

УДК 662.614.2:[662.641+628.4.042]:001.891.5
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).26](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).26)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CALORIFIC VALUE OF MUNICIPAL SOLID WASTE AND PEAT AS SOLID FUELS

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТВОРНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ І ТОРФУ ЯК ТВЕРДОГО ПАЛИВА

Yurii S. Holik
golik38@i.ua
ORCID: 0000-0002-5429-6746

Tetiana M. Serha
tetjanaserha@gmail.com
ORCID: 0009-0006-6575-5529

Ю. С. Голік,
канд. техн. наук, доцент

Т. М. Серга,
аспірант

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the calorific value of combustible fractions of household waste and peat. The analysis of the determination of the level of the calorific value of combustible fractions of household waste was carried out in accordance with the morphological composition of household waste in the village of Kotelva, Poltava region. *Purpose.* To determine the calorific value of combustible fractions of household waste and peat deposits of the Poltava region in order to understand the possibility of their further use as raw materials. *Methodology.* When calculating this indicator, real values were used that were obtained during laboratory research using a calorimeter. *Results.* Based on the data obtained, formulas were derived to determine the higher and lower calorific values. The analysis of the calorific value of combustible fractions of household waste and peat indicates a high potential for obtaining thermal energy. Conclusions were drawn that indicate the feasibility of developing fuel composite mixtures that will allow obtaining thermal energy from high-calorie combustible fractions of household waste and peat. *Scientific novelty.* The scientific novelty of this article lies in determining the heat of combustion of combustible fractions of household waste (according to the morphological composition of household waste of the village of Kotelva) and peat deposits of Poltava region to solve the problem of household waste management in the territories of village communities. *Practical significance.* The practical significance lies in creating an effective system of household waste management in the territories of village communities, that is, the use of combustible fractions of household waste and peat as raw materials, for example, for small energy facilities, and/or the possibility of replacing the corresponding volumes of traditional energy resources with alternative ones.

Key words: calorific value; household waste; combustible fractions; peat; composite fuel mixture.

Анотація. У роботі представлено результати експериментального дослідження теплотворної здатності горючих фракцій побутових відходів і торфу. Аналіз визначення рівня теплоти згоряння горючих фракцій побутових відходів проводилося відповідно до морфологічного складу побутових відходів селища Котельва Полтавської області. *Мета.* Визначити теплоту згоряння горючих фракцій побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини для розуміння можливості їх подальшого використання як сировини. *Методика.* При розрахунку даного показника використовувалися реальні значення, що були отримані під час лабораторного дослідження за допомогою калориметру. *Результати.* На основі отриманих даних виведено формули з визначення вищої та нижчої теплоти згоряння. Аналіз теплотворної здатності горючих фракцій побутових відходів і торфу свідчить про високий потенціал отримання теплової енергії. Сформуовано висновки, які свідчать про доцільність розроблення паливних композиційних сумішей, що дозволять отримувати теплову енергію з висококалорійних горючих фракцій побутових відходів і торфу. *Наукова новизна.* Наукова новизна даної статті полягає у визначенні теплоти згоряння горючих фракцій побутових відходів (відповідно до морфологічного складу побутових відходів селища Котельва) та торфу родовищ Полтавщини для вирішення проблеми поводження з побутовими відходами на територіях селищних громад. *Практична значимість.* Практична значимість полягає у створенні ефективної системи управління побутовими відходами на територіях селищних громад, тобто використання горючих фракцій побутових відходів і торфу як сировини, наприклад, для об'єктів малої енергетики, та/або можливості заміщення відповідних обсягів традиційних енергоресурсів, альтернативними.

