

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

УДК 537.612 : 621.791.92

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.019>**ВПЛИВ СТРУМОПІДВОДУ НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ
В КРИСТАЛІЗАТОРІ ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛУ**

Ю.М. Гориславець^{*1}, докт. техн. наук, **О.І. Бондар**^{**1}, канд. техн. наук,
В.М. Проскудін^{***2}, канд. техн. наук, **Ю.М. Кусков**^{****2}, докт. техн. наук,
С.В. Римар^{*****2}, докт. техн. наук, **А.В. Нетяга**^{*****2}, інж.

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

e-mail: yugoris@ukr.net

² – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. К. Малевича, 11, Київ-150, 03150, Україна

e-mail: elmag@paton.kiev.ua

Наведено результати чисельного моделювання електромагнітних процесів у системі електрошлакового наплавлення металу з секційним кристалізатором для різного положення клем струмопідводу, яке виконано на основі розробленої математичної моделі. Результати представлено у вигляді розподілів густини струму в металі секції з вертикальним розрізом та електромагнітних сил у рідкому шлаку. Показано, що переміщення по азимуту верхньої клеми кристалізатора, яка приєднана до струмопідвідної секції, відносно її вертикального розрізу суттєво впливає на електромагнітні сили у шлаковій ванні, але не змінює потужність тепловиділення в системі. В той же час положення нижньої клеми, приєднаної до заготовки, практично не впливає не тільки на тепловиділення, але і на сили в рідкому шлаку. Бібл. 6, рис. 2, таблиця.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення металу, струмопідвідний кристалізатор, математичне моделювання, густина електричного струму, електромагнітні сили, тепловиділення.

Електрошлакове наплавлення (ЕШН) металу – технологія, яка знайшла широке застосування в промисловості, зокрема в металургійному та гірничорудному виробництві, енергетичному та нафтохімічному машинобудуванні, виробництві композитних матеріалів тощо. Її сутність ґрунтується на нанесенні розплавленого металу на робочу поверхню виробу, за якої оплавлення основного та розплавлення спеціального присадного металів відбувається за рахунок тепла, що виділяється в шлаковій ванні під час проходження через неї електричного струму [1]. Відомі різні способи та засоби (системи), які реалізують цю технологію.

Сьогодні широкого застосування набули системи наплавлення, які використовують спеціальні формувальні пристрої – кристалізатори. Такі кристалізатори виготовляються переважно із міді і можуть бути електрично нейтральними або струмопідвідними (струмопровідними). Хоча висвітленню останніх систем присвячена значна кількість наукових праць, все ж залишаються питання, які потребують додаткового висвітлення (дослідження). Особливо це стосується електромагнітних процесів, які для цієї технології є першопричиною інших, у більшості випадків, взаємопов'язаних фізичних процесів – теплових, гідродинамічних, технологічних тощо.

На рис. 1 представлено типову систему наплавлення у вигляді секційного струмопідвідного кристалізатора. Вона складається із верхньої струмопровідної секції 1, що має вертикальний розріз у радіальному напрямі 2, який перетворює її в одновитковий індуктор, та нижньої секції 3, в якій міститься частина шлакової ванни 4 та формується метал, що наплавля-



ється. Верхня секція має графітову футеровку (покриття) 5, яка захищає її від електроерозійного впливу розплавленого шлаку. Секції розділені між собою електроізоляційною прокладкою 6 (азбест). Під нижньою секцією знаходиться заготовка 7, на яку наплавляється метал підвищеної міцності та зносостійкості. У момент підключення такої системи до напруги, яка подається на одну з клем верхньої секції та на клему заготовки, внаслідок протікання струму

