

УДК 502.3:625.765]:005.334

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-13>

**Ольга КАРАЇМ**

кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**ORCID:** 0000-0002-1722-4110

**Олександр БАКАРАЄВ**

засновник ТОВ «ВОЛИНЬЕКОПРОМПРОЕКТ», вул. Гулака-Артемівського, 7, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43005

**ORCID:** 0000-0002-6876-2840

**Володимир КАРАЇМ**

аспірант, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**ORCID:** 0000-0003-4053-8019

**Зоряна ЛАВРИНЮК**

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**ORCID:** 0000-0002-1906-3330

**Олена ДЖАМ**

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**ORCID:** 0000-0003-2222-3734

**Людмила САВЧУК**

кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

**ORCID:** 0000-0002-8854-6600

**Бібліографічний опис статті:** Караїм, О., Бакараєв, О., Караїм, В., Лавринюк, З., Джам, О., Савчук, Л. (2025). Оцінювання ризиків від викидів виробництва асфальтобетонного дорожнього покриття як чинник забезпечення сталого розвитку. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 4, 105–115, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-13>

## ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ВІД ВИКИДІВ ВИРОБНИЦТВА АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ ЯК ЧИННИК ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

**Метою дослідження** є здійснення оцінки неканцерогенного та канцерогенного ризиків від викидів виробництва асфальтобетонного дорожнього покриття як чинника забезпечення сталого розвитку.

**Методи.** Аналітичні, розрахункові, експериментальні, порівняльні, інформаційного моделювання та прогнозування.

**Результати дослідження.** Здійснено оцінювання екологічних ризиків, пов'язаних із викидами забруднюючих речовин під час виробництва асфальтобетонного дорожнього покриття, та визначення їх значення для забезпечення сталого розвитку території. На основі результатів моделювання розсіювання викидів забруднюючих речовин в атмосферному повітрі визначено рівні неканцерогенного та канцерогенного впливу пріоритетних забруднювачів, серед яких леткі органічні сполуки, бензол та бенз(а)пірен. Встановлено, що сумарний індекс небезпеки розвитку неканцерогенних ефектів для досліджуваних речовин відповідає допустимому рівню, тоді як з урахуванням фонових концентрацій набуває насторожуючого характеру. Комбінований канцерогенний ризик, зумовлений дією бензолу та бенз(а)пірену, визначено як середній, який є прийнятним у виробничих умовах, проте по відношенню до населення потребує регулярного моніторингу та детальнішого аналізу джерел забруднення й потенційних наслідків його дії для обґрунтування необхідних заходів з управління ризиком, ефективності системи екологічного менеджменту та забезпечення сталого розвитку.

**Висновки.** Отримані результати вказують на необхідність подальшого вдосконалення технологічних процесів виробництва асфальтобетонного дорожнього покриття, оптимізації параметрів температурної обробки та впровадження системи інтегрованого моніторингу атмосферного повітря. Обґрунтовано, що систематична оцінка ризиків і контроль викидів є ключовими умовами мінімізації негативного впливу на здоров'я населення й довкілля та сприяють реалізації цілей сталого розвитку.

**Ключові слова:** виробництво, асфальтобетонне дорожнє покриття, атмосферне повітря, оцінювання ризиків, неканцерогенний ризик, канцерогенний ризик, екологічний менеджмент, екологічний контроль, сталий розвиток.

### ***Olha KARAIM***

*Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Protection of Environment, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025*

**ORCID:** 0000-0002-1722-4110

### ***Oleksandr BAKARAIEV***

*Director LLC "VOLYNEKOPROMPROEKT", 7 Hulak Artemovsky str., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43005*

**ORCID:** 0000-0002-6876-2840

### ***Volodymyr KARAIM***

*Postgraduate Student, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025*

**ORCID:** 0000-0003-4053-8019

### ***Zoryana LAVRYNYUK***

*Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Protection of Environment, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025*

**ORCID:** 0000-0002-1906-3330

### ***Olena DZHAM***

*Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Protection of Environment, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025*

**ORCID:** 0000-0003-2222-3734

**Liudmyla SAVCHUK**

*Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Protection, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025*

**ORCID:** 0000-0002-8854-6600

**To cite this article:** Karaim, O., Bakaraiev, O., Karaim, V., Lavrynyuk, Z., Dzham, O., Savchuk, L. (2025). Otsiniuvannia ryzykiv vid vykydiv vyrobnytstva asfaltobetonnoho dorozhnoho pokryttia yak chynnyk zabezpechennia staloho rozvytku [Assessment of Risks from Emissions of Asphalt Concrete Pavement Production as a Factor in Ensuring Sustainable Development]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 4, 105–115, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-13>

