

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-78-83>

УДК 629.4.015

ОЦІНКА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПОДОВЖЕННЯ МІЖРЕМОНТНИХ ПРОБІГІВ КОЛІСНИХ ПАР ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Воробйов О.В.

EVALUATION OF CURRENT METHODS FOR EXTENDING THE INTERVALS BETWEEN REPAIRS OF RAILWAY WHEEL SETS

Vorobiov O.V.

Робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі оцінки та систематизації сучасних методів підвищення експлуатаційної надійності й подовження міжремонтних пробігів колісних пар залізничного транспорту. Обґрунтовано, що колісні пари є критичними елементами безпеки, на які припадає близько 10 % відмов технічних засобів, а процеси у системі «колесо-рейка» безпосередньо визначають рівень ресурсозбереження перевезень. У дослідженні проаналізовано домінуючі механізми деградації поверхонь кочення: контактну втому, абразивний знос та термічні пошкодження. На основі вивчення вітчизняного та закордонного досвіду систематизовано методи подовження ресурсу, які класифіковано на чотири основні групи: конструкційні, технологічні, експлуатаційні та методи утримання колії. Встановлено, що серед конструкційних заходів пріоритетним є впровадження адаптивних ремонтних профілів (типу ДМетІ, ІТМ) з нелінійною твірною. Це забезпечує конформний контакт, рівномірний розподіл навантаження та покращення кінематичної стабільності руху. У розрізі технологічних методів оцінено ефективність хіміко-термічної обробки та плазмового зміцнення. Визначено, що головним критерієм якості є створення поверхневого шару з оптимальним балансом твердості та в'язкості, а також формування залишкових напружень стиснення, які служать бар'єром для розвитку втомних тріщин. Детально розглянуто експлуатаційні методи, серед яких найвищу ефективність демонструє примусова лубрикація зони «гребінь-рейка», що дозволяє знизити коефіцієнт тертя до 0,08-0,12 та зменшити інтенсивність зносу у 2,5-4 рази. Обґрунтовано важливість стратегії ротації колісних пар для компенсації нерівномірного зносу

(гребені набігаючої осі зношуються на 40-60 % швидше). Також наголошено на впливі інфраструктури: дотримання допусків ширини колії та профілактичне шліфування рейок здатні знизити витрати на відновлення коліс на 15-25 %. За результатами роботи зроблено висновок, що максимальний ефект досягається завдяки синергії розглянутих методів. Для вантажного руху рекомендовано комбінацію зміцнення гребенів та лубрикації, а для швидкісного — використання адаптивних профілів. Комплексний підхід дозволяє збільшити загальний ресурс колісних пар на 30-50 % та мінімізувати вартість життєвого циклу рухомого складу.

Ключові слова: система «колесо-рейка», гребінь колеса, знос, контактна втома, адаптивний профіль, лубрикація, прогнозоване обслуговування, ресурс.

Вступ. Колісні пари є одним із найбільш критично важливих елементів безпеки та експлуатаційної надійності залізничного транспорту. Їхній стан безпосередньо впливає на динамічні якості рухомого складу, витрати на технічне обслуговування та загальну ефективність перевезень.

Взаємодія в контактній парі «колесо-рейка» виступає ключовим фактором, що визначає рівень ресурсозбереження залізничних перевезень та гарантування безпеки руху. Деградація профілів поверхонь кочення відображає реальний напружено-деформований стан системи та характер зношування. Як свідчать дані моніторингу, еволюційна зміна форми профілю здатна кардинально (у декілька

разів) змінювати параметри динамічної взаємодії, впливаючи на стійкість руху [1, 5, 7].

В умовах впровадження високошвидкісного руху та вантажних перевезень, пріоритетним напрямком наукових пошуків стає вдосконалення взаємодії елементів системи «колесо-рейка». Обґрунтування раціональних технічних рішень вимагає глибокого аналізу умов експлуатації та математичного моделювання, оскільки це безпосередньо впливає на економічну ефективність та строки служби інфраструктури й рухомого складу.

Сучасні методики спрямовані на покращення якості матеріалів, оптимізацію профілю коліс, впровадження ефективніших систем моніторингу та застосування інноваційних технологій відновлення.

