

DOI: 10.31319/2519-8106.1(54)2026.350844

UDC 669.18: 536.001.5

Voloshin Ruslan, Lecturer in Computer Science at the Separate Structural Subdivision, Technical and Economic Specialist College of Dniprovsk State Technical University, senior lecturer
Волошин Р.В., Викладач інформатики Відокремленого структурного підрозділу «Техніко-економічний фаховий коледж Дніпровського державного технічного університету», старший викладач
ORCID: 0009-0002-0567-8630
e-mail: volosinruslan4276@gmail.com

Dniprovsk State Technical University, Kamianske
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

MATHEMATICAL MODEL OF THE MELTING OF A SPHERICAL DEOXIDIZER AT THE SLAG-METAL INTERFACE

МОДЕЛЬ ПЛАВЛЕННЯ РОЗКИСЛЮВАЧА СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ НА МЕЖІ ШЛАК-МЕТАЛ

Industrial metallurgical technology for off-furnace deoxidation and adjustment of the chemical composition of steel by introducing lump materials of various chemical and granulometric compositions into molten steel in a steel casting ladle has become widespread in Ukraine and neighboring countries.

This technology is a resource-saving method for off-furnace steel refining and processing. Its purpose is to determine optimal modes for introducing lump materials into the melt during steel tapping or blowing in industrial furnace and furnace-ladle units. It should be noted that the introduction of such additives is accompanied by their flotation into the slag layer on the surface, which in turn leads to inefficient utilization of deoxidizing materials such as aluminum and ferrotitanium.

The aim of this work is to develop a mathematical model describing the melting of a spherical deoxidizer at the slag-metal interface.

Keywords: *mathematical melting model, spherical deoxidizer, steel casting ladle, slag-metal interface, heat balance equation.*

В Україні та країнах ближнього зарубіжжя поширилася промислова металургійна технологія позапічного розкислення та доведення хімічного складу сталі шляхом введення кускових матеріалів різного хімічного та гранулометричного складу в рідку сталь у сталерозливний ковш.

Така технологія є ресурсозберігаючою технологією позапічного доведення та обробки сталі Її завданням є вибір оптимальних режимів введення кускових матеріалів у розплав при випуску або продуванні сталі в промислових агрегатах піч і піч-ковш. Відзначимо, що введення таких добавок супроводжується їх винесенням в шлаковий шар на поверхню, що в свою чергу призводить до неефективного використання матеріалів - розкислювачів (алюмінію, феротитану).

Для вирішення задачі плавлення кускового матеріалу сферичної форми, було запропоновано використовувати метод Дюзімбера. Метод застосовується для опису процесу плавлення (або затвердіння), коли необхідно враховувати рух межі розділу фаз (тверде тіло-розплав). Метод дозволяє звести складну систему диференціальних рівнянь в часткових похідних до більш простих інтегральних співвідношень або аналітичних виразів. Це спрощує розрахунок часу повного розплавлення розкислювача сферичної форми.

Як показав аналіз робіт представлених автором раніше цей метод підходить для вирішення таких теплофізичних задач, і на даний час є актуальним. У роботі прийнято що процес плавлення розкислювача сферичної форми в промислових агрегатах проходить на межі шлак-метал. Це ускладнює засвоєння матеріалу розкислювача в розплав металу, але це є реальною картиною у технології позапічного доведення хімічного складу сталі.

Метою роботи є розробка математичної моделі плавлення розкислювача сферичної форми на межі шлак-метал з використанням методу Дюзімбера.

Ключові слова: математична модель плавлення, розкислювач сферичної форми, сталепроливний ковш, шлак-метал, рівняння теплового балансу.

Problem's Formulation

The kinetics of the melting process of lump additives with different particle size distributions at the slag-metal interface in a steel casting ladle have been investigated in [1, 2]; however, these studies considered cylindrical materials. The physical mechanisms governing the melting of cylindrical and spherical materials differ.

This paper examines the case in which a refractory spherical additive is partially immersed in molten steel and partially in molten slag. Based on these initial conditions, an algorithm was developed to solve a two-dimensional melting problem for refractory spherical materials using the Duzimber finite-difference method [2].

Analysis of recent research and publications

After analyzing the problems of metal deoxidation in industrial ladle-furnace units and building on the author's previous studies, a decision was made to develop a mathematical model describing the melting of a spherical additive at the slag-metal interface. The Duzimber finite-difference method, as presented in [2], was adopted as the basis for this research. An analysis of earlier studies and publications in this field demonstrated the necessity of developing such a mathematical model for the further investigation of melting processes of additives with various shapes in ladle-furnace units.

