

DOI: 10.31319/2519-8106.1(52)2025.325485

UDC: 669.18: 536.001.5

Voloshin Ruslan, Lecturer in Computer Science at the Separate Structural Subdivision, Technical and Economic Specialist College of Dnipro 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

Babenko Mykhailo, Candidat of Technical Sciences, assistant professor, software departments,
Бабенко М.В., кандидат технічних наук, доцент, кафедри програмного забезпечення,
ORCID: 0000-0003-1013-9383
e-mail: mvbab@ukr.net

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

CALCULATION OF ALUMINIUM DEOXIDISER MELTING IN THE STEEL LADLE

РОЗРАХУНОК ПЛАВЛЕННЯ АЛЮМІНІЄВОГО РОЗКИСЛЮВАЧА В СТАЛЕРОЗЛИВНОМУ КОВШІ

Today, the development of the steel industry constantly requires the introduction of new technologies to save resources and improve product quality. One of the most important processes in steelmaking is the out-of-furnace treatment and semi-finished product smelting in metal finishing facilities.

Out-of-furnace treatment as a trend in steel industry is a process that improves quality and resource efficiency. Deoxidation of steel in a steel ladle is one of the main operations that improves product quality by reducing dissolved oxygen in the metal melt. This procedure is carried out by introducing aluminium into the liquid metal when the steel is discharged into the ladle from the steelmaking unit.

Keywords: steel ladle; deoxidation of steel; metal melt; slag melt; aluminium deoxidiser; mathematical model Dusimber method.

На сьогоднішній день розвиток металургійної промисловості постійно потребує введення нових технологій для ресурсозбереження та підвищення якості продукції. Одним з найважливіших процесів у сталеплавильному виробництві є процес позапічної обробки та виплавки напівпродукту в установках доведення металу. Процес позапічної обробки як напрямок у металургії є процесом, який підвищує якість і ресурсозбереження. Розкислення сталі в сталерозливному ковші — це одна з головних операцій, яка покращує якість продукції за рахунок зменшення розчиненого кисню в розплав металу. Така процедура здійснюється шляхом введення в рідкий метал алюмінію, коли здійснюється випуск сталі в ківш зі сталеплавильного агрегату.

Алюміній значно легший за сталь, тому закинутий у ківш розкислювач спливає на поверхню шлаку, інтенсивно взаємодіючи з атмосферою і зі шлаком. При використанні згаданих виробів спостерігається низьке (5—15 %) засвоєння алюмінію рідким металом. Дефіцит і висока вартість алюмінію постійно змушують металургів шукати шляхи зниження його витрат. Вирішенням поставленої задачі є збільшення щільності алюмінієвмісного злитка шляхом введення обважнювача з одночасною ізоляцією його поверхні. Ця задача належить до задач теплопровідності з рухомими межами розділу фаз. Для її розв'язання використано різнице-ву схему, засновану на врахуванні прихованої теплоти плавлення за методом Дюзімбера.

При введенні розкислювача в процесі випуску металу з конвертера в сталерозливний ківш спочатку він перебуває в об'ємі розплаву, а потім спливає на границю шлак-метал. Після розплавлення намерзлої сталевий оболонки і потім чавунної оболонки, частина рідкого алюмінію спливає на шлак, а частково конвективними потоками металу розноситься в об'ємі металу.

Для розрахунків злиток представлений у вигляді циліндра діаметром до 110 мм і завдовжки 700 мм, і розташований на межі шлак-метал. Результати обчислювального експерименту дають змогу встановити раціональні режими введення кускових добавок із різних матеріалів, які забезпечують найсприятливіші умови для їхнього розплавлення в сталерозливному ковші або ковш-печі.

Ключові слова: сталерозливний ківш; розкислення сталі; металевий розплав; шлаковий розплав; розкислювач алюмінію; математична модель; метод Дюзімбера.

