж поверхні. У процесі ковзання включення плівка металу на поверхні пузиря розривається і частка прикріплюється до його поверхні. За даними робіт [8; 9], час ковзання можна подати як:

$$\tau_s = \frac{(d_b + d_n)}{2U_n(1 - B^2)A} \times \ln \left\{ \frac{\tan \frac{\theta_c}{2} \left(\operatorname{cosec} \theta_c + B \cot \theta_c \right)^B}{\tan \frac{\theta_0}{2} \left(\operatorname{cosec} \theta_0 + B \cot \theta_0 \right)^B} \right\}, \quad (2)$$

де d_n – розмір пузиря, м, що знаходять зі спів-

відношення $d_n = \left(\frac{6,828}{\pi} \cdot Q_g \cdot g^{-0,6} \right)^{\frac{1}{3}}$,

Q_g витрати газу, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$,

g – прискорення сили тяжіння, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$;

U_n – рівноважна швидкість спливання пузиря, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

B – константа, що знайдена експериментально та дорівнює 15 [3];

A – константа, що враховує дисперсійну взаємодію між молекулами макроскопічних фаз та становить $1,7 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$;

θ_0 – кут, за якого частинка неметалевого включення починає ковзати вздовж поверхні пузиря, для металургійних систем становить 20° ;

θ_c – кут, за межами якого не відбуваються зіткнення, він становить 60° .

Період, коли плівка металу в процесі розриву між пливком і включенням починає стікати і відбувається утворення стабільної лінії контакту трьох фаз, характеризується часом індукції τ_{II} [6]:

$$\tau_{II} = \frac{(d_b + d_n)}{2U_n(1 - B^2)A} \times \ln \left\{ \frac{\frac{1}{\sqrt{P_{np}}} + \sqrt{\frac{1}{P_{np} + D^2 - 1}}}{\left(\frac{1}{\sqrt{P_{np}}} + B \sqrt{\frac{1}{P_{np} + D^2 - 1}} \right)^B} \cdot \frac{(1 + BD)^B}{1 + D}} \right\}, \quad (3)$$

де P_{np} – ймовірність прикріплення неметалевого включення до пузиря, що визначається рівнянням:

$$P_{np} = \frac{2U_n D}{9(U_b + U_n)Y} \left(\frac{d_b}{d_n} \right) \times \left[\sqrt{(X + C)^2 + 3Y^2} + 2(X + C) \right]^2, \quad (4)$$

де U_b – швидкість спливання включення, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

X , Y , C , D – параметри без одиниць виміру, що визначаються з таких рівнянь:

$$X = \frac{3}{2} + \frac{9\text{Re}_n}{32 + 9,888\text{Re}_n^{0,694}}; \quad Y = \frac{3\text{Re}_n}{8 + 1,736\text{Re}_n^{0,694}};$$

$$C = \frac{U_b}{U_n} \left(\frac{d_n}{d_b} \right)^2; \quad D = \frac{\sqrt{(X + C)^2 + 3Y^2} - (X + C)}{3Y}.$$

Оскільки прикріплення включення до пузиря здійснюється шляхом зіткнення або ковзання, нами були проведені розрахунки основних часових параметрів для визначення оптимальних умов продування. Дані розрахунків подано на рис. 1.

При цьому рівноважна швидкість підйому газових бульбашок розраховувалася як:

$$U_n = \left[2,14 \frac{\sigma_{cm}}{\rho_{cm}} + 0,505gd_n \right]^{\frac{1}{2}} - \text{для } > 1,3 \text{ мм} \quad (5)$$

$$U_n = 0,138g^{0,82} \left(\frac{\rho_{cm}}{\eta_{cm}} \right)^{0,639} d_b^{1,459} - \text{для } < 1,3 \text{ мм}$$

Розрахунки, що проведені з використанням рівняння 10, надано в таблиці 1.