Formulation of the study purpose

Let us consider the process of melting a spherical additive made of refractory material at the slag-metal interface. We assume that the temperatures of the molten metal t_p and molten slag t_{sh} are higher than the melting temperature t_{pl} of the sphere. Conditions on the upper surface of the sphere located in the slag melt ($0 < \vartheta < \vartheta_0$): convective heat exchange with molten slag occurs with a given heat transfer coefficient α_{sh} . On the rest of the sphere's surface ($\vartheta_0 < \vartheta < \pi$), convective heat transfer occurs with molten metal with a given heat transfer coefficient α_m . There is ideal thermal contact between the frozen metal shell, slag, and the sphere's surface, with given boundary conditions of the fourth kind [3, 4].

Presenting main material

The temperature distribution in the sphere is described by a two-dimensional heat conduction equation:

$$c\rho \frac{\partial T(r, \vartheta, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\lambda}{r \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[\frac{1}{r} \sin \vartheta \frac{\partial T}{\partial \vartheta} \right], \quad (1)$$

$$0 < r < R_0, 0 < \vartheta < \pi,$$

where c — is the heat capacity, ρ — is the density, and λ — is the thermal conductivity of the sphere material, which do not depend on temperature. The equation for temperature distribution in a solid metal shell is as follows:

$$C_m \rho_m \frac{\partial T_m(r, \vartheta, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_m}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial T_m}{\partial r} \right] + \frac{\lambda_m}{r \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[\frac{1}{r} \sin \vartheta \frac{\partial T_m}{\partial \vartheta} \right]. \quad (2)$$

$$r > R_0, (\vartheta_0 < \vartheta < \pi),$$

Then point P_m will be located at the melting or freezing point of the solidified metal shell, and the condition for the movement of the melting or freezing point will be as follows:

$$\alpha_m (t_m(r, \vartheta, \tau) - t_{pl}^m) - \lambda \frac{\partial t_m(P_m)}{\partial \bar{n}} = -\rho_m Q_m W(P_m); t_m(P_m) = t_{pl}^m. \quad (3)$$

The temperature distribution equation in the solidified slag shell will be as follows:

$$C_{sh} \rho_{sh} \frac{\partial T_{sh}(r, \vartheta, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{sh}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial T_{sh}}{\partial r} \right] + \frac{\lambda_{sh}}{r \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[\frac{1}{r} \sin \vartheta \frac{\partial T_{sh}}{\partial \vartheta} \right], \quad (4)$$

$$r > R_0, (0 < \vartheta < \vartheta_0).$$

Point P_{sh} belongs to the melting or freezing boundary of the solidified slag shell, then the condition for the movement of the melting or freezing boundary is represented as:

$$\alpha_{sh} \left(t_{sh}(r, \vartheta, \tau) - t_{pl}^{sh} \right) - \lambda \frac{\partial t_{sh}(P_{sh})}{\partial \bar{n}} = -\rho_{sh} Q_{sh} W(P_{sh}); t_{sh}(P_{sh}) = t_{pl}^{sh}. \quad (5)$$

As an initial condition, we choose the temperature distribution in the sphere when it rises to the surface of the metal-slag. Let us consider the calculation algorithm, where the control volume method is used to derive the heat balance equations, and a coordinate grid is formed to solve the melting problem.

We divide the volume of half of the sphere into control volumes, whose coordinates are (i, j) , and we will find the temperature at the centers of the resulting volumes. M_0 is the specified number of nodes along the radius of the sphere, N_0 is the specified number of sectors along the angle θ of the sphere. The proposed calculation algorithm uses an explicit finite-difference scheme, creating temperature matrices $t_{i,j}^n$ for (n) and $t_{i,j}^{n+1}$ for $(n+1)$ time layers, and matrices of thermophysical parameters of density $\rho_{i,j}^n$, thermal conductivity $\lambda_{i,j}^n$ and heat capacity $c_{i,j}^n$. In this matrix, the values of the parameters of the sphere material, solidified metal, and solidified slag are entered for each time layer, respectively. The step along the radius (coordinate i) is determined by the $\Delta r = R_0 / (M_0 - 1/2)$, and the step along the angle θ (coordinate j) is determined by the formula $\Delta \theta = \pi / N_0$.