## ASSESSMENT OF RISKS FROM EMISSIONS OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENT PRODUCTION AS A FACTOR IN ENSURING SUSTAINABLE DEVELOPMENT

**Objective.** *The aim of the study is to assess non-carcinogenic and carcinogenic risks associated with emissions from hot-mix asphalt production as a factor contributing to sustainable development.*

**Methods.** *Analytical, computational, experimental, comparative methods, as well as information modeling and forecasting.*

**Results.** *The study evaluates environmental risks related to pollutant emissions generated during hot-mix asphalt production and determines their implications for promoting sustainable territorial development. Based on atmospheric dispersion modelling and subsequent risk calculations, the levels of non-carcinogenic and carcinogenic impacts of priority pollutants—including volatile organic compounds, benzene, and benzo(a)pyrene—were analysed. The results show that the cumulative hazard index for non-carcinogenic effects from the studied pollutants falls within the acceptable range, yet becomes of concern when background concentrations are considered. The combined carcinogenic risk associated with benzene and benzo(a)pyrene is classified as medium, which is acceptable under industrial exposure conditions; however, for the general population it requires continuous monitoring and a more detailed investigation of emission sources and potential health outcomes to substantiate risk-management measures, evaluate the effectiveness of environmental management systems, and ensure progress toward sustainable development.*

**Conclusions.** *The findings highlight the need for further improvement of hot-mix asphalt production technologies, optimisation of thermal processing parameters, and the implementation of integrated atmospheric air monitoring systems. It is substantiated that systematic risk assessment and emission control are essential for minimising adverse impacts on public health and the environment and contribute to achieving sustainable development goals, particularly in terms of ensuring safe working conditions and enhancing the environmental resilience of territories.*

**Keywords:** *production, hot-mix asphalt, ambient air, risk assessment, non-carcinogenic risk, carcinogenic risk, environmental management, environmental control, sustainable development.*

**Актуальність проблеми** зумовлена глобальним переходом суспільства до принципів сталого розвитку, що передбачають зниження антропогенного навантаження, оптимізацію технологічних процесів і впровадження екологічно безпечних рішень у дорожньо-будівельній галузі. Формування екологічно відповідної інфраструктури є важливим чинником підвищення стійкості регіонів та забезпечення здорового середовища проживання населення. У цьому контексті наукове обґрунтування ризиків, пов'язаних із викидами асфальтобетонного дорожнього покриття, набуває особливого значення, адже створює підґрунтя для удосконалення екологічних стандартів, підвищення ефективності природоохоронних заходів та підтримання балансу між інфраструктурним

розвитком і збереженням довкілля. Таким чином, дослідження ризиків, спричинених викидами асфальтобетонного дорожнього покриття, є своєчасним і необхідним для формування сучасної системи екологічного менеджменту та досягнення цілей сталого розвитку як на локальному, так і на національному рівнях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню проблем оцінювання ризику від впливу викидів забруднюючих речовин присвячено низку праць українських та зарубіжних вчених. Зокрема, у науковій літературі представлено стратегію мінімізації екологічних ризиків від діяльності промислових підприємств у контексті реалізації принципів сталого розвитку, де узагальнено підходи до зниження техногенного навантаження та вдосконалення системи

корпоративного природоохоронного управління (Вагін, 2025). Питання оцінювання ризиків для здоров'я населення, що проживає в зоні впливу промислових підприємств, розглядаються в роботах, де здійснено комплексний аналіз впливу викидів вуглеграфітового виробництва із застосуванням сучасних методів ідентифікації небезпек та прогнозування наслідків (Іваненко, 2024). У розвитку концепції сталого природокористування важливою є проблема формування систем екологічного менеджменту на рівні підприємств, що дозволяє забезпечити ефективне регулювання впливу виробництв на довкілля та регіональний розвиток (Караїм, 2022).

