

## ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

---

УДК 66.074

### АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТІ ВМІСТУ НАФТАЛІНУ В КОКСОВОМУ ГАЗІ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ І ТИСКУ

Кандидати техн. наук Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко, А. Д. Череднік, О. А. Логвіненко,  
д-р техн. наук І. О. Редько

### ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF NAPHTHALENE CONTENT IN COKE OVEN GAS ON TEMPERATURE AND PRESSURE

PhD (Tech.) Y. O. Burda, PhD (Tech.) Y. O. Pivnenko, PhD (Tech.) A. D. Cherednik,  
PhD (Tech.) O. A. Lohvinenko, Dr. Sc. (Tech.) I. O. Redko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.301865>



**Анотація.** Дослідження фокусується на аналізі відношення кількості нафталіну в коксовому газі до змін температури і тиску. Мета дослідження – вивчення впливу цих параметрів на концентрацію нафталіну в газовій фазі. Основний акцент зроблено на аналізі температурних і тискових умов, які можуть сприяти ефективному зниженню вмісту нафталіну в коксовому газі. Результати експериментів підтвердили, що зі збільшенням тиску та зниженням температури відбувається істотне зменшення концентрації нафталіну. Однак, з урахуванням важливості екологічних аспектів, виявлено, що мокре газоочищення недостатньо ефективне для досягнення необхідного рівня очищення від нафталіну.

**Ключові слова:** газоочищення, нафталін, скруббер, екологія, аналіз експериментів, коксовий газ.

**Abstract.** The study is dedicated to analyzing the dependence of naphthalene content in coke oven gas on temperature and pressure. The research aimed to investigate the influence of these parameters on the concentration of naphthalene in the gas phase. The primary focus was on studying temperature and pressure conditions that could effectively reduce the naphthalene content in coke oven gas.

The experimental results demonstrated a significant decrease in naphthalene concentration with increasing pressure and decreasing temperature. However, considering the importance of environmental aspects, it was found that wet gas cleaning is insufficient to achieve the required level of naphthalene removal.

The use of packing-type scrubbers was proposed as an effective method for reducing naphthalene concentration in coke oven gas. They provide a high level of gas purification while maintaining high productivity and the possibility of reusing the obtained results in production. This approach may prove to be promising in addressing environmental conservation and optimizing technological processes in coke oven gas production.

In addition to the proposed use of packing-type scrubbers, further investigation explored the impact of residence time on naphthalene removal efficiency. The study revealed that longer residence times in the scrubbers led to enhanced removal of naphthalene, highlighting the importance of contact time between the gas and the scrubbing medium.

*Moreover, the research delved into the economic feasibility of implementing these scrubbers in coke oven gas production facilities. Cost-benefit analyses indicated that while the initial investment might be significant, the long-term advantages, including improved environmental compliance and operational efficiency, justified the expenses.*

*To enhance the practical application of the findings, the study considered the scalability of the proposed scrubbing method for different coke oven gas production scales. The results demonstrated that the approach could be adapted for both large-scale industrial operations and smaller facilities, making it a versatile solution for various settings.*

*Furthermore, the study investigated the potential by-products or waste generated during the scrubbing process.*

**Keywords:** *gas purification, naphthalene, scrubber, ecology, experimental analysis, coke oven gas.*

**Вступ.** Дослідження фокусується на розгляді взаємозв'язку між вмістом нафталіну в коксовому газі та змінами температури і тиску. Основна мета полягає у визначенні впливу цих параметрів на концентрацію нафталіну в газовій фазі. Основний акцент робиться на аналізі температурних і тискових умов, які можуть сприяти ефективному зниженню вмісту нафталіну в коксовому газі.

За результатами експерименту встановлено, що зі збільшенням тиску та зниженням температури спостерігається значне зменшення концентрації нафталіну. Однак, враховуючи важливість екологічних аспектів, виявлено, що метод мокрого газоочищення не є достатньо ефективним для досягнення необхідного рівня очищення від нафталіну.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні нові дослідження та публікації, спрямовані на зниження вмісту нафталіну в коксовому газі, свідчать про зростаючий інтерес до розробок, спрямованих на покращення екологічних показників промислових виробництв. Однією з ключових тем досліджень є оптимізація процесів мокрого газоочищення та розуміння впливу температури і тиску на концентрацію нафталіну в газовій фазі [1].