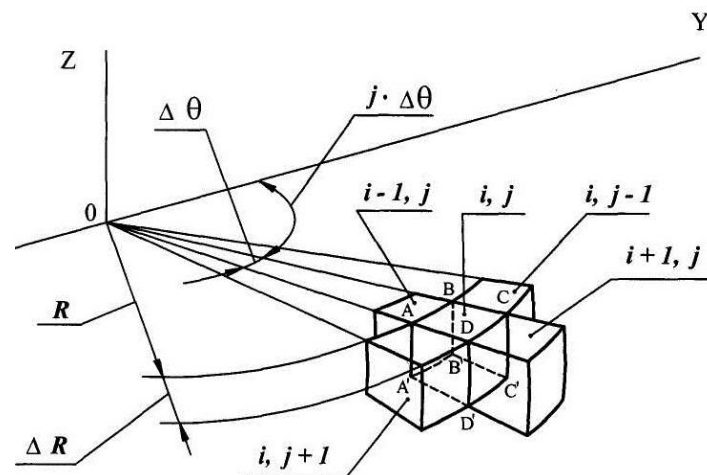


Fig. 1. Internal control volumes of the sphere $1 < i < M_0, 1 < j < N_0$

Next, we derive the heat balance equation for the obtained internal control volumes. In this case, the vertices of the sphere sector, as shown in Fig. 1, have the following coordinates:

$$A(R, \varphi, \theta), B(R, \varphi, \theta + d\theta), C(R + dR, \varphi, \theta + d\theta), D(R + dR, \varphi, \theta), A_1(R, \varphi + d\varphi, \theta),$$

$$B_1(R, \varphi + d\varphi, \theta + d\theta), C_1(R + dR, \varphi + d\varphi, \theta + d\theta), D_1(R + dR, \varphi + d\varphi, \theta).$$

To derive the heat balance equations, it is also necessary to calculate the areas of the faces involved in heat exchange and the volume of the spherical sector with coordinates (i, j) .

Face area: ABA_1B_1 :

$$\begin{aligned} S_{ABA_1B_1} &= A \cdot A_1 \cdot AB = \left[\left(R - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \sin \theta \cdot \Delta \phi \right] \cdot \left(R_0 - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta \theta = \\ &= \left[\left(i \cdot \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \sin \theta \cdot \Delta \phi \right] \left(i \cdot \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta \theta = \left[\Delta r \left(i - \frac{1}{2} \right) \right]^2 \cdot \sin \theta \cdot \Delta \theta \cdot \Delta \phi. \end{aligned} \quad (5)$$

Face area: DC_1CD_1 :

$$\begin{aligned} S_{DCC_1D_1} &= DC \cdot DD_1 = \left[\left(R + \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \sin \theta \cdot \Delta \phi \right] \cdot \left(R + \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta \theta = \\ &= \left[\left(i \cdot \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \sin \theta \cdot \Delta \phi \right] \left(i \cdot \Delta r + \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta \theta = \left[\Delta r \left(i + \frac{1}{2} \right) \right]^2 \cdot \sin \theta \cdot \Delta \theta \cdot \Delta \phi. \end{aligned} \quad (6)$$

Face area: AA_1DD_1 :

$$\begin{aligned} S_{AA_1DD_1} &= AA_1 \cdot D_1D = \left[\left(R - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \sin \theta \cdot \Delta \phi \right] \cdot \Delta r = \\ &= \left[\left(i \cdot \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \sin \theta \cdot \Delta \phi \right] \cdot \Delta r = \left(i - \frac{1}{2} \right) \cdot \Delta r^2 \cdot \sin \theta \cdot \Delta \phi. \end{aligned} \quad (7)$$

Face area: BB_1CC_1 :

$$\begin{aligned} S_{BB_1CC_1} &= BB_1 \cdot BC = \left[\left(R - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \sin(\theta \cdot \Delta \theta) \cdot \Delta \phi \right] \cdot \Delta r = \\ &= \left[\left(i \cdot \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \sin(\theta \cdot \Delta \theta) \cdot \Delta \phi \right] \cdot \Delta r = \left(i - \frac{1}{2} \right) \cdot \Delta r^2 \cdot \sin(\theta \cdot \Delta \theta) \cdot \Delta \phi. \end{aligned} \quad (8)$$

Volume of the sector:

$$\Delta V = S_{ABA_1B_1} \cdot \Delta r = \left[\Delta r \left(i - \frac{1}{2} \right) \right]^2 \cdot \Delta r \cdot \sin \theta \cdot \Delta \theta \cdot \Delta \phi. \quad (9)$$