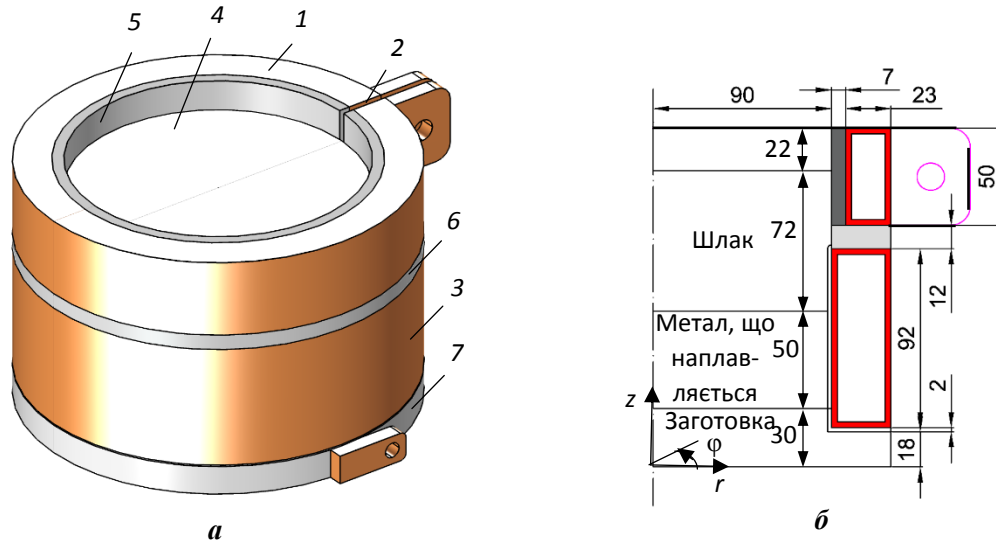


Рис. 1

в шлаковій ванні виникає значне тепловиділення та створюється вихровий рух (зокрема обертальний) рідкого шлаку під дією електромагнітних сил.

Конструкція секційного кристалізатора, що забезпечує обертання шлаку (шлакової ванни) при підведенні струму до верхньої електрично ізольованої секції, були описані в [2] та інших роботах. Технологічні особливості процесу електрошлакового наплавлення в такому кристалізаторі експериментально досліджувалися в роботі [3]. У ній, зокрема, показано, що швидкість обертання шлаку залежить від місця розташування клем верхньої секції, на яку подається напруга, відносно вертикального розрізу. В роботі наведена залежність швидкості обертання шлакової ванни від кута між клемою та розрізом в діапазоні $0^\circ \dots 180^\circ$. Зазначено, що максимум швидкості припадає на кут 90° між ними. З огляду на відсутність наукового обґрунтування представленої залежності, це питання потребує додаткового дослідження, яке може бути проведено шляхом математичного моделювання фізичних процесів, що протікають у такій системі.

Слід зазначити, що в процесі виконання таких досліджень необхідно враховувати декілька важливих моментів, серед яких – коректне визначення контактних опорів «мідь – графіт», «графіт – рідкий шлак» та ін., адже їхній вплив на характер протікання процесу ЕШН може бути суттєвим. Відомо, що значення імпедансу контактної пари залежить від фактичної площі контакту, яка, в свою чергу, визначається рельєфом поверхні, тиском між поверхнями контактної пари та частотою зміни прикладених електричних потенціалів. У дослідженні електромагнітних процесів ЕШН на промисловій частоті останнім можна знехтувати. Залежність питомого електричного контактного опору пари «мідь – графіт» від тиску (в діапазоні $1 \dots 7$ МПа/см²) досліджувалася в роботі [4] за постійної температури в зоні контакту. Така залежність може бути використана для моделювання процесу ЕШН.

Крім того, труднощі моделювання зазначеного процесу пов'язані із циліндричною асиметрією кристалізатора в зв'язку з наявністю вертикального розрізу, а отже, з тривимірним характером розподілу електромагнітного поля, а також з недостатністю даних, що стосуються фізичних характеристик рідких та твердих шлаків, значення яких можуть варіюватися в широкому діапазоні [5]. Тому фізичні характеристики цих матеріалів мають обиратися такими, щоб результати моделювання якнайкраще узгоджувалися з експериментальними даними.

У роботі [6] представлено математичну модель для дослідження електромагнітних процесів у таких кристалізаторах з урахуванням зазначених особливостей, а також наведено результати моделювання цих процесів для типової конструкції системи, струмопідвід якої виконано за схемою, представленою на рис. 1.

Задача цієї роботи – на підставі сформульованої в [6] математичної моделі розширити дослідження електромагнітних процесів у системі ЕШН з секційним струмопідвідним кристалізатором з **метою** встановлення впливу місця розташування струмопідводу цієї системи на зазначені процеси.

За аналогією з [6] дослідження виконувалися шляхом чисельного моделювання електромагнітних процесів у системі наплавлення, представленої на рис. 1, для різного положення (відносно вертикального розрізу) верхньої і нижньої клем струмопідводу. Моделювання, як і раніше, проводилося за тих самих, що і в [6], припущеннях і вихідних даних. Основні з них такі. Залежністю фізичних характеристик матеріалів від температури та електромагнітного поля нехтувалося. Прийнято, що метал, який наплавляється, та метал заготовки – один і той самий феромагнітний матеріал. Водночас вважалося, що температура першого з них вище температури Кюрі, а другого – нижче, для якого відносна магнітна проникність приймалася постійною. Рідка фаза металу, що наплавляється, (верхня його частина) і тверда мають однакову електропровідність. Рух рідкої фази металу та шлаку не враховувався. Структура шлаку приймалася однорідною, а його фізичні характеристики по всьому об'єму вважалися незмінними. Електричний контакт у межах однієї контактної поверхні приймався однорідним.