Суттєвою частиною обговорень є урахування переваг та обмежень різних технічних рішень, а також можливостей їхнього впровадження в наявні виробництва. Зокрема, окремі дослідження

фокусується на вдосконаленні параметрів скрубберів, таких як час очищення та конструкційні особливості, з метою оптимізації їхньої ефективності та стабільності [2].

Ці нові підходи відображують перспективи розвитку методів очищення коксового газу від нафталіну, сприяючи впровадженню ефективних та екологічно безпечних технологій у промисловості. У той же час вирішення питань енерго-ефективності та економічної доцільності залишається актуальним завданням для науковців та інженерів у цій галузі.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета дослідження полягає в ретельному аналізі відношення між вмістом нафталіну в коксовому газі та змінами температури і тиску; встановленні впливу цих параметрів на концентрацію нафталіну в газовій фазі. Дослідження спрямоване на виявлення температурних і тискових умов, які сприяють ефективному зниженню вмісту нафталіну в коксовому газі.

Завдання дослідження включають аналіз впливу збільшення тиску та зниження температури на значне зменшення концентрації нафталіну в газовій фазі. Важливо враховувати екологічні аспекти, оскільки результати експериментів підтверджують, що мокре газоочищення може виявитися не досить ефективним для досягнення необхідного рівня очищення від нафталіну. Отже, увагу приділено розробленню та оптимізації методів,

зокрема використання скруберів насадкового типу, зниження концентрації нафталіну в коксовому газі та забезпечення ефективних і екологічно безпечних технологій у промисловості.

**Основна частина досліджень.** В Україні серйозною проблемою є забруднення атмосферного повітря внаслідок промислової діяльності. Наприклад, у 2022 році викиди на душу населення становили 112 кг, що свідчить про зростання забруднення порівняно з 2021 роком (101 кг). Це вказує на застарілість і потребу реконструкції засобів очищення викидів промисловості в атмосферу.

Більшість підприємств чорної металургії обладнані цехами коксування газу, які викидають в атмосферу коксовий газ із високою концентрацією пилу та інших шкідливих сполук.

Аварії в промисловості також призводять до погіршення екологічної ситуації в регіоні. При будівництві потужних промислових об'єктів, зокрема в чорній металургії, важливо вирішувати

питання вентиляції, газоочищення та аспірації.

Негативні впливи антропогенного походження на атмосферу включають значне підвищення рівнів CO та CO<sub>2</sub>, викиди надлишкових сполук сірки, а також фенолів, сполук азоту, хлору і фтору. Крім того, в атмосферу потрапляє додаткове тепло.

Важливим аспектом є також викиди в повітря речовин під час виробництва кольорових металів, що утворюються при згоранні алюмінію, міді, свинцю, олова, цинку, нікелю тощо.

Нижче наведено діаграму компонентів шкідливих викидів від кольорової металургії (рис. 1).

В атмосферу викидаються різні речовини в результаті діяльності хімічної та нафтохімічної промисловості, яка охоплює виробництво кислот, гумових виробів, пластичних мас, барвників, мийних засобів, штучного каучуку, мінеральних добрив, розчинників, крекінгу нафти та інших продуктів [4].



Рис. 1. Концентрація шкідливих речовин кольорової металургії

У хімічній технології поділ газових неоднорідних систем вважається одним із основних процесів. Утворення пилу може статися внаслідок механічного подрібнення твердих тіл, таких як дроблення, стирання, розмелювання, транспортування, а також під час горіння палива, конденсації парів і

хімічної взаємодії газів, що супроводжується утворенням твердого продукту [5].

Отриманий у таких процесах пил містить тверді частинки розмірами 5-102 мкм і містить речовини, що утворюються внаслідок конденсації парів

(нафтові дими, смоли, сірчана кислота тощо) у вигляді дуже дрібних частинок розмірами від 0,004 до 1,4 мкм.