Аналіз літературних джерел підкреслює багатовекторність досліджень, спрямованих на подовження міжремонтних пробігів колісних пар. Роботи [4] акцентують увагу на необхідності оптимізації матеріалу колісних пар, зазначаючи, що використання нових легованих сталей є критичним для підвищення їхньої опірності контактно-втомному руйнуванню. Цей матеріалознавчий аспект тісно пов'язаний з механікою взаємодії, яку досліджував Курган, Д. М. [6]. Вони дійшли висновку, що зниження напружень у зоні контакту «колесо-рейка», досягнуте завдяки адаптивним профілям, є ключовим фактором подовження ресурсу, за рахунок кращих динамічних характеристик. Фундаментальні основи цієї взаємодії, зокрема вплив геометрії коліс на зношування рейкової колії, були викладені у праці [8].

Дослідження Ткаченка В.П. [7] присвячені питанням експлуатаційної надійності бандажних колісних пар. Автор детально аналізує причини такого поширеного дефекту, як послаблення бандажів, і пропонує заходи для запобігання цій несправності, що є критичним для забезпечення безпеки та подовження міжремонтного ресурсу. У той же час, роботи Сапронової С.Ю. [5] зосереджені на удосконаленні технологій ремонту та діагностики колісних пар. Її внесок лежить у сфері підвищення якості відновлювальних робіт та забезпечення ефективного неруйнівного контролю після ремонту, що прямо впливає на підвищення ресурсу. Усі ці технічні та наукові аспекти роботи, від матеріалу до геометрії, повинні відповідати жорстким міжнародним вимогам, що регулюються Міжнародним

союзом залізниць [9], які встановлюють технічні стандарти для постачання необроблених коліс. Таким чином, наукова спільнота сходиться на думці, що ефективне подовження ресурсу вимагає комплексного підходу: удосконалення матеріалів, оптимізації геометрії та суворого дотримання міжнародних стандартів. У зв'язку з цим метою роботи є аналіз, оцінка та систематизація сучасних інженерних та технологічних методів до збільшення терміну служби колісних пар залізничного транспорту.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати основні фактори та домінуючі механізми зношування і пошкодження колісних пар (контактна втома, абразивний знос, термічні дефекти) в сучасних умовах експлуатації.

2. Систематизувати сучасні інженерні (оптимізація профілів, лубрикація) та технологічні (хіміко-термічна обробка, плазмове зміцнення) методи, спрямовані на підвищення ресурсу коліс.

3. Оцінити ефективність та економічну доцільність впровадження розглянутих методів подовження міжремонтних пробігів для різних умов експлуатації рухомого складу.

Основна частина. Згідно з галузевою статистикою, значні економічні втрати залізничної індустрії пов'язані з вимушеними затримками поїздів, які є наслідком технічних несправностей рухомого складу. І хоча найбільша частка відмов припадає на електричне обладнання локомотивів (близько 60 % від загальної кількості) та тягові електродвигуни (у середньому 15 %), проблеми, безпосередньо пов'язані з безпекою руху, є найбільш критичними. Серед них виділяється значна кількість відмов колісних пар, яка становить близько 10 % від загальної кількості.

Грунтовний аналіз наукових праць, присвячених системі «колесо-рейка», демонструє, що інтенсивний знос як колісних пар, так і рейок, обумовлений комплексним впливом численних причин. Ці причини корелюють як із динамічними характеристиками та технічним станом локомотивів і вагонів, так і з параметрами геометрії та стану рейкової колії.

Методика проведення експериментальних досліджень. Інтенсивність зносу визначається особливостями руху поїзда в цілому, а також локомотива, вагона та окремої колісної пари. Оскільки тертя є складним процесом, під час вивчення зношування необхідно враховувати

багато чинників, набір яких змінюється залежно від умов: властивості колії, параметри рухомого складу, характеристики третього тіла та вплив навколишнього середовища (рис. 1).

Способи збільшення ресурсу бандажів, залежно від спільних ознак і специфіки їх реалізації, можна поділити на чотири основні групи (рис. 2): конструкційні, технологічні, експлуатаційні та пов'язані з якістю утримання колії. З *конструкційних методів* слід виділити найбільш ефективні, які закладають фундамент довговічності ще на етапі проектування та відновлення системи взаємодії.