На рис. 2 представлено отримані в результаті проведеного моделювання розподіли густини струму j у міді верхньої струмопідвідної секції та питомих електромагнітних сил f (позначено стрілками), що діють на шлак, у горизонтальному перерізі шлакової ванни на глибині 15 мм від верхньої поверхні для різних значень кута φ_k між верхньою клемою та вертикальним розрізом цієї секції. Значимо, що рис. 2 *a* відповідає куту $\varphi_k = 3^0$ (умовно $\varphi_k = 0$); рис. 2 *b* – куту $\varphi_k = 45^0$; рис. 2 *в* – куту $\varphi_k = 85^0$; рис. 2 *г* – куту $\varphi_k = 135^0$; рис. 2 *д* – куту $\varphi_k = 175^0$ (умовно 180^0). Рис. 2 *e* відповідає куту $\varphi_k = -3^0$ (умовно 360^0), тобто випадку, коли живлення подається до другого кінця верхньої секції.

Звідси видно, що розташування верхньої клем живлення суттєво впливає як на розподіл струму в мідній секції, так і на розподіл електромагнітних сил у рідкому шлаку. Із збільшенням кута φ_k від нуля до 180^0 сили зменшуються, одночасно змінюється також їхній напрямок і розподіл. Якщо за $\varphi_k = 0$ в основному превалює азимутальна компонента, яка створює обертовий одноконтурний рух шлаку, то за $\varphi_k = 180^0$ розподіл електромагнітних сил стає таким, який має привести до симетричного двоконтурного вихрового руху. За проміжних значень цього кута очікується несиметричний двоконтурний рух, або послаблений одноконтурний. Остаточне підтвердження цього висновку може дати моделювання гідродинамічних процесів у такій системі.

Але навіть і без такого моделювання проведений аналіз розподілу електромагнітних сил залежно від кута φ_k дає змогу припустити, що максимальна інтенсивність обертового руху рідкого шлаку буде за $\varphi_k = 0$. Збільшення цього кута призведе до того, що гідродинамічна течія буде перебудовуватися, аж поки в момент $\varphi_k = 180^0$ вона не трансформується у два однакові протилежно направлені потоки (вихори). Подальше збільшення цього кута знову буде змінювати структуру течії від двоконтурної форми до одноконтурної, яка в момент $\varphi_k = 360^0$ набуде такої ж максимальної швидкості, але протилежного порівняно з $\varphi_k = 0$ напрямку.

Отже, за рахунок переміщення по азимуту верхньої клем струмопідводу відносно вертикального розрізу струмопровідної секції кристалізатора можна в широкому діапазоні керувати інтенсивністю і структурою вихрового руху рідкого шлаку в системі електрошлакового наплавлення металу. Принагідно слід зазначити, що отримані тут результати опосередковано не підтверджують

	Значення
U , В	40 (експеримент 35...45)
I , кА	2,33 (експеримент 1,6...2,2)
P_{slag} , кВт	88,4
P_{cs} , Вт	17...60
P_{gr} , Вт	193

висновок роботи [3] про те, що максимальна швидкість обертання рідкого шлаку досягається за $\varphi_k = 90^\circ$.