Ключові слова: теплотворна здатність; побутові відходи; горючі фракції; торф; композиційна паливна суміш.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На сьогодні вплив та наслідки військових дій вимагають пошуку альтернативних варіантів тепло- та енергопостачання, більш ефективних та автономних, нових видів палива, особливо для децентралізованих систем малої комунальної енергетики. Відповідно до закону України «Про управління відходами» від 20 червня 2022 року №2320-IX [1], окреслені наступні принципи управління відходами: запобігання утворенню відходів; підготовка відходів до повторного використання; рециклінг; відновлення відходів (у тому числі для виробництва енергії); видалення відходів. Частка відходів, які в даний час сортуються, дуже мала, оскільки сортуються тільки макулатура, яка має товарний вигляд, пластикові пляшки, скляні та металобрухт. Одним із напрямів знешкодження побутових відходів (далі – ПВ) є термічне перероблення їх горючих фракцій.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Суттєвою перевагою використання ПВ в якості джерела енергії є постійне зростання їх його кількості та зручне розташування – в населених пунктах, поруч зі споживачами енергії. Провідні країни світу вже багато років розглядають побутові відходи як постійно зростаюче альтернативне джерело енергії, здатне замінити природний газ при виробництві теплової і електричної енергії шляхом часткового переведення ТЕЦ або котелень на паливо з відходів [2–4].

Серед відомих в Україні нетрадиційних видів твердих палив значну увагу почали надавати торфу [5, 6]. Аналіз літературних джерел [7] показує, що на території Полтавської області є значні запаси родовищ торфу.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Визначення теплоти згоряння горючих фракцій побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини для розуміння можливості їх подальшого використання як сировини, наприклад, для об'єктів малої енергетики, та/або можливості заміщення відповідних обсягів традиційних енергоресурсів, альтернативними.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Застосовано експериментальний метод визначення теплотворної здатності палива за допомогою калориметру. Використано наукові методи порівняльного аналізу отриманих експериментальних даних та метод систематизації.

Об'єкт дослідження – горючі фракції побутових відходів відповідно до морфологічного складу селища Котельва Полтавського району Полтавської області та торф з родовищ Полтавщини.

Предмет дослідження – нижча теплота згоряння горючих фракцій побутових відходів і торфу.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Значне зростання обсягів утворення та накопичення побутових відходів на території Полтавської області призводить до подальшого збільшення кількості сміттєзвалищ, зокрема, несанкціонованих, що у свою чергу викликає засмічення значних площ земель та збільшення емісій забруднювачів у різні компоненти довкілля. Поряд з цим, видаляючи побутові відходи на сміттєзвалища, втрачаються потенційно значні обсяги ресурсоцінних матеріалів, які можуть служити вторинною сировиною та замінювати традиційні невідновлювані природні ресурси [8].

У рамках науково-дослідної роботи, виконаної в межах білатерального міжнародного наукового співробітництва з Республікою Австрія за темою «Дослідження складу твердих побутових відходів та їх ресурсного потенціалу» [9], було здійснено планування та проведення серії власних сортувальних аналізів побутових відходів на території Котельвської громади Полтавської області (Україна) у період 2023–2024 роки. Про вибір даної громади, як об'єкту дослідження морфологічного складу побутових відходів, описано в [9]. Сортувальні аналізи здійснювалися із урахуванням методичних рекомендацій України [10, 11] та окремих положень європейських методологій «Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranaysen» і SWA-Tool [12, 13]. У даній статті за результати досліджень компонентного складу побутових відходів приймалися ті, що виконані згідно української методики [10, 11]. Для розуміння вмісту лише горючих фракцій побутових відходів у загальній пробі здійснено перерахунок, що дав змогу визначити частку ресурсоцінних компонентів, характерну для кожного сезону року проведених досліджень (табл. 1).

Таблиця 1. Узагальнені результати досліджень компонентного складу побутових відходів

Пори року	Відсотковий вміст відходу в загальній масі горючих фракцій, %			
	Папір і картон	Пластик (пластмаси та інші полімери)	Текстиль	Деревина
Осінь	22,42	58,82	8,02	1,5
Зима	13,85	41,57	15,0	1
Весна	32,0	64,3	4,0	0,5
Літо	28,97	36,77	11,26	0,5

У ході виконання даної роботи використовувалися такі методи, як метод систематизації, узагальнення й якісного оцінювання отриманих експериментальних результатів.