Рис. 1. Фактори, які впливають на знос колісних пар

Пріоритетним напрямком у цій групі є оптимізація геометрії поверхонь кочення шляхом впровадження адаптивних ремонтних профілів, зокрема типів ДМетІ та ІТМ, які мають нелінійну твірну. Застосування такої геометрії дозволяє забезпечити максимально щільний контакт у системі «колесо-рейка», що сприяє рівномірному розподілу навантаження по плямі контакту та суттєвому зниженню пікових значень контактних напружень. Це технічне рішення не лише мінімізує інтенсивність підрізу гребенів при проходженні кривих ділянок колії завдяки покращенню вписування екіпажу, але й підвищує кінематичну стабільність руху на прямих ділянках, зменшуючи шкідливу амплітуду виляння колісної пари.



Рис. 2. Методи підвищення ресурсу бандажів колісних пар

Технологічні методи підвищення ресурсу бандажів повинні відповідати комплексу суворих інженерних та експлуатаційних вимог, що гарантують не лише збільшення зносостійкості, а й збереження надійності колісної пари в умовах інтенсивних циклічних навантажень. Ключовим критерієм ефективності будь-якого технологічного впливу, чи то плазмового зміцнення, лазерної обробки або об'ємного гартування, є забезпечення оптимального поєднання високої твердості поверхневого шару з достатньою пластичністю та ударною в'язкістю основного металу. Сформована на поверхні гребеня або кочення зміцнена структура повинна ефективно протистояти абразивному зношуванню та пластичній деформації, однак при цьому не бути схильною до крихкого руйнування, що унеможливує утворення небезпечних дефектів у вигляді вищербин, відколів або термічних тріщин під час динамічних ударів на стиках та нерівностях колії. Критично важливою вимогою до технологій термічної модифікації є створення сприятливого поля залишкових напружень стиснення у поверхневих шарах металу, які слугують бар'єром для зародження та розповсюдження контактно-втомних тріщин, тоді як виникнення розтягуючих напружень є неприпустимим фактором ризику.

Ключовим та найбільш ефективним заходом у групі експлуатаційних методів є примусова лубрикація зони контакту «гребінь колеса – бокова грань головки рейки», яка дозволяє зменшити коефіцієнт тертя з критичних значень 0,30-0,35, характерних для сухого контакту, до оптимального діапазону 0,08–0,12. Реалізація цього методу за допомогою бортових гребнезмашувачів або стаціонарних колійних лубрикаторів забезпечує зниження інтенсивності абразивного зносу гребеня у 2,5-4 рази, що на практиці трансформується у збільшення міжремонтного пробігу колісних пар на 30–50 % залежно від частки кривих ділянок на маршруті. При цьому критично важливою умовою є точне дозування мастильного матеріалу, оскільки його потрапляння на поверхню кочення призводить до падіння коефіцієнта зчеплення нижче 0,10-0,15, що провокує буксування із подальшим утворенням повзунів глибиною до 1-2 мм навіть при короткочасному блокуванні колеса. Окрім лубрикації, значний вплив має оптимізація режимів керування тягою та гальмуванням, а також стратегія ротації колісних пар, яка базується на нерівномірності зносу: оскільки

гребені коліс першої (набігаючої) осі візка зношуються на 40-60 % інтенсивніше за інші, їх своєчасна перестановка на менш навантажені позиції або розворот візка дозволяє вирівняти знос та подовжити загальний термін служби комплекту коліс.

Окрему групу формують методи, які застосовуються під час укладання, ремонту та утримання колії, оскільки геометрія та фізико-механічний стан рейкового полотна виступають первинними чинниками, що детермінують характер силової взаємодії та інтенсивність зносу рухомого складу. Фундаментальним заходом у цій сфері є регулярне профілактичне шліфування рейок, що забезпечує зниження динамічних навантажень на колесо у 1,5-2 рази та зменшує рівень вібраційного впливу до безпечних меж.