Пил містить тверді частинки розміром від 1 до 551 мкм; дими – від 0,3 до 1,1 мкм. Тумани складаються з крапельок рідини розміром 0,03-5 мкм. Утворюються вони в результаті конденсації пари чи при розпиленні рідини в газі.

Залежність тиску насичених парів нафталіну розрахована за рівнянням

$$L \frac{P^H}{g t} = 5,8099 - \frac{978,66}{78,11+t} \quad (1)$$

Газ, отриманий у результаті процесу коксування вугілля, відомий як коксовий газ, має велике значення для металургійної

промисловості. До його складу входять різні вуглеводні, зокрема ароматичні сполуки, такі як нафталін. Дослідження залежності вмісту нафталіну в коксовому газі від температури і тиску стає ключовим завданням для оптимізації цього процесу (табл. 1).

Нафталін, що є ароматичним вуглеводнем, може впливати на характеристики коксового газу та його використання в промислових процесах. Зокрема, його можна використовувати як вихідний матеріал для виробництва хімічних продуктів, таких як фарби, синтетичні полімери та інші важливі речовини.

Таблиця 1

Характеристика параметра оптимізації

Номер	Характеристика речовини					
	Головні позначення	Значення	Назва	Розмірність	Область значення	Точність
1	$C_t$	$y$	Пари нафталіну	г/100 нм <sup>3</sup> газу	[0; ∞]	5 %

Присутність нафталіну визначає фізичні та хімічні характеристики коксового газу, роблячи його ключовим компонентом для різних промислових застосувань. Використання нафталіну як вихідного матеріалу відкриває можливості для отримання різноманітних хімічних сполук, включаючи фарби, синтетичні полімери та інші продукти, що є важливими для промисловості [6].

Також нафталін може взаємодіяти з фізичними характеристиками коксового газу, визначаючи його щільність, температурний режим та інші параметри, які впливають на транспортування та використання в промислових процесах.

Слід зазначити, що розуміння ролі нафталіну в контексті коксового газу має ключове значення для розроблення

ефективних стратегій очищення та використання цього газового продукту. Такий підхід сприяє не лише підвищенню виробничої ефективності, але й створенню більш сталого та екологічно чистого виробництва.

Температурні умови впливають на хімічні реакції, пов'язані з утворенням і розкладанням нафталіну в коксовому газі. Збільшення температури може призводити до зростання вмісту нафталіну через певні кінетичні ефекти. Однак важливо визначити оптимальний діапазон температур для максимального виходу нафталіну та уникнення небажаних побічних реакцій.

Тиск є іншим важливим фактором, який визначає характеристики газу. Зміна тиску може впливати на рівновагу хімічних реакцій у системі, включаючи ті, які

стосуються нафталіну. Дослідження залежності вмісту нафталіну від тиску допоможе розуміти, як зміни в тискових умовах впливають на кількість нафталіну в коксовому газі.

Зміни в тискових умовах можуть впливати на утворення та розкладання нафталіну в коксовому газі через зміну концентрацій вихідних речовин і продуктів реакції. Підвищення тиску може призводити до збільшення вмісту нафталіну через зміщення хімічної рівноваги в бік утворення цього ароматичного вуглеводню. Важливо враховувати, що високий тиск також може стимулювати конкуруючі хімічні реакції, що впливають на кількість нафталіну та його вихід [7].

Крім того, вплив тискових змін може охоплювати фізичні характеристики газу, такі як щільність і об'єм, що впливає на транспортування та використання коксового газу у виробництві. Аналіз таких аспектів має вирішальне значення для вдосконалення технологічних процесів і ефективного використання коксового газу в промисловості, забезпечуючи оптимальні умови для утворення та використання нафталіну.

Розгляд залежності вмісту нафталіну в коксовому газі від температури є ключовим аспектом для розуміння та оптимізації виробництва. Температурні умови визначають характер хімічних реакцій, які відбуваються під час коксування вугілля та утворення коксового газу.

Підвищення температури може призводити до збільшення вмісту нафталіну через активізацію відповідних хімічних реакцій. У високих температурних умовах відбувається термічний розклад більш важких вуглеводнів, що може бути причиною утворення нафталіну та інших ароматичних вуглеводнів [9].