Визначення теплоти згоряння палива – це один з основних методів оцінки його енергетичної цінності. Теплоту згоряння визначають двома методами: експериментальним і розрахунковим. Сутність експериментального методу визначення теплоти згоряння

палива полягає в спалюванні проби досліджуваного палива (побутових відходів і торфу) в середовищі кисню у герметично закритому металевому посуді (калориметричній бомбі), зануреному в воду. При цьому вся теплота палива, що виділяється, сприймається водою і вимірюється. Знаючи масу води, зміни її температури, можна обчислити теплоту згоряння [14].

У роботі експериментально визначено теплоту згоряння палива за допомогою калориметра (рис. 1). Основна функція калориметра – вимірювання кількості теплоти, що виділяється або поглинається під час хімічних реакцій, зокрема при горінні.



Рис. 1. Калориметр для визначення теплотворної здатності палива

Для визначення теплотворної здатності горючих фракцій побутових відходів і торфу було підготовлено досліджувані зразки. Цей етап має вирішальне значення, адже теплотворна здатність побутових відходів і торфу є ключовим показником, який визначає їх ефективність як джерела теплової енергії. Для виконання досліджень проби горючих матеріалів були ретельно відібрані та підготовлені.

Першим кроком дослідження стало подрібнення дослідних зразків побутових відходів і торфу. Для цього використали подрібнювач, щоб перетворити зразки на дрібнодисперсну масу з метою забезпечення однорідності матеріалу та підвищення точності наступних вимірювань теплотворної здатності (рис. 2).

Подрібнена маса кожного виду відходу й торфу була далі використана для формування паливних «таблеток» за допомогою пресу. Для формування «таблеток» з пластику, текстилю та торфу було застосовано газовий пальник, який за рахунок невеликого підігріву розм'якшував структуру досліджуваного компоненту (рис. 3).

Процес пресування дозволив створити стандартизовані зразки (рис. 4, а) по три «таблетки» кожного типу відходів і торфу для зменшення похибки вимірювань, що містить мідний дріт, за допомогою якого запалюється досліджуваний зразок у чаші калориметричної бомби (рис. 4, б).



Рис. 2. Подрібнена маса



Рис. 3. Процес нагрівання газовим пальником досліджуваного компоненту

Вага кожної таблетки з мідним дротом становила $1 \text{ г} \pm 0,1 \text{ г}$ (рис. 5).

Використовуючи калориметр, було виміряно теплотворну здатність кожного досліджуваного зразка побутових відходів, відповідно до морфологічного складу, та торфу родовищ Полтавщини. На основі отриманих результатів розраховано вищу та нижчу теплоту згоряння за формулами:

Вища теплота згоряння:

$$Q_{вр} = ((Q + \Delta Q_i) - q_{Cu}) / m_{табл} / 1000 / 1000, \text{ МДж/кг}, \quad (1)$$

де Q – кількість теплоти, що виділилася при нагріванні води, Дж; ΔQ_i – втрати теплоти в навколишнє середовище, Дж; q_{Cu} – кількість теплоти виділена при згоранні міді, Дж; $m_{табл}$ – маса таблетки досліджуваного зразку (без маси мідного дроту), г.

$$\Delta Q_i = A \cdot (\Delta t_0 + (t_{i-1} + t_i) / 2) \cdot \Delta Z_i, \text{ Дж}, \quad (2)$$

де A – коефіцієнт втрат теплоти калориметром, Вт/°С; Δt_0 – базова різниця температур, °С; t_i – температура за певний проміжок часу, °С; ΔZ_i – зміна часу, с.