Problem's Formulation

Having reviewed the technological processes which are used at metallurgical enterprises and having conducted a literature review of the problems of improving the quality of products, it was found that aluminium is much lighter than steel, so aluminium introduced into the ladle of castings floats to the surface of slag, interacting intensively with the atmosphere and with slag. At such use of aluminium-containing deoxidisers low (5—15 %) assimilation of aluminium in the metal melt is observed. The high cost of aluminium constantly forces metallurgists to search for ways to reduce its consumption. In this articles we propose a solution to the problem of qualitative aluminium assimilation in the steel ladle by increasing the density of aluminium ingot through the use of a weighting agent and a protective shell of metal to isolate its surface from the impact of slag [1,2].

Analysis of recent research and publications

This problem belongs to the problems of heat conduction with moving interfaces, and numerical methods are used for its solution. The universal method of calculation is the finite difference method. A difference scheme based on the Dusimber method of accounting for the latent heat of fusion has been used. The method has already been applied to solve one-dimensional problems of melting of aluminium deoxidiser during steel finishing in a steel ladle, as well as to study the melting kinetics of aluminium and powder wires during their introduction into liquid steel. In addition, the method was applied to solve the two-dimensional melting problem of an aluminium rod (longitudinal flow of a cylinder) with a protective coating [2—4].

Formulation of the study purpose

The aim of the work is to calculate the melting on the basis of the Dusimber method of cylindrical-shaped materials under asymmetric boundary conditions in a steel casting ladle.

Presenting main material

When introducing deoxidant in the process of metal release from the converter into the steel ladle, it will be either in the melt volume or at the slag-metal interface Fig. 1. After melting of the frozen steel shell and then the protective shell, part of the liquid aluminium will float to the surface of the slag, and part with convective flows of metal will get into the molten metal volume.

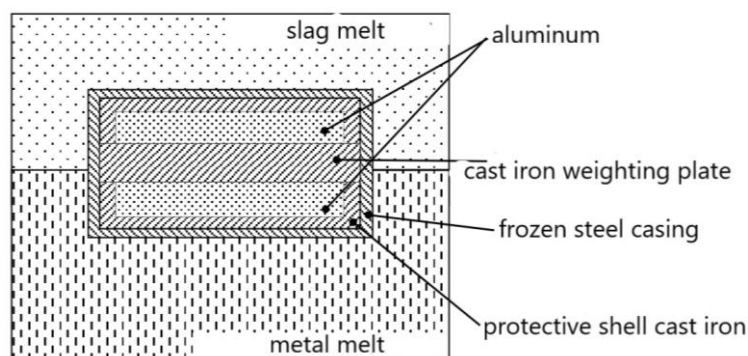


Fig. 1. Scheme of melting of aluminous deoxidiser at the slag-metal interface

The specified deoxidiser is presented in the form of a cylinder with a diameter of 60—120 mm and length up to 700 mm, located at the slag-metal interface (Fig. 1). We assume that the temperatures of liquid metal t_m and liquid slag t_s are constant, and the thermophysical parameters of the ingot and protective coating do not depend on temperature. The heat flux along the ingot length is not significant, so the three-dimensional problem of ingot heating and melting is reduced to a two-dimensional problem (at radius r and angle φ). The heat conduction equation for the three phases of the ingot (solid, two-phase, liquid):

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

$$0 > r < R_0, 0 < \varphi < \pi,$$

where C_{ef} — effective heat capacity and density are defined in the form.

Then the temperature distribution in the weighted casing and the protective shell is as follows:

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

$$0 > r > R_y, 0 < \varphi < \pi \text{ — weighted,}$$

$$R_0 > r > R_{ci}, 0 < \varphi < \pi \text{ — in cast iron containment.}$$

Boundary conditions. On the symmetry axis of the cylinder cross-section the heat flux is 0:

$$\frac{\partial t(r, 0, \tau)}{\partial \varphi} = 0. \quad (3)$$

On the upper side surface of the cylinder ($0 < \varphi < \varphi_0$) convective heat exchange with liquid slag with a given heat transfer coefficient takes place α_s . On the lower side surface of the cylinder ($\varphi_0 < \varphi < \pi$) convective heat exchange with liquid metal with a given heat transfer coefficient takes place α_m . There is an ideal thermal contact between the intruded shells of metal, slag, protective shell and the cylinder surface, and boundary conditions of IV kind are set. The temperature distribution in the solidified metal shell is as follows:

$$c_m \rho_m \frac{\partial T_m(r, \varphi, \tau)}{\partial \tau} = \left[\lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial T_m}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left[\lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial \varphi^2} \right], \quad (4)$$

$$r > R_{ci}, (\varphi_0 < \varphi < \pi).$$

The point P_m belongs to the melting (intrusion) boundary of the solidified metal shell. In this case, we write the condition of motion of the melting (intensification) boundary in the form:

$$\alpha_m (t_m(r, \varphi, \tau) - t_{melt}^m) - \lambda \frac{\partial t_m(P_m)}{\partial n} = -\rho_m Q_m W(P_m); t(P) = t_v, \quad (5)$$

where t_v — is the zero liquidus temperature of the metal.

The temperature distribution in the solidified slag shell is as follows:

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s(r, \varphi, \tau)}{\partial \tau} = \left[\lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left[\lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial \varphi^2} \right], \quad (6)$$

$$r > R_s, (0 < \varphi < \varphi_0).$$

The point P_h belongs to the melting (intrusion) boundary of the solidified slag shell. In this case, we write the condition of motion of the melting (intensification) boundary in the form:

$$\alpha_h (t_h(r, \varphi, \tau) - t_{melt}^h) - \lambda \frac{\partial t_h(P_h)}{\partial n} = -\rho_h Q_h W(P_h); t(P_h) = t_{melt}^s. \quad (7)$$

The initial condition is a uniform temperature distribution in the ingot, weighting device and protective shell. The calculation area is represented as half of the cylinder cross-section, Fig. 2. To solve the problem, we form a square coordinate grid and divide the considered half of the cross-

section by vertical and horizontal lines as shown in Fig. 2. We obtain control volumes with coordinates i, j . The temperature values will be determined in the centre of the control volumes. We set M_0 — initial number of nodes on the radius. In the proposed calculation the explicit difference circuit is used [4—6].

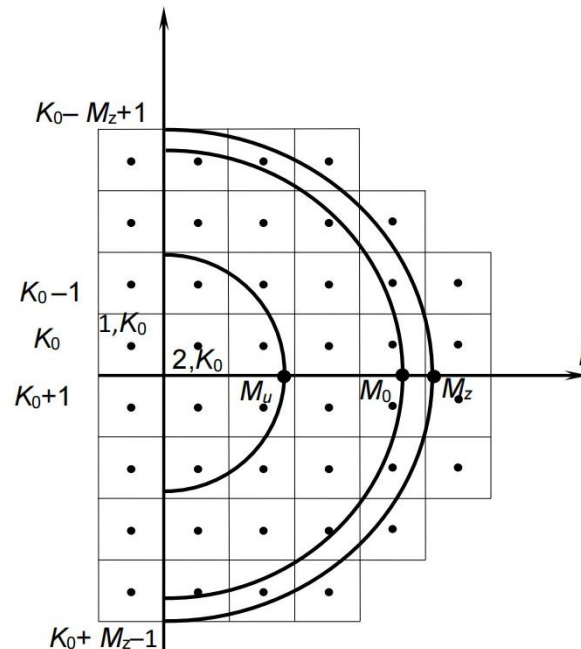


Fig. 2. Calculation area of the problem of melting of ingot with protective shell and weighting device, slag-metal boundary

According to technological instructions deoxidiser is entered from a height of 7 m into the metal melt when 1/3 of the ladle is filled, feeding of ingots continues until 2/3 of the ladle is filled. The average duration of ladle filling is 7 minutes, so the time of deoxidiser melting should not exceed 140 sec. Melting calculations of aluminium deoxidisers weighing less than 17.6 kg as a function of aluminium percentage with different weighting and containment sizes are presented in Tabl. 1.