Критично важливим аспектом є суворе дотримання допусків ширини колії, особливо в кривих ділянках радіусом менше 350-600 м, де навіть незначне звуження колії понад нормативні значення або порушення подуклонки рейок провокує різке зростання сил тертя гребеня та прискорення його зносу на 20-30 % через виникнення защемлення або двоточкового контакту. Не менш значущим є забезпечення проєктного підвищення зовнішньої рейки в кривих, яке має точно компенсувати непогашені відцентрові прискорення; відхилення цього параметра від розрахункового призводить до перерозподілу вертикальних навантажень. Ліквідація просадок на стиках та перекосів дозволяє стабілізувати траєкторію руху візка, мінімізувати кути набігання колеса на рейку та подовжити загальний ресурс бандажів шляхом запобігання ударним навантаженням, що в сукупності здатне знизити питомі витрати на відновлення колісних пар на 15-25 % в масштабах залізничної мережі.

Результати експериментальних досліджень та їхній аналіз. Експлуатаційний цикл колісної пари графічно можна описати кривою зносу, яка чітко розділяється на три характерні періоди, що мають відмінну фізичну природу та інтенсивність руйнування матеріалу (рис. 3). Початковий етап, обмежений пробігом l_1 , є періодом інтенсивного обкатування, під час якого спостерігається стрімке зростання об'єму зношеного матеріалу, зумовлене пластичною деформацією та зрізанням мікронерівностей на поверхні кочення до моменту формування стабільної плями контакту та зміцнення поверхневого шару металу. Після завершення процесу адаптації геометрії настає другий,

найбільш тривалий та економічно ефективний етап нормальної експлуатації, що триває до пробігу l_2 і характеризується стабілізованим, майже лінійним та мінімальним темпом зношування, що свідчить про встановлення рівноважного стану в трибологічній системі «колесо-рейка».

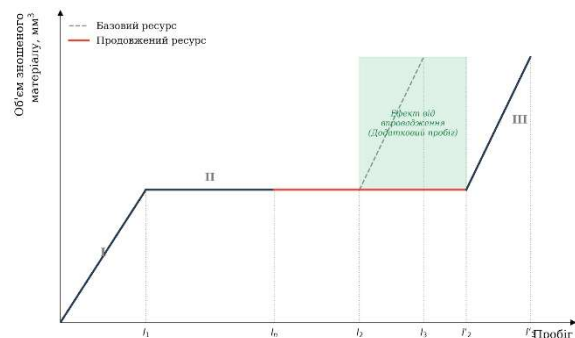


Рис. 3. Експлуатаційний цикл колісної пари

Однак безперервна циклічна дія навантажень неминує призводить до накопичення втомних пошкоджень у структурі металу, через що після проходження критичної точки l_2 система переходить у третій етап катастрофічного зносу, де інтенсивність руйнування різко зростає через зміну фізико-механічних властивостей поверхні, виникнення вищербин та втомних тріщин, роблячи подальший рух небезпечним. Стратегія подовження ресурсу полягає у впровадженні профілактичних заходів, таких як ротація колісних пар або проміжне обточування, на пробігу l_n , тобто ще до настання фази руйнування, що дозволяє штучно пролонгувати зону нормального зносу та змістити точку переходу до аварійного стану до значення l'_2 , забезпечуючи тим самим значний приріст корисного пробігу без загрози безпеці руху.

Економічна ефективність впровадження методів подовження ресурсу колісних пар базується на критерії мінімізації вартості життєвого циклу і вимагає диференційованого підходу залежно від типу перевезень. Для вантажного рухомого складу найбільш доцільним є поєднання плазмового зміцнення гребенів та лубрикації, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати на 25-30 %, тоді як у швидкісному русі пріоритет надається використанню адаптивних профілів та прецизійному шліфуванню рейок для забезпечення стабільності ходу. Загалом, найвищий результат забезпечує синергія інженерних і технологічних рішень у поєднанні

зі стратегією прогнозованого обслуговування, яка зміщує фокус з аварійних ремонтів на профілактичне відновлення геометрії колеса в зоні нормального зносу.