Based on this, we obtain the heat balance equation for internal control volumes:

$$\begin{aligned} \Delta v \cdot \rho_{i,j} \cdot c_{i,j} \frac{t_{i,j}^{n+1} - t_{i,j}^n}{\Delta \tau} &= S_{ABA_1B_1} \cdot \frac{2\lambda_{i,j} \cdot \lambda_{i-1,j}}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i-1,j}} \cdot \frac{t_{i-1,j}^n - t_{i,j}^n}{\Delta r} - \\ - S_{DCC_1D_1} \frac{2\lambda_{i,j} \cdot \lambda_{i+1,j}}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i+1,j}} \cdot \frac{t_{i,j}^n - t_{i+1,j}^n}{\Delta r} &+ S_{AA_1DD_1} \cdot \frac{2\lambda_{i,j-1} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j-1}} \cdot \frac{t_{i,j-1}^n - t_{i,j}^n}{\Delta \theta} - \\ - S_{BB_1CC_1} \frac{2\lambda_{i,j} \cdot \lambda_{i,j+1}}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}} \cdot \frac{t_{i,j}^n - t_{i,j+1}^n}{i \cdot \Delta r \cdot \Delta \theta}. \end{aligned} \quad (10)$$

Substituting the values of area and volume into the equation, we obtain the calculation formulas for unknown temperatures $t_{i,j}^{n+1}$:

$$\begin{aligned} t_{i,j}^{n+1} &= t_{i,j}^n + \frac{2 \cdot \Delta \tau}{\rho_{i,j} \cdot c_{i,j}} \left[\frac{\lambda_{i,j} \cdot \lambda_{i-1,j}}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i-1,j}} \cdot \frac{t_{i-1,j}^n - t_{i,j}^n}{\Delta r^2} - \left(\frac{i + \frac{1}{2}}{i - \frac{1}{2}} \right) \cdot \frac{\lambda_{i,j} \cdot \lambda_{i+1,j}}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i+1,j}} \cdot \frac{t_{i,j}^n - t_{i+1,j}^n}{\Delta r^2} + \right. \\ &\left. + \frac{1}{i - \frac{1}{2}} \cdot \frac{\lambda_{i,j} \cdot \lambda_{i,j-1}}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j-1}} \cdot \frac{t_{i,j-1}^n - t_{i,j}^n}{\Delta r^2 \cdot \Delta \theta^2} - \frac{\sin(\theta \cdot \Delta \theta)}{\left(i - \frac{1}{2} \right) \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\lambda_{i,j} \cdot \lambda_{i,j+1}}{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}} \cdot \frac{t_{i,j}^n - t_{i,j+1}^n}{\Delta r^2 \cdot \Delta \theta^2} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

For the remaining control volumes, the governing equations retain the same form. Let us derive the equations for the freezing and melting of metal and slag shells, and the melting of a sphere, using the Duzimber method. During the freezing and subsequent melting of the metal and slag shells

and the melting of the sphere, the temperature of the surface layer is assumed to be equal to the corresponding freezing or melting temperature. In the surface control volume with coordinates $M[i], j$, the process of freezing, melting of slag or metal melts, as well as melting of the sphere may occur. For this purpose, the excess temperature $t_u(j)$ is determined for each surface control volume [4–6].

Below are formulas for excess temperatures $t_u(j)$ for $1 \leq j \leq N_0$ freezing and melting of molten metal.

$$t_u[j] = t_{pl}^m + \frac{2 \cdot \Delta \tau}{\rho_{M[j],j} \cdot C_{M[j],j}} \left[\frac{\lambda_{M[j]-1,j} \cdot \lambda_{M[j],j} \cdot \frac{t_{M[j],j}^n - t_{pl}^m}{\Delta r^2} - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{M[j]} \right)^2 \cdot \alpha_M \frac{t_{pl}^m - t_{zh}}{\Delta r} + \right. \\ \left. + \frac{1}{M[j]} \cdot \frac{\lambda_{M[j],j} \cdot \lambda_{M[j],j-1}}{\lambda_{M[j],j} + \lambda_{M[j],j-1}} \cdot \frac{t_{M[j],j-1}^n - t_{pl}^m}{[M[j] \cdot \Delta r \cdot \Delta \theta]^2} - \frac{1}{M[j]} \cdot \frac{\lambda_{M[j],j} \cdot \lambda_{M[j],j+1}}{\lambda_{M[j],j} + \lambda_{M[j],j+1}} \cdot \frac{t_{pl}^m - t_{M[j],j+1}^n}{[M[j] \cdot \Delta r \cdot \Delta \theta]^2} \right]. \quad (12)$$