Дослідження, присвячені контролю впливу забруднюючих речовин при виробництві асфальтобетону, акцентують увагу на необхідності системного екологічного моніторингу, моделювання розсіювання викидів та впровадження технологічних рішень, спрямованих на скорочення викидів поліциклічних ароматичних вуглеводнів та летких органічних сполук (Караїм, 2023). Окремі роботи фіксують ризики, пов'язані із забрудненням атмосферного повітря важкими металами у регіонах з високим техногенним навантаженням, підкреслюючи значення гігієнічних оцінок для формування регіональної політики у сфері охорони здоров'я (Онул, 2024). Питання впливу хімічних речовин на працівників промислових підприємств розкрито і в окремих галузевих дослідженнях, де оцінено ризики для здоров'я працівників машинобудівної промисловості (Шаравара, 2025). Результати цих робіт засвідчують, що оцінювання впливу забруднювачів на виробниче середовище має базуватися на поєднанні інструментальних вимірювань, токсикологічного аналізу та методів інформаційно-математичного моделювання для оцінки ризиків.

У міжнародній практиці також приділяється значна увага дослідженню ризиків, пов'язаних із асфальтобетонним виробництвом. Зокрема, вивчаються викиди поліциклічних ароматичних вуглеводнів і запахів при застосуванні модифікованих гумових сумішей (Chlebnikovas, 2023), аналізуються гострі симптоми впливу випарів асфальту на працівників (Terreg, 2006), а також виявляються подразнювальні ефекти парів і аерозолів бітуму на дихальні шляхи (Raulf-Heimsoth, 2011). Окремий напрям становлять дослідження впровадження низькоемісійних

технологій та інгібіторів утворення асфальтових емісій (Pahlavan, 2023; Wang, 2024). Оглядом праці систематизують сучасний стан знань про ризики від асфальтових викидів, існуючі прогалини та напрями подальших досліджень (Mousavi, 2024), підкреслюючи необхідність інтеграції екологічного моделювання, токсикологічного аналізу та оцінки впливу на здоров'я. Питання впливу хімічних речовин на працівників промислових підприємств розкрито в дослідженнях, де оцінено ризики для здоров'я працівників металургійної галузі (Dehghani, 2021; Esmaeili, 2024; Golbaghi, 2021).

Отже, проведені розвідки свідчать, що проблема оцінювання екологічного ризику викидів асфальтобетонного виробництва є комплексною і потребує міждисциплінарного підходу. Існуючі дослідження формують наукове підґрунтя для вдосконалення нормативного забезпечення, впровадження технологічних інновацій та підвищення ефективності екологічного менеджменту на підприємствах дорожньо-будівельної галузі.

**Метою дослідження** є здійснення оцінки неканцерогенного та канцерогенного ризиків від викидів виробництва асфальтобетонного дорожнього покриття як чинника забезпечення сталого розвитку.

**Методологія.** Визначення ризику розвитку неканцерогенних ефектів за комбінованого інгаляційного впливу хімічних речовин проведено на основі розрахунку індексу безпеки НІ відповідно до (Оцінка канцерогенного та неканцерогенного ризику для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря, 2023; Оцінка ризиків для здоров'я працівників від забруднення повітря робочої зони хімічними речовинами, 2024):

$$NI = \sum_{i=1}^n HQ_i, \quad (1)$$

де,  $n$  – кількість досліджених речовин;  $HQ_i$  – коефіцієнт безпеки, відношення концентрації речовини до нормативу:

$$HQ_i = C_i / ГДК_i. \quad (2)$$

Якщо отримане значення коефіцієнта безпеки для речовини не перевищує 1, імовірність формування у працівника несприятливих критичних наслідків за умов її щоденного надходження є низькою, а вплив вважається

прийнятним. Натомість перевищення цього показника понад одиницю свідчить про поступове зростання ризику появи шкідливих ефектів у людини, яке підвищується відповідно до збільшення величини  $HQ_i$ .

Оцінювання сумарного неканцерогенного ризику викидів асфальтобетонного дорожнього покриття здійснено на основі розрахованих коефіцієнтів та індексу небезпеки. Класифікацію рівнів неканцерогенного ризику представлено в табл. 1.

Розрахунок індивідуального канцерогенного ризику здійснюється за формулою:

$$CR = LADC \times UR, \quad (3)$$

де:  $LADC$  – середня концентрація речовин в атмосферному повітрі за весь період усереднення експозиції,  $mg/m^3$ ;  $UR$  – одиничний ризик,  $(mg/m^3)^{-1}$ ,

$$UR = SF_i \times 20/70, \quad (4)$$

$SF_i$  – фактор канцерогенного потенціалу сполуки,  $(mg/(kg \times \text{добу}))^{-1}$ ,  $SF_{\text{бензол}}$  – 0,027  $(mg/(kg \times \text{добу}))^{-1}$ ,  $SF_{\text{бенз(а)пірен}}$  – 3,1  $(mg/(kg \times \text{добу}))^{-1}$ .