Висновки

1. Встановлено, що життєвий цикл колісної пари підпорядковується закономірностям тристадійної кривої зносу: етапу обкатування, стабільної експлуатації та катастрофічного руйнування. Домінуючими факторами, що лімітують ресурс, є комплексний вплив контактно-втомних напружень, абразивного тертя у кривих та термічних навантажень при гальмуванні. Критичним моментом для подовження ресурсу визначено точку переходу від нормального зносу до інтенсивного руйнування (I_2), відтермінування якої є головним завданням технічного обслуговування.

2. Систематизація методів підвищення довговічності показала, що найбільш дієвим конструкційним заходом є впровадження адаптивних профілів (типу ДМетІ, ІТМ) з нелінійною кривою, які забезпечують конформний контакт і знижують контактні напруження. У технологічному аспекті пріоритетним є застосування локального зміцнення (плазмового, лазерного), яке дозволяє сформувати на поверхні кочення структуру з оптимальним балансом високої твердості та ударної в'язкості, створюючи бар'єр для розвитку втомних тріщин.

3. Доведено, що без забезпечення належного стану інфраструктури ефективність модернізації коліс суттєво знижується. Серед експлуатаційних заходів найвищий економічний ефект демонструє технологія примусової лубрикації зони «гребінь-рейка», яка здатна зменшити інтенсивність зносу у 2,5-4 рази, а також стратегія ротації колісних пар, що дозволяє вирівняти знос у межах візка.

4. Обґрунтовано, що максимальне збільшення міжремонтних пробігів досягається не окремими заходами, а синергією конструкційних, технологічних та експлуатаційних методів у рамках стратегії прогнозованого обслуговування. Впровадження профілактичних відновлювальних заходів (обточування, ротація) на етапі стабільного зносу (I_n), не чекаючи появи критичних дефектів, дозволяє штучно пролонгувати зону ефективної експлуатації та збільшити загальний ресурс колісних пар до 30-50 %.

Література

1. Бахман С.О. Технологічні аспекти відновлення залізничних колісних пар: методи підвищення ефективності. Технічна інженерія, 2025, 1 (95). С. 31-44.
2. Скуріхін, Д. І. Удосконалення технології технічного обслуговування та діагностики колісних пар пасажирських вагонів на основі методу акустичного контролю : автореф. дис. ...канд. техн. наук : 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів / Д. І. Скуріхін; Держ. н.-д. центр заліз. трансп. України. - Київ, 2014. - 24 с..
3. Мокрій, Т.Ф., Соболевська, М.Б., Ковтун, О.М., Лапіна, Л.Г., Горобець, Д.В., Пасічник, С.С., Малий, В.В. Оновлення парку рухомого складу українських залізниць з орієнтацією на інтеграцію в європейські транспортні мережі. Технічна механіка, 2024, 3. С. 110-123.
4. Остапчук, В. М. Розвиток наукових основ підвищення зносостійкості деталей та вузлів засобів транспорту під час ремонту: автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту / В. М. Остапчук; Укр. держ. акад. заліз. трансп. - Харків, 2011. - 42 с.
5. Сапронова, С. Ю., Буліч, Д. І., Ткаченко, В. П. Продовження терміну експлуатації вантажних вагонів. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2017, 3. С. 179-182.
6. Курган, Д. М. Визначення динамічного навантаження від колеса на рейку для швидкісних поїздів. 2015.
7. Tkachenko, V., Sapronova, S. Steerability of railway vehicles. Transport problems, 2007, 2(4). 9-16. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSL5-0022-0016>
8. Esveld, C. Modern Railway Track. Zaltbommel: MRT-productions, 2001.
9. International Union of Railways. Leaflet 813-1: Technical Specification for the Supply of Wheels (Unmachined) <https://uic.org>

References

1. Bakhman S.O. Tekhnolohichni aspekty vidnovlennia zaliznychnykh kolisnykh par: metody pidvyshchennia efektyvnosti. Tekhnichna inzheneriia, 2025, 1 (95). S. 31–44.
2. Skurikhin, D. I. Udoskonalennia tekhnolohii tekhnichnoho obsluhovuvannia ta diahnostryky kolisnykh par pasazhyrskykh vahoniv na osnovi metodu akustychnoho kontroliu : avtoref. dys. ...kand. tekhn. nauk : 05.22.07 – rukhomyi sklad zaliznyts ta tiaha poizdiv / D. I. Skurikhin; Derzh. n.-d. tsentr zalizn. transportu Ukrainy. Kyiv, 2014. 24 s.
3. Mokrii, T.F., Sobolevska, M.B., Kovtun, O.M., Lapina, L.H., Horobets, D.V., Pasichnyk, S.S.,