Аналіз рис. 1 свідчить, що адгезія включень у діапазоні від 1 до 100 мкм на пузирях

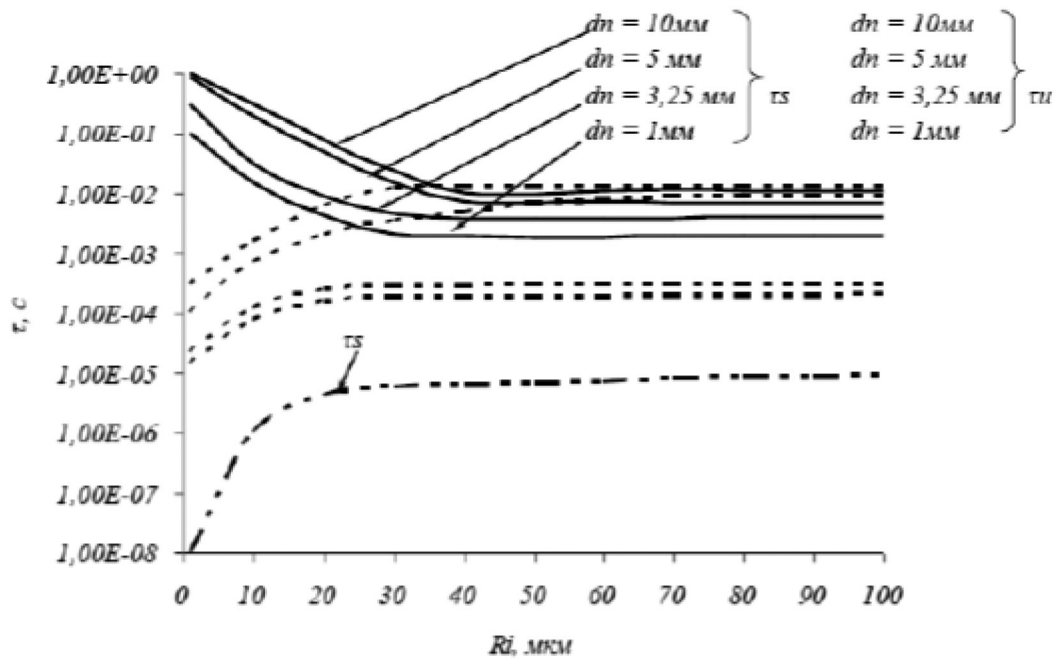


Рис. 1. Залежність часових параметрів від розмірів включень, що флотуються пузирями інертного газу

Таблиця 1
Рівноважна швидкість спливання пузиря

d_n , мм	U_n , м · с ⁻¹
1	0,2
3,25	0,408
5	0,35
10	0,31

діаметром 1 та 3,25 мм відбувається шляхом ковзання, оскільки $\tau_c < \tau_u$. При цьому якщо діаметр пузиря становить 5 мм, то включення діаметром більш 60 мкм прикріплюватись не будуть. Для пузирів діаметром 1 мм та $d_n = 3,25$ мм прикріплення включень до пузиря відбувається ковзанням, $\tau_s > \tau_u$, що свідчить про те, що зустріч пузиря з включенням будь-якого розміру буде закінчуватись прикріпленням.

При цьому якщо $d_n = 5$ мм, то до нього будуть прикріплюватись включення розміром до 65 мкм, якщо $d_n = 10$ мм – до 38 мкм.

Загалом, імовірність адгезії включення на пузирі можна визначити за допомогою рівняння [7]:

$$P_{ад.} = P_{пр.} \cdot P_{см.} (1 - P_{ом.}), \quad (6)$$

де $P_{ом.}$ – ймовірність відділення включення від пузиря, в нашому випадку $P_{ом.} = 0$;

$P_{см.}$ – ймовірність зіткнення, що визначається як:

$$P_{см.} = \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left(-\frac{2\tau_{см.}}{d_n - d_s} Z \right) \right]. \quad (7)$$

У цьому рівнянні $\tau_{см.}$ являє собою час стоку плівок металу в процесі прикріплення частинки та пузиря та визначається як [8]:

$$\tau_{см.} = \frac{3}{64} \eta_{стали} \frac{\alpha^2}{k \sigma_{стали} h_{кр.}^2} d_s^3, \quad (8)$$