If the excess temperature value $t_u(j)$ is less than the melting temperature of the metal t_{nl}^m , then metal freezing occurs in the neighboring surface control volume with coordinates $M[i], j+1$, and on each calculated time layer, the difference between the excess temperature value and the melting temperature of the metal is t_{nl}^m summed in the counters. For this purpose, the array cd_{ij} is presented, at the beginning of the calculation all its elements are equal to 0. If after k_1 steps in time the value of cd_{ij} becomes greater than the ratio of the heat of phase transition in the metal to its heat capacity, then the temperature of the metal melt in the neighboring surface control volume $t_{M[j],j+1}^n$ is replaced by the melting point of the metal t_{pl}^m [3, 4].

When the excess temperature $t_u(j)$ value exceeds the melting point of the metal t_{pl}^m , the given surface control volume with coordinates $M[i], j$ melts. At each calculated time layer, the difference between the excess temperature value and the melting point of the metal t_{pl}^m is added up in the counters. After k_2 steps in time, the time value cd_{ij} becomes greater than the ratio of the heat of phase transition in the metal to its heat capacity, then the temperature $t_{M[j],j}^n$ in this control volume is replaced by the temperature of the molten metal t_{zh} . When the metal or slag shell melts, it is possible to calculate the heating of the sphere surface in a given control volume and then calculate the melting of the sphere [7].

Conclusions

Using the proposed calculation method, the melting time of refractory spherical deoxidizers of various diameters can be determined with sufficient accuracy for metallurgical applications. The algorithm can be efficiently implemented using the C++ programming language as the primary computational tool.

The presented mathematical model and calculation algorithms provide a complete description of the melting process of a spherical refractory deoxidizer at the slag-metal interface.

References

- [1] Voloshyn R.V.(2025) Mathematical model for calculating the melting of a cylindrical deoxidizer by radius and angle φ [Matematychna model rozrakhunku plavlennia rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy za radiusom i kutom φ] // Matematychni modeliuvannia, (pp. 94-99) Kamianske: DDTU. (2 (53)). S. 94-99.
- [2] Voloshyn R.V., Babenko M.V., Voloshyna K.R.(30 september, 2022)/ Riznytsevi skhemy zminnykh napriamkiv pry vyrishenni zadachi plavlennia obvazhnenoho kombinovanoho aliumomistkoho rozkysliuvacha v zakhysnii obolontsi [Differential schemes of alternating directions when solving the problem of melting a weighted combined aluminum-containing deoxidizer

- in a protective shell] UNIVERSYTET HRYHORIIA SKOVORODY V PEREIASLAVI Rada molodykh uchenykh universytetu Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii in «TENDENTSII TA PERSPEKTYVY ROZVYTKU NAUKY I OSVITY V UMOVAKH HLOBALIZATSII» (pp. 122-126). Vyp. 86 Zbirnyk naukovykh prats Pereiaslav.
- [3] Voloshyn R.V., Voloshyna K.R., Tomina A.-M. V. (13 december 2021) Plavlennia aliuminiievoho rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy pry vypusku metalu v kovsh [Melting of a cylindrical aluminum deoxidizer during metal release into a ladle] Materialy III vseukrainskoi konferentsii molodykh uchenykh, «Suchasne materialoznavstvo. Materialy ta tekhnolohii, SMMT-2021». (pp. 48-49) Kyiv.
- [4] Voloshyn R.V., Voloshyna K.R. (07-09 december, 2020) Matematychnе modeliuвання plavlennia rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy u stalerozlyvnomu kovshi [Mathematical modeling of melting of a cylindrical deoxidizer in a steel casting ladle] International scientific conference "Innovative technologies, models Cyber Security Management, ITCSM-2020 ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE ITCSM-2020 Part 2 Dnipro, Ukraine Book of Abstracts «Innovatsiini tekhnolohii, modeli upravlinnia Kiberbezpekoiu itmk-2020» Mizhnarodna naukova konferentsiia (pp. 26-27). Dnipro.
- [5] Voloshyn R.V., Babenko M.V., Lymar N.M., Hromovoi A.A. (2022). Osoblyvosti realizatsii ekonomichnoi riznytsevoi skhemy zminnykh napriamkiv pry vyrishenni zadachi plavlennia obvazhnenoho kombinovanoho aliumovmiskoho rozkysliuvacha v zakhysnii obolontsi [Features of the implementation of an economic difference scheme of variable directions when solving the problem of melting a weighted combined aluminum-containing deoxidizer in a protective shell] Matematychnе modeliuвання. (pp. 57-62). Kamianske: DDTU. (2 (47)),
- [6] Voloshyn R.V., Babenko M.V., Kryvosheiev H.A. (2018) Obgruntuvannia vyboru chyselnoho metodu, dlia vyrishennia zavdannia plavlennia kombinovanoho aliumovmiskoho rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy, z obvazhniuvachem, v zakhysnii obolontsi [Justification of the choice of a numerical method for solving the problem of melting a combined aluminum-containing deoxidizer of cylindrical shape, with a weighting agent, in a protective shell] Matematychnе modeliuвання, (pp. 35-40) Kamianske: DDTU. (1(38)).
- [7] Babenko M.V., Voloshyn R.V., Voloshyna K.R. (31 january, 2023). Vyrishennia zadachi plavlennia kombinovanoho aliumomistkoho rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy v zakhysnii obolontsi [Solving the problem of melting a combined aluminum-containing deoxidizer of cylindrical shape in a protective shell] UNIVERSYTET HRYHORIIA SKOVORODY V PEREIASLAVI Rada molodykh uchenykh universytetu Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii, in «TENDENTSII TA PERSPEKTYVY ROZVYTKU, NAUKY I OSVITY V UMOVAKH HLOBALIZATSII» (pp. 105-109). Vyp. 90 Zbirnyk naukovykh prats Pereiaslav.