Канцерогенний ризик за комбінованої дії декількох хімічних сполук розглядають як адитивний і розраховують за формулою:

$$CR_a = \sum_{i=1}^n CR_i, \quad (5)$$

де,  $CR_i$  – канцерогенний ризик  $i$ -тої канцерогенної речовини.

Класифікацію рівнів канцерогенного ризику представлено в табл. 2.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Процеси виробництва асфальтобетонного дорожнього покриття та роботи з його укладання супроводжуються утворенням значної кількості хімічних речовин, серед яких домінують тверді суспендовані частинки недиференційовані за складом та леткі органічні сполуки (Караїм, 2023). Ці забруднювачі справляють потенційно шкідливий вплив передусім на працівників, що перебувають у зоні дії технологічних процесів. Низка досліджень (Tepper, 2006; Raulf-Heimsoth, 2011; Chlebnikovas, 2023; Pahlavan, 2023; Mousavi, 2024; Wang, 2024) демонструють, що у працівників, які регулярно контактують з асфальтовими матеріалами, частіше фіксуються симптоми порушення самопочуття – загальна слабкість, підвищена втомлюваність, зниження апетиту, подразнення слизових оболонок очей, носоглотки та верхніх дихальних шляхів. Вираженість цих проявів істотно вища,

Таблиця 1

**Класифікація рівнів неканцерогенного ризику\***

Коефіцієнт небезпеки розвитку неканцерогенних ефектів $HQ_i$ для окремих сполук	Індекс небезпеки розвитку неканцерогенних ефектів (HI) для групи сполук односпрямованої дії	Рівень ризику
>2	>6	Високий
1,1–3	3,1–6	Насторожуючий
0,11–1,0	1,1–3,0	Допустимий
0,1 і менше	1,0 і менше	Мінімальний (цільовий)

*Джерело: (Оцінка канцерогенного та неканцерогенного ризику для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря, 2023; Оцінка ризиків для здоров'я працівників від забруднення повітря робочої зони хімічними речовинами, 2024).*

Таблиця 2

**Класифікацію рівнів канцерогенного ризику\***

Ризик протягом життя	Рівень ризику
>10 <sup>-3</sup>	Високий – не прийнятний для виробничих умов і населення. Необхідно проведення заходів щодо зниження ризику
10 <sup>-3</sup> –10 <sup>-4</sup>	Середній – допустимий для виробничих умов; за впливу на все населення необхідно здійснювати динамічний контроль та поглиблене вивчення джерел і можливих наслідків шкідливої дії для вирішення питання щодо заходів з управління ризиком
10 <sup>-4</sup> –10 <sup>-6</sup>	Низький – допустимий ризик (рівень, на якому, як правило, встановлюють гігієнічні нормативи для населення)
<10 <sup>-6</sup>	Мінімальний – бажана (цільова) величина при проведенні оздоровчих та природоохоронних заходів

*\* Джерело: (Оцінка канцерогенного та неканцерогенного ризику для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря, 2023; Оцінка ризиків для здоров'я працівників від забруднення повітря робочої зони хімічними речовинами, 2024).*

ніж у контрольних груп, які не мають контакту з асфальтобетонними сумішами.

Необхідно зазначити, що вагомим чинником впливу асфальтобетонної суміші на здоров'я людей є її температура: підвищення температури обробки супроводжується інтенсивнішим випаровуванням токсичних компонентів, що призводить до більш виражених негативних реакцій працівників. Тверді марки асфальту, що потребують нагрівання до вищих температур, створюють більший ризик порівняно з м'якими сумішами (Terper, 2006).

Цікаво, що зовнішні чинники – погодні умови, інтенсивність транспортного руху чи особливості виконання операцій – не чинять значного впливу на частоту симптомів, що підкреслює: основними детермінантами ризиків є саме технологічні характеристики виробництва.

У ширшому контексті забезпечення сталого розвитку такі результати акцентують на необхідності системного оцінювання ризиків, пов'язаних із викидами асфальтобетонного виробництва. Розуміння рівня токсичного навантаження на працівників і довкілля дозволить формувати ефективні стратегії мінімізації шкідливих впливів, удосконалювати технологічні процеси та впроваджувати більш екологічно зберігаючі рішення.