- Malyi, V.V. Onovlennia parku rukhomogo skladu ukrainskykh zaliznyts z oriientsatsiieiu na intehratsiiu v yevropeiski transportni merezhi. Tekhnichna mekhanika, 2024, 3. S. 110–123.
4. Ostapchuk, V. M. Rozvytok naukovykh osnov pidvyshchennia znosostiikosti detalei ta vuzliv zasobiv transportu pid chas remontu: avtoref. dys. ...d-ra tekhn. nauk: 05.22.20 – ekspluatatsiia ta remont zasobiv transportu / V. M. Ostapchuk ; Ukr. derzh. akad. zalizn. transp. Kharkiv, 2011. 42 s.
 5. Sapronova, S. Yu., Bulich, D. I., & Tkachenko, V. P. Prodovzhennia terminu ekspluatatsii vantazhnykh vahoniv. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia, 2017, 3. S. 179–182.
 6. Kurhan, D. M. Vyznachennia dynamichnoho navantazhennia vid koleśa na reiku dla shvydkisnykh poizdiv. 2015.
 7. Tkachenko, V., Sapronova, S. Steerability of railway vehicles. Transport problems, 2007, 2(4). 9-16. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSL5-0022-0016>
 8. Esveld, C. Modern Railway Track. Zaltbommel: MRT-productions, 2001.
 9. International Union of Railways. Leaflet 813-1: Technical Specification for the Supply of Wheels (Unmachined) <https://uic.org>.

Vorobiov O.V. Evaluation of current methods for extending the intervals between repairs of railway wheel sets

The work is devoted to solving the urgent scientific and practical problem of evaluating and systematising modern methods for improving the operational reliability and extending the inter-repair mileage of railway wheel sets. It is substantiated that wheel sets are critical safety elements, accounting for about 10% of technical equipment failures, and that the processes in the wheel-rail system directly determine the level of resource conservation in transportation. The study analyses the dominant mechanisms of rolling surface degradation: contact fatigue, abrasive wear and thermal damage. Based on the study of domestic and foreign experience, methods for extending the service life have been

systematised and classified into four main groups: structural, technological, operational and track maintenance methods. It has been established that among the design measures, the priority is the introduction of adaptive repair profiles (such as DMETI, ITM) with a non-linear generatrix. This ensures conformal contact, uniform load distribution and improved kinematic stability of movement. In terms of technological methods, the effectiveness of chemical-thermal treatment and plasma hardening has been assessed. It has been determined that the main quality criterion is the creation of a surface layer with an optimal balance of hardness and viscosity, as well as the formation of residual compressive stresses, which serve as a barrier to the development of fatigue cracks. Operational methods are considered in detail, among which forced lubrication of the 'cam-rack' zone demonstrates the highest efficiency, allowing the friction coefficient to be reduced to 0.08-0.12 and the wear intensity to be reduced by 2.5-4 times. The importance of the wheel set rotation strategy to compensate for uneven wear (the ridges of the running axle wear 40-60% faster) is substantiated. The impact of infrastructure is also emphasised: compliance with track width tolerances and preventive rail grinding can reduce wheel repair costs by 15-25%. Based on the results of the work, it is concluded that the maximum effect is achieved through the synergy of the methods considered. For freight traffic, a combination of ridge strengthening and lubrication is recommended, and for high-speed traffic, the use of adaptive profiles. A comprehensive approach allows for a 30-50% increase in the overall service life of wheel sets and minimises the life cycle cost of rolling stock.

Key words: wheel-rail system, wheel flange, wear, contact fatigue, adaptive profile, lubrication, predictive maintenance, service life.

Воробйов О.В. – аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: vorobjov_o@snu.edu.ua.

Стаття подана 20.11.2025.