Проте слід зазначити, що існує оптимальний температурний діапазон для максимального утворення нафталіну без

значного утворення непотрібних побічних продуктів. Регулювання температурних умов є вирішальним для досягнення ефективного виробництва та забезпечення високого виходу цього ароматичного вуглеводня.

Крім того, розуміння впливу температури дає змогу визначити оптимальні умови для реакцій утворення нафталіну і сприяє розробленню технологій очищення коксового газу. Це може суттєво впливати на якість коксового газу та його використання в різних галузях промисловості [10].

Враховуючи першу підвибірку, проведемо аналіз регресії, визначимо параметри рівняння за допомогою методу найменших квадратів.

Система рівнянь

$$a_0n + a_1\sum x = \sum y, \quad (2)$$

$$a_0\sum x + a_1\sum x^2 = \sum y \cdot x. \quad (3)$$

Для наших даних система рівнянь має вигляд

$$18a_0 + -14000a_1 = 3958.41, \quad (4)$$

$$-13001a_0 + 11000001a_1 = -3227211. \quad (5)$$

З першого рівняння висловлюємо  $a_0$  і підставимо в друге рівняння. Матриця експерименту зведена в табл. 2.

Існує кілька способів графічного відображення автокореляції, і один з них асоціює відхилення  $\varepsilon_i$  з моментами їхнього отримання, тобто із зазначеними часовими моментами або порядковими номерами спостережень. На графіку по осі абсцис може бути відображений час отримання статистичних даних або порядковий номер спостереження, а по осі ординат – величини відхилень  $\varepsilon_i$  або їхні оцінки.

Матриця експерименту

x	y	x <sup>2</sup>	y <sup>2</sup>	x • y	y(x)	(y-y(x)) <sup>2</sup>
-1000	12.86	1000000	165.41	-12864	272.55	70059.98
-1000	24.99	1000000	624.1	-23994	273.55	63787.79
-1000	46.37	1000000	2150.21	-46373	274.52	53444.96
-1000	82.64	1000000	6830.01	-82642	275.55	37989.4
-1000	142.17	1000000	20212.01	-142161	276.55	18328.18
-1000	237.15	1000000	56238.21	-237141	277.51	1532.18

Логічно вважати, що наявність зв'язку між відхиленнями свідчить про наявність автокореляції. Відсутність такого зв'язку, ймовірно, вказує на відсутність автокореляції.

Коефіцієнти автокореляції випадкових даних повинні мати вибіркового розподілу, що наближається до нормального з нульовим математичним очікуванням і середнім квадратичним відхиленням, яке дорівнює

$$S_{eY} = \frac{1}{\sqrt{45}} = 0.149. \quad (6)$$

На початковому етапі статистичного аналізу рівняння регресії зазвичай проводять перевірку однієї важливої передумови – умови статистичної незалежності відхилень між собою. Ця перевірка включає оцінювання некорельованості сусідніх величин  $e_i$ .

Для більш повного дослідження взаємодії цих величин з  $y-u(x)$  та іншими необхідними факторами побудовано інші матриці кореляції сусідніх величин  $e_i$ . Це дає змогу отримати об'єктивну картину взаємодії змінних і коефіцієнтів, а також інших даних.

Зазначимо, що зниження концентрації нафталіну в газі під час абсорбції в скрубєрі насадкового типу при температурах 41-82 °C може досягати 55 %.

Прогнозується, що при менших температурах охолодження газу це зниження буде менш помітним через дифузійні обмеження, пов'язані із збільшенням в'язкості абсорбенту (кам'яновугільна смола).

Важливо враховувати, що не кожен фактор у моделі може суттєво збільшити пояснювану варіацію результативної ознаки, що може бути пов'язано зі взаємозалежністю факторів. Оцінювання необхідне для визначення значущості впливу кожного фактора.

У дифузійних умовах первинних газових холодильників взаємодія абсорбції і сублімаційної конденсації нафталіну з коксового газу залежить від температури, рівноважного розподілу в системі смола-нафталін, умов контакту, кількості, в'язкості і поверхні абсорбенту. Зокрема, найбільший ефект очищення спостерігається при максимальному вмісті крапель смоли, зважених в охолодженому газі, за рівних температурах охолодження газу.