де $\eta_{стали}$ – в'язкість сталі, $7 \cdot 10^{-3}$ кг · м⁻¹ · с⁻¹;

α – кут переходу сферичної поверхні пузиря до деформованого стану. За даними роботи [4], $\alpha \approx 12-22^\circ$;

k – константа, що у випадку пузиря, який рухається, становить 4;

$h_{кр.}$ – критична товщина плівки металу на поверхні пузиря в момент прикріплення включення, що за даними роботи [1] становить 0,015–452 нм. У рівнянні (7) безрозмірний параметр Z визначається як [8]:

$$Z = \left\{ \left[\left[\frac{1 - \frac{3}{4x_E} - \frac{1}{4x_E^3} + \frac{Re_n^{0,72}}{15} \left(-\frac{2}{x_E^4} + \frac{1}{x_E^3} + \frac{1}{x_E} \right) \right] U_n - U_s \right] \right\}, \quad (9)$$

де $x_E = 1 + k_2$, $k_2 = \frac{d_s}{d_n}$.

Для визначення ймовірності адгезії включень на пузирі, а отже, й ефективності флотації неметалевих включень нами були проведені розрахунки ймовірностей прикріплення, зіткнення та адгезії з використанням рівнянь (4), (7) та (6). Дані розрахунків наведено на рис. 2, 3 та 4.