Список використаної літератури

1. Волошин Р.В. «Mathematical model for calculating the melting of a cylindrical deoxidizer by radius and angle φ» // Математичне моделювання, Кам'янське, ДДТУ, 2025р. № 2 (53). С. 94-99.
2. Волошин Р.В., Бабенко М.В., Волошина К.Р. Різницеві схеми змінних напрямків при вирішенні задачі плавлення обваженого комбінованого алюмомісткого розкислювача в захисній оболонці // УНІВЕРСИТЕТ ГРИГОРІЯ СКОВОРОДИ В ПЕРЕЯСЛАВІ Рада молодих учених університету Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАУКИ І ОСВІТИ В УМОВАХ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ» 30 вересня 2022 року Вип. 86 Збірник наукових праць Переяслав, 2022 С. 122–126.
3. Волошин Р.В., Волошина К.Р., Томіна А.-М. В. Плавлення алюмінієвого розкислювача циліндричної форми при випуску металу в ковш // Матеріали III всеукраїнської конференції молодих учених, «Сучасне матеріалознавство. Матеріали та технології, СММТ-2021», Київ. 2021р., С. 48–49.

4. Волошин Р.В., Волошина К.Р. Математичне моделювання плавлення розкислювача циліндричної форми у сталерозливному ковші // International scientific conference "Innovative technologies, models Cyber Security Management, ITCSM-2020 ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE ITCSM-2020 Part 2 December 07-09, 2020 Dnipro, Ukraine Book of Abstracts «Інноваційні технології, моделі управління Кібербезпекою ІТМК-2020» Міжнародна наукова конференція, м Дніпро 2020, С. 26–27.
5. Волошин Р.В., Бабенко М.В., Лимар Н.М., Громовой А.А., Особливості реалізації економічної різницевої схеми змінних напрямків при вирішенні задачі плавлення обважненого комбінованого алюмомісткого розкислювача в захисній оболонці // Математичне моделювання, Кам'янське, ДДТУ, 2022р. № 2 (47). С. 57–62.
6. Волошин Р.В., Бабенко М.В., Кривошеєв Г.А. Обґрунтування вибору чисельного методу, для вирішення завдання плавлення комбінованого алюмомісткого розкислювача циліндричної форми, з обважнювачем, в захисній оболонці // Математичне моделювання, Кам'янське, ДДТУ, 2018. № 1(38). С. 35–40.
7. Бабенко М.В., Волошин Р.В., Волошина К.Р. Вирішення задачі плавлення комбінованого алюмомісткого розкислювача циліндричної форми в захисній оболонці // УНІВЕРСИТЕТ ГРИГОРІЯ СКОВОРОДИ В ПЕРЕЯСЛАВІ Рада молодих учених університету Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, «ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ, НАУКИ І ОСВІТИ В УМОВАХ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ» 31 січня 2023 року Вип. 90 Збірник наукових праць Переяслав, 2023. С. 105–109.

*Надійшла до редколегії 11.12.2025
Прийнята після рецензування 24.12.2025
Опублікована 22.01.2026*