Для більш глибокого аналізу процесу очищення відхідних газів від ливарного виробництва слід розглянути можливість використання низьких температур для контролю вмісту нафталіну. Це краще проявляється при побудові графіків регресії для різних значень і параметрів (рис. 2).

Подано графіки, які відображують зв'язок між температурою та тиском і вмістом парів нафталіну (рис. 3).

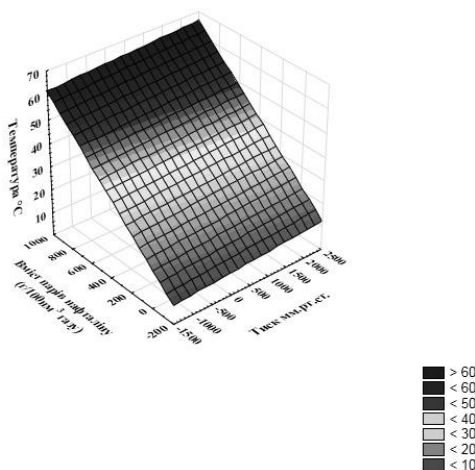


Рис. 2. Регресія залежності вмісту нафталину в коксовому газі від температури і тиску

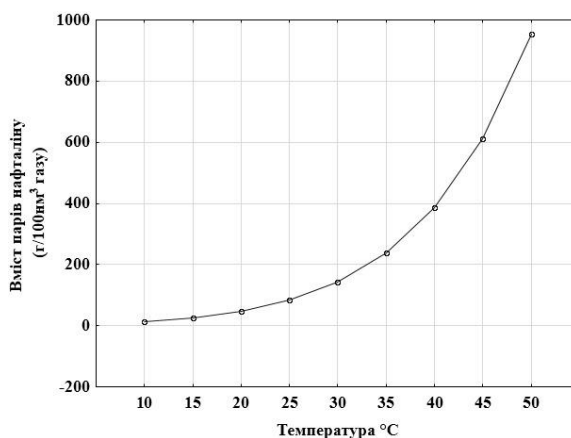


Рис. 3. Графік залежності вмісту парів нафталину в коксовому газі від температури

**Висновки.** Дослідження та аналіз взаємозв'язку між температурою і тиском у коксовому газі та вмістом нафталину вказують на можливості розроблення та оптимізації методів зниження присутності цього ароматичного вуглеводня. Мета роботи була поставлена в контексті актуальних проблем у галузі екології та виробництва, а результати спрямовані на досягнення високої ефективності очищення коксового газу від нафталину.

Дослідження спрямоване на вивчення оптимальних параметрів для мокрого газоочищення та використання скрубєрів насадкового типу; аналіз наукових досягнень у цій галузі та розгляд передових

методів, які могли б забезпечити ефективне вилучення нафталину з коксового газу.

Однією з ключових цілей роботи було розглядання можливостей впровадження отриманих результатів для покращення ефективності та сталості технологічних процесів у промисловості. Це може значно сприяти сталому розвитку та збереженню природи, адаптуючи промисловість до сучасних екологічних вимог і викликів.

Загалом дослідження відкриває перспективні напрями для подальших розробок у галузі очищення коксового газу, сприяючи прогресу та вдосконаленню технологій для досягнення високого ступеня екологічної чистоти у виробництві.