Table 1. Results of calculations of melting of aluminium-containing deoxidisers in a steel ladle (length of deoxidiser 700 mm)

№	Al, %	Cylinder diameter, mm	D_u , Weighting plate diameter, mm	H_o Thickness of the protective shell, mm	Deoxidizer melting time, sec.	Cylinder weight, kg
1	40	66	38	5	287	17,5
2	50	74	33	4	187	17,5
3	60	82	28	3	168	17,5
4	70	88	26	2	135	17,4
5	80	94	24	1	91	17,6
6	90	100	24	0	95	17,4
7	100	106	0	0	127	17,6

Below is a diagram of the melting time of deoxidiser in the steel ladle (Fig. 3).

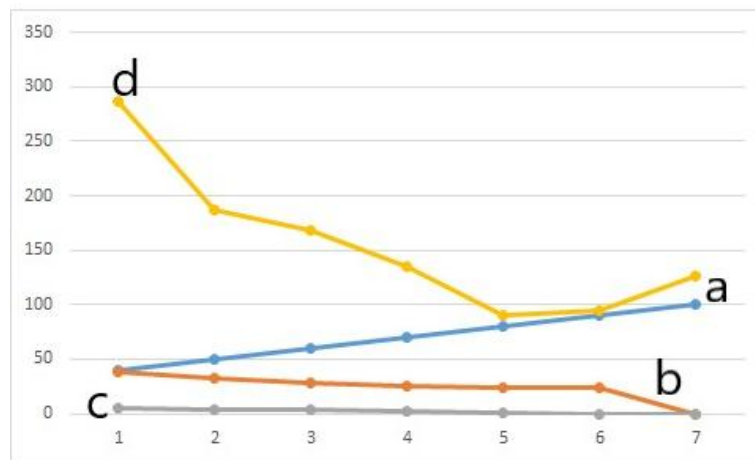


Fig. 3. Dependence of the deoxidiser melting time on the amount of aluminium and geometric dimensions of the weighting plate and protective shell: a — percentage aluminum content, b — diameter of the weight casing, mm, c — thickness of the protective shell, mm, d — melting time of deoxidiser, sec

Conclusions

The results of the computational experiment allow us to establish rational modes of input of aluminium-containing deoxidisers, providing the most favourable conditions for their melting in the steel casting ladle. It should be noted that at low (40 %) percentage of aluminium, the deoxidant ingot floats to the surface of the melt quickly enough, and the melting process takes place on the slag-metal surface. At the time of surfacing, the deoxidiser has a density of 5377 (kg/m³) and the slag level is 0.59 — indicating that the deoxidiser is immersed in the metal by its larger half. At the end of the melting process (after 9.6 seconds), the deoxidiser will have a density of 4053 (kg/m³) and a mass of 11.9 kg.

Similarly, at (50 %), the deoxidiser floats to the surface of the melt in 1 sec. and at the time of floating to the surface it acquires a density of 5014 (kg/m³), with a slag level of 0.5. At the end of the melting process (after 8 seconds), the ingot will have a density of 3668 (kg/m³) and a mass of 13.2 kg. It is only when the aluminium percentage exceeds 50 % that the deoxidiser fails to melt within 140 sec.

References

- [1] Voloshyn R.V., Babenko M.V., Lyamar N.M., Hromovoi A.A. (2022). Osoblyvosti realizatsii ekonomichnoi riznytsevoi skhemy zminnykh napriamkiv pry vyrishenni zadachi plavlennia obvazhnenoho kombinovanoho aliumovmistkoho rozkysliuvacha v zakhysnii оболонці [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] *Matematychni modeliuvannia*. (pp. 57-62). Kamianske: DDTU. (2 (47)),
- [2] Voloshyn R.V., Babenko M.V., Kryvosheiev H.A. (2018) Obgruntuvannia vyboru chyselnoho metodu, dlia vyrishennia zavdannia plavlennia kombinovanoho aliumovmistkoho rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy, z obvazhniuvachem, v zakhysnii оболонці [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] *Matematychni modeliuvannia*, (pp. 35-40) Kamianske: DDTU. (1(38)).
- [3] Babenko M.V., Voloshyn R.V., Voloshyna K.R. (31 january, 2023). Vyrishennia zadachi plavlennia kombinovanoho aliumomistkoho rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy v zakhysnii оболонці [Solving the problem of melting a combined aluminum-containing deoxidizer of cylin-