Рис. 4. Досліджувані зразки з мідним дротом : а – стандартизовані «таблетки» зі впресованим мідним дротом; б – стандартизовані «таблетки» з витягнутими «вусиками» мідного дроту

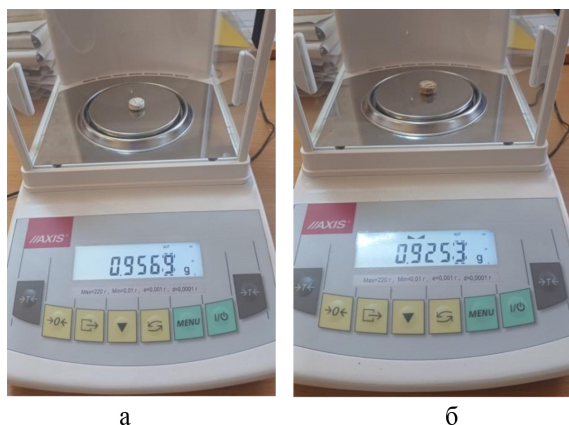


Рис. 5. Зважування зразків на аналітичних вагах: а – таблетка з пластику (поліпропілен); б – таблетка з деревної стружки (ясен)

Базову різницю температур визначено за формулою

$$\Delta t_0 = t_{0\text{Бекмана}} - t_{\text{навк}} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

де $t_{0\text{Бекмана}}$ – температура «0» термометра Бекмана, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{навк}}$ – температура навколишнього середовища, $^\circ\text{C}$.

$$q_{\text{Cu}} = (\Delta H / M_{\text{Cu}}) \cdot m_{\text{дроту}}, \text{ Дж}, \quad (4)$$

де ΔH – теплота горіння міді кристалічної, яка дорівнює 162 000 Дж/моль; M_{Cu} – молярна маса Cu, яка дорівнює 63,55 г/моль; $m_{\text{дроту}}$ – маса мідного дроту, г.

Нижча теплота згорання:

$$Q_{\text{нр}} = ((Q + \Delta Q_i) - q_{\text{Cu}} - Q_{\text{вп}} \cdot 1000) / m_{\text{табл}} / 1000 / 1000, \text{ МДж/кг}, \quad (5)$$

де Q – кількість теплоти, що виділилася при нагріванні води, Дж; ΔQ_i – втрати теплоти в навколишнє середовище, Дж; q_{Cu} – кількість теплоти міді, кДж; $Q_{\text{вп}}$ – теплота конденсації водяної пари, кДж; $m_{\text{табл}}$ – маса таблетки досліджуваного зразку, г

$$Q_{\text{вп}} = m_{\text{конд}} \cdot q_{\text{конд}} / 1000, \text{ кДж}, \quad (6)$$

де $m_{\text{конд}}$ – маса зконденсованих водяних парів, г; $q_{\text{конд}}$ – теплота конденсації водяної пари, кДж/кг, яка дорівнює 1891 кДж/кг.

Для аналізу та оброблення даних дослідження було використано програмне забезпечення Microsoft Excel. У табл. 2 наведені результати обчислення нижчої теплоти згорання, яка впливає з розрахунків вищої теплоти згорання.

З табл. 2 видно, що середнє значення теплоти згорання коливається від 8,872 МДж/кг (папір глянцекий) до 34,582 МДж/кг (пластик (поліпропілен)) залежно від конкретного типу досліджуваного компоненту.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Характеризуючи кожен досліджуваний елемент, варто звернути увагу на папір глянцекий, який має найменшу теплоту згорання. Під час дослідження встановлено, що даний компонент має не лише низьку теплотворну здатність, а й високу зольність, що спричинена високим вмістом негорючих мінеральних речовин. Тому, доречно, буде не використовувати цю складову побутових відходів як паливо. Звідси впливає, що теплова цінність відходів прямо пропорційна вмісту вуглецю у відходах і обернено пропорційна зольності і вмісту вологи.