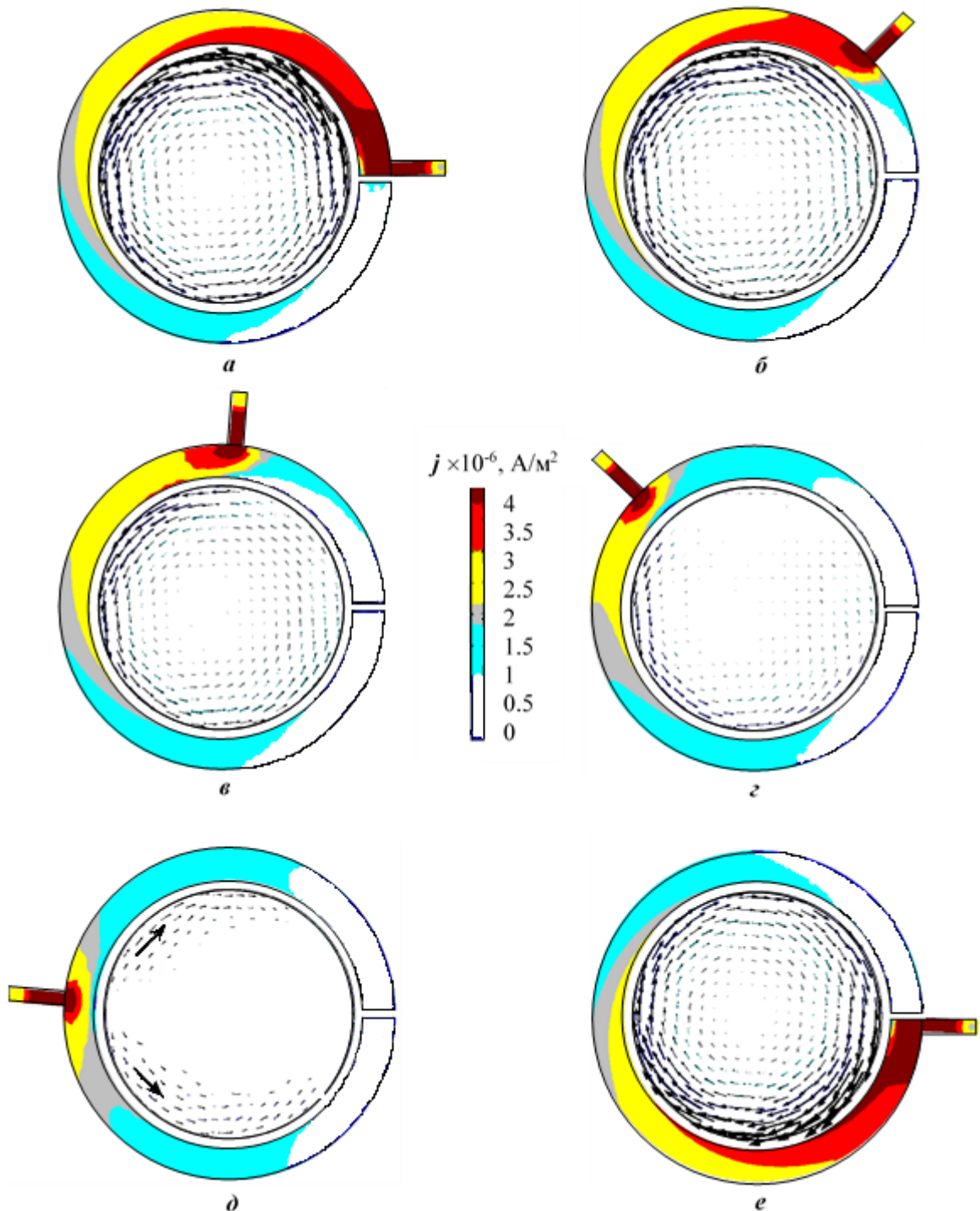


Рис. 2

Результати цього моделювання показали, що електромагнітні параметри системи наплавлення, а також інтегральні тепловиділення в її елементах практично не залежать від місця розташування верхньої клеми живлення. Їхні середні значення представлено в таблиці, де U та I – напруга та струм джерела живлення відповідно; P_{slag} – тепловиділення в об'ємі рідкого шлаку; P_{cs} – тепловиділення в струмопровідній секції; P_{gr} – тепловиділення в графітовій футеровці. Це означає, що у випадку керування вихровим рухом шлаку за рахунок переміщення верхньої клеми тепловий стан системи не буде змінюватися. Останнє важливо, оскільки регулювати швидкість обертання шлаку за допомогою, наприклад, зміни струму (напруги) не завжди можливо у зв'язку із прямим впливом цих параметрів на температуру шлаку і металу в кристалізаторі, що може призвести до їхнього недогріву, або перегріву.

Досліджувався також вплив нижньої клеми живлення, приєднаної до заготовки. Для цього розглядалися різні комбінації приєднання (розташування) двох клем (верхньої і нижньої) відносно вертикального розрізу струмопровідної секції кристалізатора. У результаті встановлено, що за фіксованого розташування верхньої клеми переміщення клеми, яка приєднана до заготовки, мало впливає на тепловиділення в системі та розподіл електромагнітних сил у рідкому шлаку, а тому в першому наближенні цей вплив можна не враховувати.

Висновок. Переміщення по азимуту верхнього струмопідводу секційного кристалізатора відносно його вертикального розрізу дає змогу керувати циркуляцією рідкого шлаку в системі електрошлакового наплавлення металу без впливу на її тепловий стан.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвиток теорії електротехнологічних процесів та розроблення ефективних електроплавильних і електрозарядних систем з керованим електромагнітним впливом» (шифр "Елтех"). КПКВК 6541030.