Список використаних джерел

1. Celik S., Drewnick F., Fachinger F., Brooks J., Darbyshire E., Coe H., et al. Influence of Vessel Characteristics and Atmospheric Processes on the Gas and Particle Phase of Ship Emission Plumes. In Situ Measurements in the Mediterranean Sea and around the Arabian Peninsula. *Atmospheric Chem Phys*, 20 (8) (2020, 10.5194/acp-20-4713-2020). Pp. 4713-4734.
2. Wang Z. Energy and Air Pollution. In *Comprehensive Energy Systems*; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2018; Vol. 1–5. P. 909–49.
3. Endres S., Maes F., Hopkins F., Houghton K., Mårtensson E.M., Oeffner J., et al. A New Perspective at the Ship-Air-Sea-Interface: The Environmental Impacts of Exhaust Gas Scrubber Discharge. *Front Mar Sci*, 5 (2018), 10.3389/fmars.2018.00139.
4. Olenius T., Yli-Juuti T., Elm J., Kontkanen J., Riipinen I. New Particle Formation and Growth: Creating a New Atmospheric Phase Interface. In *Physical Chemistry of Gas–Liquid Interfaces; Developments in Physical & Theoretical Chemistry*; Elsevier; 2018. P. 315–52.
5. Liu L., Li H., Zhang H., Zhong J., Bai Y., Ge M., et al. The Role of Nitric Acid in Atmospheric New Particle Formation. *Phys Chem Chem Phys*, 20 (25) (2018). Pp. 17406-17414, 10.1039/C8CP02719F.
6. Elm J. An Atmospheric Cluster Database Consisting of Sulfuric Acid, Bases, Organics, and Water. *ACS Omega*, 4 (6) (2019). Pp. 10965-10974, 10.1021/acsomega.9b00860.
7. Carlsson P.T.M., Celik S., Becker D., Olenius T., Elm J., Zeuch T. Neutral Sulfuric Acid-Water Clustering Rates: Bridging the Gap between Molecular Simulation and Experiment. *J Phys Chem Lett*, 11 (2020). Pp. 4239-4244, 10.1021/acs.jpcllett.0c01045.
8. Kheirnik M. et al. Revamping of an acid gas absorption unit: an industrial case study J. *Nat. Gas Sci. Eng.* (2018).
9. Wei Li, Shichang Li, Zhuolun Li, Xinsheng Wang, Yan Zhu. Self-circulating particle jet drilling tool design and simulation based on venturi effect. *Special Oil Gas Reservoirs*, 25 (2) (2018). Pp. 154-158.
10. Jing Ma, Hao Feng, Yongtu Liang, Tiantian Lei, Ning Xu, Haoran Zhang Feasibility study on unblocking submarine pipeline with the coiled tubing and the high-pressure water jet. *China Pet Mach*, 45 (6) (2017). Pp. 103-107.

---

Бурда Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, асистент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: Yurii.Burda@kname.edu.ua. ORCID ID: [orcid.org/0000-0003-3470-1334](https://orcid.org/0000-0003-3470-1334).

Півненко Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, асистент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail [yurii.pivnenko@kname.edu.ua](mailto:yurii.pivnenko@kname.edu.ua). ORCID ID: [orcid.org/0000-0002-6675-2649](https://orcid.org/0000-0002-6675-2649).

Череднік Артем Димитрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: [Artem.Cherednik@kname.edu.ua](mailto:Artem.Cherednik@kname.edu.ua). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3385-0584>.

Редько Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри ТТДЕМ, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: [ihorredko1972@gmail.com](mailto:ihorredko1972@gmail.com). ORCID ID <https://orcid.org/0009-0005-1556-0830>.

Логвіненко Олександр Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри механіки і проектування машин, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: [logvinenko.mpm@gmail.com](mailto:logvinenko.mpm@gmail.com). ORCID iD: 0000-0002-5731-7995.

Yurii Burda, Ph.D., Assistant Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O.M. Beketov. E-mail: [Yurii.Burda@kname.edu.ua](mailto:Yurii.Burda@kname.edu.ua).

ORCID ID: 0000-0003-3470-1334.

---



Yurii Pivnenko, Ph.D., Assistant Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O.M. Beketov. E-mail: yurii.pivnenko@kname.edu.ua.  
ORCID ID: 0000-0002-6675-2649.

Artem Cherednik, Ph.D., Associate Professor at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O.M. Beketov. E-mail: Artem.Cherednik@kname.edu.ua.  
ORCID ID: 0000-0002-3385-0584.

Ihor Redko, D.Sc. (Doctor of Technical Sciences), Professor at the Department of Transport Technology, Design and Exploitation of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: ihorredko1972@gmail.com.  
ORCID ID: 0009-0005-1556-0830.

Lohvinenko Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanics and Machine Design, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID ID: 0000-0002-5731-7995.  
E-mail: logvinenko.mpm@gmail.com

Статтю прийнято 29.01.2024 р.