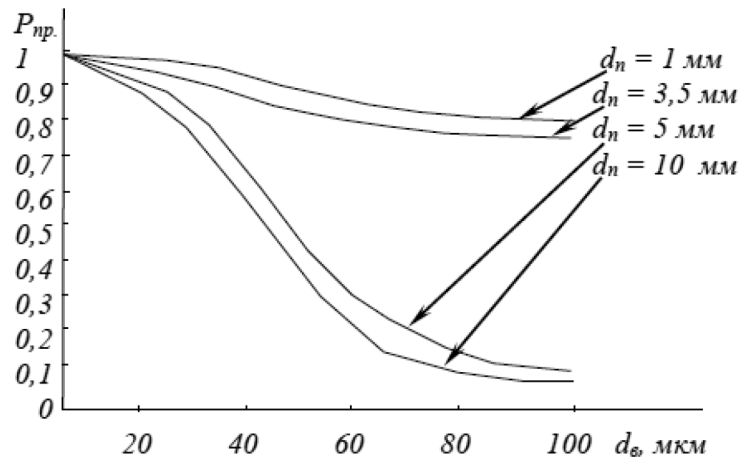


Рис. 2. Вірогідність прикріплення

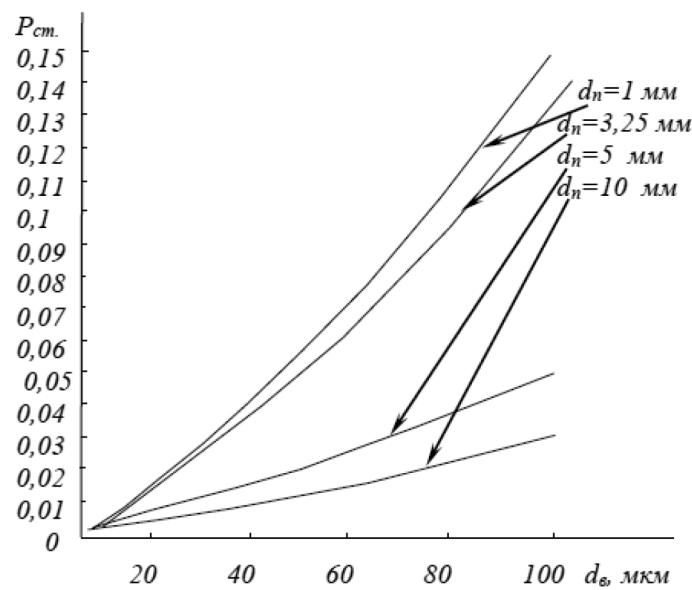


Рис. 3. Вірогідність зіткнення

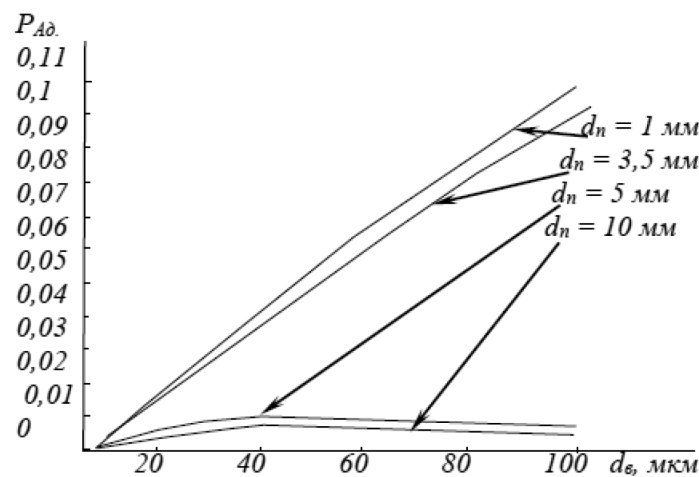


Рис. 4. Вірогідність адгезії

Як видно з розрахункових даних, ймовірність прикріплення є функцією розміру пузиря. За $d_б < 10$ мкм ймовірність прикріплення залежить від розміру пузиря. З іншого боку, якщо

$d_б > 10$ мкм, то розмір пузиря в процесі прикріплення відіграє головну роль. Дані рис. 2 свідчать, що для пупирів діаметром 1 та 3,25 мм ймовірність прикріплення буде найбільшою. Ці

Таблиця 2

**Оцінювання ефективності видалення неметалевих включень із проміжного ковша
за різних варіантів організації руху циркуляційних потоків**

№ з/п	Конструкційні особливості проміжного ковша				Доля речовини, що видаляється в шлак, %
	Перегородка	Перегородка в поєднанні з продуванням	Реакційна камера	Реакційна камера в поєднанні з продуванням	
1	•	–	–	–	60–65
2	•	•	–	–	75–80
3	–	–	•	–	78–82
4	–	–	•	•	84–89

результати добре узгоджуються з даними робіт [6; 7]. При цьому дані рис. 3 показують, що ймовірність зіткнення слабо залежить від розміру пузиря та включення. Своєю чергою розрахунки показали низьке значення ймовірності адгезії включення на пузирі, рис. 4.

Для підтвердження теоретичних розрахунків нами було проведено фізичне моделювання процесів продування металу через протяжну багатоканальну фурму у ванні проміжного ковша. Методу моделювання представлено в роботі [9].

На цьому етапі досліджень на фізичній моделі було виконано порівняння ефективності різних конструкційних прийомів на рафінування металу в промковші. Для цього в захисну трубу вводилося 200 г субстанції для забруднення стали неметалевими включеннями. Потім рідина, яка витікала з проміжного ковша, збиралася в спеціальній ємності, відстоювалася протягом кількох годин, і речовина, що імітує неметалеві включення, та зважувалася. Кожен експеримент повторювався тричі. Ефективність відділення включень визначалася за такою формулою:

$$E = \frac{M - m}{M} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

де M – маса речовини, яка вводиться в захисну трубу, що імітує неметалеві включення, г;
 m – маса речовини, що спливла на поверхню рідини проміжного ковша, г.

Узагальнення отриманих експериментальних результатів (табл. 2) дозволяє акцентувати увагу на тому факті, що застосування реакційної камери по сукупності ефектів, що досягаються, може розглядатися як досить ефективний технологічний прийом для забезпечення флотації неметалевих включень.