1. Кусков Ю.М., Скороходов В.Н., Рябцев И.А., Сарычев И.А. Электрошлаковая наплавка. Москва: Наука и технологии, 2001. 180 с.
2. Ксендзык Г.В. Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Специальная электрометаллургия*. 1975. Вып. 27. С. 32–40.
3. Соколов Г.Н., Михеев А.Н., Павлов А.А. Электрошлаковая наплавка в секционном кристаллизаторе оправок трубопрошивного стана. *Сварочное производство*. 2002. № 6. С. 31–34.
4. Карвацкий А.Я., Лелека С.В., Пулинец И.В., Лазарев Т.В., Педченко А.Ю. Исследование электрического контактного сопротивления графита с медью и терморасширенным графитом. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 5(5). С. 45–49. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2014_5%285%29_10.
5. Kharicha A. Karimi-Sibaki E., Wu M., Ludwig A., Bohacek J. Review of Modeling and Simulation of Electroslag Remelting. *Steel Research International*. 2018. Vol. 89. No. 1. 1700100. 20 p. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.201700100>.
6. Гориславец Ю.М., Бондар О.І., Проскудін В.М., Кусков Ю.М., Римар С.В., Нетяга А.В. Моделирование электромагнитных процессов в секционном кристаллизаторе для электрошлакового наплавления металу. *Техн. електродинаміка*. 2022. №4. С. 64–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.064>

INFLUENCE OF ELECTRICAL CURRENT TERMINALS ON ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN A MOULD FOR ELECTROSLAG SURFACING OF METAL

Y.M. Goryslavets¹, O.I. Bondar¹, V.M. Proskudin², Yu.M. Kuskov², S.V. Ryamar², A.V. Netyaha²

¹ – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 56, pr. Peremohy, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: yugoris@ukr.net

² – E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,

11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine

e-mail: elmag@paton.kiev.ua

The results of numerical modeling of electromagnetic processes in the system of electroslag surfacing of metal with sectional mould for different positions of the terminals of the current supply, which is made on the basis of the developed mathematical model. The results are presented in the form of current density distributions in the metal of section with a vertical slit and electromagnetic forces in the liquid slag. It is shown that the azimuth displacement of the upper terminal of the mould, which is connected to the current-carrying section relative to its vertical slit, significantly affects the electromagnetic forces in the slag bath but does not change the heat output in the system. At the same time, the position of the lower terminal connected to the workpiece has virtually no effect not only on heat dissipation but also on the forces in the liquid slag. Ref. 6, fig. 2, table.

Keywords: electroslag surfacing of metal, current-carrying mould, mathematical modeling, electric current density, electromagnetic forces, heat dissipation.

1. Kuskov Yu.M., Skorokhodov V.N., Ryabtsev I.A., Sarychev I.A. Electroslag welding. Moskwa: Nauka i tekhnologii, 2001. 180 p. (Rus)
2. Ksendzyk G.V. Current-carrying mould, which ensures the rotation of the slag bath. *Spetsialnaya elektrometal-lurgiya*. 1975. Iss. 27. Pp. 32–40. (Rus)
3. Sokolov G.N., Mikheev A.N., Pavlov A.A. Electroslag surfacing in a sectional mold of mandrels of a pipe-piercing mill. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2002. No 6. Pp. 31–34. (Rus)

4. Karvatsky A.Ya., Leleka S.V., Pulinets I.V., Lazarev T.V., Pedchenko A.Yu. Study of electrical contact resistance of graphite with copper and thermally expanded graphite. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2014. No 5(5). Pp. 45–49. (Rus) URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2014_5%285%29_10.
5. Kharicha A., Karimi-Sibaki E., Wu M., Ludwig A., Bohacek J. Review of Modelling and Simulation of Electroslag Remelting. *Steel Research International*. 2018. Vol. 89. No 1. 1700100. 20 p. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.201700100>.
6. Goryslavets Y.M., Bondar O.I., Proskudin V.M., Kuskov Y.M., Rymar S.V., Netyaga A.V. Modelling of electromagnetic processes in a sectional mold for electroslag surfacing of metal. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No 4. Pp. 64–68. (Ukr) (Ukr) (Ukr)DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.064>

Надійшла: 06.06.2022

Прийнята: 09.06.2022

Submitted: 06.06.2022

Accepted: 09.06.2022