- dricul shape in a protective shell] *UNIVERSYTET HRYHORIA 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.
- [4] 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 HRYHORIA 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.
- [5] 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 tekhnologii, SMMT-2021»*. (pp. 48-49) Kyiv.
- [6] Voloshyn R.V., Voloshyna K.R. (07-09 december, 2020) Matematychni modeliuvannia 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 tekhnologii, modeli upravlinnia Kiberbezpekoiu itm-2020» Mizhnarodna naukova konferentsiia* (pp. 26-27). Dnipro.
- [7] Voloshyn R.V. (31 october, 2024) / Rozrakhunok plavlennia rozkysliuvacha iz zakhysnoiu obolonkoiu ta obvazhniuvachem [Calculation of deoxidizer melting with a protective shell and weighting agent] *UNIVERSYTET HRYHORIA SKOVORODY V PEREIASLAVI Rada molodykh uchenykh universytetu Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii «TENDENTSII TA PERSPEKTYVY ROZVYTKU NAUKY I OSVITY V UMOVAKH HLOBALIZATSII»* (pp. 167-169). Vyp. 110 Zbirnyk naukovykh prats Pereiaslav
- [8] Voloshyn R.V (Part 2, 18-20, april 2023) / Matematychna model rozrakhunku protsesu plavlennia rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy z vykorystanniam kryvoliniinoi sitky (za radiusom r i kutom) [A mathematical model for calculating the melting process of a cylindrical deoxidizer using a curved grid (by radius r and angle)] *INTERNATIONAL CONFERENCE MATHEMATIC PROBLEMS OF THE TECHNICAL MECHANIC ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE MPTM 2023 Kyiv, Dnipro, Kami-anske, Ukraine, Book of Abstracts «MATEMATYCHNI PROBLEMY TEKHNIЧNOI MEKHANIKY – 2023» MIZHNNARODNA NAUKOVA KONFERENTSIIA, Kyiv, Dnipro, Kamianske* (pp. 15-16).

Список використаної літератури

1. 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 алюмовмісткого розкислювача в захисній оболонці // Математичне моделювання, Кам'янське, ДДТУ, 2022р. № 2 (47). С. 57–62.
2. Волошин Р.В., Бабенко М.В., Кривошеєв Г.А. Обґрунтування вибору чисельного методу, для вирішення завдання плавлення комбінованого алюмовміського розкислювача циліндричної форми, з обважнювачем, в захисній оболонці // Математичне моделювання, Кам'янське, ДДТУ, 2018. № 1(38). С. 35–40.
3. 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.
4. Волошин Р.В., Бабенко М.В., Волошина К.Р. Різницеві схеми змінних напрямків при вирішенні задачі плавлення обважненого 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.
 5. Волошин Р.В., Волошина К.Р., Томіна А.-М. В. Плавлення алюмінієвого розкислювача циліндричної форми при випуску металу в ковш // Матеріали ІІІ всеукраїнської конференції молодих учених, «Сучасне матеріалознавство. Матеріали та технології, СММТ-2021», Київ. 2021р., С. 48–49.
 6. 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 itmк-2020» Міжнародна наукова конференція, м Дніпро 2020, С. 26–27.
 7. Волошин Р.В. Розрахунок плавлення розкислювача із захисною оболонкою та обважнювачем // 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 жовтня 2024 року Вип. 110, Збірник наукових праць Переяслав 2024. С. 167–169.
 8. Волошин Р.В. Математична модель розрахунку процесу плавлення розкислювача циліндричної форми з використанням криволінійної сітки (за радіусом r і кутом) // INTERNATIONAL CONFERENCE MATHEMATIC PROBLEMS OF THE TECHNICAL MECHANIC ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE MPTM 2023 Kyiv, Dnipro, Kamianske, Ukraine, Book of Abstracts (Part 2, April 18-20, 2023) «МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ – 2023» МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ, Київ, Дніпро, Кам'янське 2023. С.15 – 16.

Надійшла до редколегії 14.03.2025