Висновки. У результаті проведених досліджень:

- 1) виконано аналіз та теоретичні розрахунки видалення неметалевих включень у разі продування металу інертним газом;
- 2) з використанням фізичного моделювання встановлено, що максимальний рафінувальний ефект досягається за допомогою продувки аргонном у поєднанні з реакційною камерою.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Merder T., Pieprzyca J., Wender R., Witek S. Model studies of metallurgical processes based on the example of blowing steel with argon. *Archives of Foundry Engineering*. 2024. Vol. 4. p. 142–152.
2. Javurek M., Brummayer M. & Winico R. Turbulent flow measurements in continuous steel casting mold water model. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62(5). p. 2581–2586.
3. Morales R. D., Calderón-Hurtado F. A., Chattopadhyay K. & Guarneros S. J. Physical and mathematical modeling of flow structures of liquid steel in ladle stirring operations. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020. Vol.51(2). p. 628–648.
4. Yang F. Jin, Y. Zhu, Ch., Dong, X. Lin, P. Physical simulation of molten steel homogenization and slag entrapment in argon blown ladle. *Processes*. 2019. Vol.7(8). p. 1–15.
5. Pieprzyca J., Merder T. Modified Froude criterion in modeling two-phase flows in a steel ladle. *Metallurgija*. 2022. Vol. 61(1). p. 145–148.
6. Li L., Li, M. Shao, L. Li, Q. & Zou, Z. Physical and mathematical modeling of swirling gas jets impinging on a liquid bath using a novel nozzles-twisted lance. *Steel Research International*. 2020. Vol. 91(7). p. 207–250.
7. Sun M., Zhang H., Zhang J. & Wang, B. Research on mixing behavior in a combined top–bottom–side blown iron bath gasifier. *Processes*. 2022. Vol. 10(5). p. 67–81.
8. Wang R., Zhang B., Hu C., Liu C. & Jiang, M. Physical modeling of slag foaming in combined top and bottom blowing converter. *JOM*. 2022. Vol. 74(1). p. 151–158.
9. Yefimova V., Pilipenko T. Physical-chemical regularities of steel refining from non-metallic inclusions. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2019. № 1(89). С. 72–79.

REFERENCES:

1. Merder, T., Pieprzyca, J., Wender, R., & Witek, S. (2024). Model studies of metallurgical processes based on the example of blowing steel with argon. *Archives of Foundry Engineering*. Vol. 4. p. 142–152.
2. Javurek, M., Brummayer, M. & Winico, R. (2022). Turbulent flow measurements in continuous steel casting mold water model. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 62(5). p. 2581–2586.
3. Morales, R. D., Calderón-Hurtado, F. A., Chattopadhyay, K. & Guarneros, S. J. (2020). Physical and mathematical modeling of flow structures of liquid steel in ladle stirring operations. *Metallurgical and Materials Transactions B*. Vol.51(2). p. 628–648.
4. Yang, F., Jin, Y., Zhu, Ch., Dong, X., & Lin, P. (2019). Physical simulation of molten steel homogenization and slag entrapment in argon blown ladle. *Processes*. Vol.7(8). p. 1–15.
5. Pieprzyca, J., & Merder, T. (2022). Modified Froude criterion in modeling two-phase flows in a steel ladle. *Metalurgija*. Vol. 61(1). p. 145–148.
6. Li, L., Li, M., Shao, L., Li, Q., & Zou, Z. (2020). Physical and mathematical modeling of swirling gas jets impinging on a liquid bath using a novel nozzles-twisted lance. *Steel Research International*. Vol. 91(7). p. 207–250.
7. Sun, M., Zhang, H., Zhang, J., & Wang, B. (2022). Research on mixing behavior in a combined top–bottom–side blown iron bath gasifier. *Processes*. 2022. Vol. 10(5). p. 67–81.
8. Wang, R., Zhang, B., Hu, C., Liu, C., & Jiang, M. (2022). Physical modeling of slag foaming in combined top and bottom blowing converter. *JOM*. Vol. 74(1). p. 151–158.
9. Yefimova, V., & Pilipenko, T. (2019). Physical-chemical regularities of steel refining from non-metallic inclusions. *Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. № 1(89). P. 72–79.