Таблиця 2. Нижча теплота згоряння дослідних зразків

Вид палива	Папір і картон (50:50)	Папір глянцевиий	Пластик		Текстиль	Деревина		Торф
			Поліпропілен (PP)	Поліетилен (LDPE)*		Ясен	Сосна	
Теплота згоряння, МДж/кг	13,657	8,996	33,739	34,645	11,012	15,689	18,298	14,322
	15,105	8,887	30,854	34,312	14,197	16,307	17,904	14,951
	15,040	8,732	39,153	34,098	14,537	15,893	18,080	13,629
Середнє значення, МДж/кг	14,601	8,872	34,582	34,352	13,249	15,963	18,084	14,301

Примітка: * LDPE – поліетилен високого тиску, низької щільності.

Що стосується деревини (ясену й сосни), доцільно застосовувати як компонент палива саме сосну, оскільки вона виділяє більшу теплоту (18,084 МДж/кг) порівняно з ясенем (15,963 МДж/кг) та має зв'язувальні властивості завдяки особливостям структури.

У експериментальній роботі досліджувалося два види пластику: поліпропілен та поліетилен високого тиску, низької щільності, які найчастіше притаманні морфологічному складу побутових відходів населених пунктів селищної місцевості. Як показують результати, саме поліпропілен дає найбільшу теплоту згоряння (34,582 МДж/кг).

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження вказують на перспективність створення композиційної суміші на основі горючих фракцій побутових відходів і торфу, яка буде характеризуватися високою теплоотою згорання за рахунок частки висококалорійних видів ПВ та низьким рівнем викидів, за рахунок використання торфу, як складової, що має адсорбційні властивості. Розроблення паливних композиційних сумішей та їх спалювання, дозволить мінімізувати вплив горючих фракцій побутових відходів на довкілля, надаючи можливість отримати теплову енергію.

REFERENCES

- [1] Verkhovna Rada Ukrainy (2022) Zakon Ukrainy «Pro upravlinnia vidkhodamy» vid 20.06.2022 №2320-IX [Law of Ukraine «On Waste Management» of 20.06.2022 no. 2320-IX]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>.
- [2] Department for Environment, Food & Rural Affairs (2025). Retrieved from: <https://www.gov.uk/government/organisations/departments-for-environment-food-rural-affairs>.
- [3] World Bank Group (2025). URL: <https://www.worldbank.org/ext/en/home>.
- [4] Mizhnarodna asotsiatsiia z tverdykh vidkhodiv (2025). Retrieved from: <https://www.iswa.org/index.php?eID=tx...download>.
- [5] Saranchuk, V. I., Iliashov, M. O., Oshovskyi, V. V., Biletskyi, V. S. (2008) Osnovy khimii i fizyky horiuchykh kopalyn : navch. posib. [Fundamentals of chemistry and physics of fossil fuels: textbook]. Donetsk. 640 p.
- [6] Sniezhkin, Yu. F., Korinchuk, D. M. (2022) Torf – efektyvnyi alternatyvnyi vyd palyva [Peat is an effective alternative fuel]. Teplofizyka ta teploenerhetyka. T. 44, no. 3. Pp. 5–15.
- [7] Vydobutok torfu v Ukraini: dotsilnist vidnovlennia torfovysshch (2024) [Peat extraction in Ukraine: feasibility of peatland restoration]. Retrieved from: <https://geogroup.com.ua/blog/vydobutok-torfu-v-ukrayini-dotsilnist-vidnovlennia-torfovysshh/>
- [8] Illiash, O. E., Holik, Yu. S. (2023). Doslidzhennia resursnoho potentsialu pobutovykh vidkhodiv u Poltavskii oblasti [Research on the resource potential of household waste in the Poltava region]. Problemy okhorony pratsi v Ukraini, 39 (1–2), pp. 47–54.
- [9] Zvit pro naukovu-doslidnu robotu za dohovorum vid 07.05.2024 № M/26-2024 «Doslidzhennia skladu tverdykh pobutovykh vidkhodiv ta yikh resursnoho potentsialu» (2024) [Report on research work under the contract dated 07.05.2024 No. M/26-2024 «Research on the composition of solid household waste and its resource potential»] Poltava. 185 p.
- [10] Verkhovna Rada Ukrainy (2010) Nakaz “Pro zatverdzhennia Metodychnykh rekomendatsii z vyznachennia morfolohichnoho skladu tverdykh pobutovykh vidkhodiv” vid 16.02.2010 №39 [Order “On Approval of Methodological Recommendations for Determining the Morphological Composition of Solid Municipal Waste” dated 16.02.2010 No. 39]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0039662-10#Text>
- [11] Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy (2024) Metodychni rekomendatsii z vyznachennia morfolohichnoho skladu pobutovykh vidkhodiv vid 03.05.2024 № 409 [Methodological recommendations for determining the morphological composition of household waste dated 03.05.2024 No. 409]. Retrieved from: <https://mtu.gov.ua/documents/2485.html>
- [12] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) (2021) Leitfadens für die Durchführung von Restmüll-Sortieranaysen.
- [13] SWA-Tool (2024). Verfügbar unter. Retrieved from: <https://www.wien.gv.at/meu/fdb/pdf/swa-tool-759-ma48.pdf>
- [14] Skliarenko, Ye. V., Vorobiov, L. Y. (2023) Kalorymetrichna metodyka vyznachennia teploty zghoriannia palyv z tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Calorimetric method for determining the heat of combustion of fuels from solid household waste]. Modern engineering and innovative technologies, 29 (1), pp. 39–54.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Верховна Рада України (2022). Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 №2320-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
- [2] Department for Environment, Food & Rural Affairs (2025). URL: <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-environment-food-rural-affairs>
- [3] World Bank Group (2025). URL: <https://www.worldbank.org/ext/en/home>
- [4] Міжнародна асоціація з твердих відходів (2025). URL: <https://www.iswa.org/index.php?eID=tx...download>
- [5] Саранчук, В. І., Ільяшов, М. О., Ошовський, В. В., Білецький, В. С. (2008) *Основи хімії і фізики горючих копалин : навч. посіб.* Донецьк. 640 с.
- [6] Снєжкін, Ю. Ф., Корінчук, Д. М. (2022) Торф – ефективний альтернативний вид палива. *Теплофізика та теплоенергетика*. Т. 44, №3. С. 5–15.
- [7] Видобуток торфу в Україні: доцільність відновлення торфовищ (2024) URL: <https://geogroup.com.ua/blog/vydobutok-torfu-v-ukrayini-doczilnist-vidnovlennya-torfovyshh/>.
- [8] Ілляш, О. Е., Голік, Ю. С. (2023). Дослідження ресурсного потенціалу побутових відходів у Полтавській області. *Проблеми охорони праці в Україні*, 39(1–2), С. 47–54.
- [9] Звіт про науково-дослідну роботу за договором від 07.05.2024 № М/26-2024 «Дослідження складу твердих побутових відходів та їх ресурсного потенціалу» (2024) Полтава. 185 с.
- [10] Верховна Рада України (2010) Наказ «Про затвердження Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів» від 16.02.2010 №39. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0039662-10#Text>
- [11] Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України (2024) Методичні рекомендації з визначення морфологічного складу побутових відходів від 03.05.2024 № 409. URL: <https://mtu.gov.ua/documents/2485.html>
- [12] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) (2021) Leitfadens für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen.
- [13] SWA-Tool (2024). Verfügbar unter. URL: <https://www.wien.gv.at/meu/fdb/pdf/swa-tool-759-ma48.pdf>
- [14] Склярєнко, Є. В., Воробйов, Л. Й. (2023) Калориметрична методика визначення теплоти згоряння палив з твердих побутових відходів. *Modern engineering and innovative technologies*, 29 (1), С. 39–54.

© Голік Ю. С., Серга Т. М.

Дата надходження статті до редакції: 25.08.2025

Дата затвердження статті до друку: 10.09.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0