Визначення рівнів ризиків від викидів забруднюючих речовин при виробництві асфальтобетонного дорожнього покриття здійснено на прикладі асфальтобетонного заводу розташованого в Ківерцівському районі, Волинської області

(географічні координати центрів промислового майданчика: 50°49'52" Пн. ш., 25°28'59" Сх. д.). Об'єкт розташований на земельній ділянці площею 1,6 га поруч із магістральною дорогою, що забезпечує оперативне постачання сировини та доставку готової асфальтобетонної суміші до місць виконання дорожніх робіт із мінімальними витратами на логістику. Територія виробничого майданчика межує: на півночі – з лісовою ділянкою та житловим сектором; на північному сході – з лісовими насадженнями та автомобільною дорогою; на сході – з лісовими масивами та автошляхом; на південному сході – з лісом і дорогою; на півдні – з лісовим масивом, іншим промисловим об'єктом і залізничною колією; на південному заході – з виробничою територією іншого підприємства; на заході – з лісовою зоною та занедбаною промисловою ділянкою; на північному заході – з лісом і житловою забудовою.

Асфальтобетонне виробництво здійснюється з фактичною продуктивністю 30 т/год. До комплексу основних об'єктів та технологічних установок належать: прохідна, побутові та адміністративні приміщення, вагова, трансформаторна підстанція, автостоянка, операторська, мобільна асфальтозмішувальна установка контейнерного типу CSD 1500, теплогенератор, дві бітумні цистерни об'ємом 50 м<sup>3</sup> та 26 м<sup>3</sup>, наземні резервуари для дизельного пального та скрапленого вуглеводневого газу (по 50 м<sup>3</sup> кожен), а також відкриті склади для інертних матеріалів – відсіву та щебеню.

Таблиця 3

**Максимальні концентрації забруднюючих речовин на межі санітарно-захисної зони**

№ з/п	Найменування речовини	Частка ГДК без врахування фону	Максимальна концентрація без врахування фону, мг/м <sup>3</sup>	Частка ГДК з врахуванням фону	Максимальна концентрація з врахуванням фону мг/м <sup>3</sup>
1	Азоту діоксид	0,04	0,008	0,44	0,088
2	Сажа	0,05	0,0075	0,45	0,068
3	Сірки діоксид	0,03	0,015	0,43	0,22
4	Сірководень	0,05	0,0004	0,45	0,0036
5	Вуглецю оксид	0,05	0,25	0,45	2,25
6	Бутан	0,05	10	0,45	90
7	Бензол	0,05	0,075	0,45	0,675
8	Бенз(а)пірен	0,05	$0,5 \cdot 10^{-07}$	0,15	$1,5 \cdot 10^{-07}$
9	Одорант СПМ	0,09	$0,5 \cdot 10^{-5}$	0,49	$2,5 \cdot 10^{-5}$
10	Вуглеводні граничні C <sub>12</sub> –C <sub>19</sub>	0,15	0,15	0,55	0,55
11	Суспенд. тверді частинки недиф. за складом	0,57	0,285	0,97	0,49
12	Пропан	0,05	3,25	0,45	29,25

Сушильний комплекс, що включає сушильний, змішувальний та подрібнювальний агрегати з дизельним пальником, оснащено рукавним фільтром Nomex 400, який забезпечує понад 95 % ефективності очищення повітря. Підприємство працює 210 днів на рік, що відповідає річному фонду робочого часу 1680 годин. Обслуговування технологічного процесу здійснює персонал чисельністю 10 осіб.

$$HQ_{\text{азоту діоксид}} = \frac{0,008}{0,2} = 0,04 < 1$$

$$HQ_{\text{сажа}} = \frac{0,0075}{0,15} = 0,05 < 1$$

$$HQ_{\text{сірки діоксид}} = \frac{0,015}{0,5} = 0,03 < 1$$

$$HQ_{\text{сірководень}} = \frac{0,0004}{0,008} = 0,05 < 1$$

$$HQ_{\text{вуглецю оксид}} = \frac{0,25}{5} = 0,05 < 1$$

$$HQ_{\text{бутан}} = \frac{10}{200} = 0,05 < 1$$

Як бачимо отримані значення коефіцієнта небезпеки для всіх досліджуваних речовини не перевищують 1. Імовірність формування у працівників несприятливих критичних наслідків за умов їх щоденного надходження є низькою, а вплив вважається прийнятним.

Показник індексу небезпеки розвитку неканцерогенних ефектів (НІ) розрахований за формулою (1) для досліджуваних речовин становить 1,1 та, згідно табл. 1, відповідає допустимому рівню ризику. Це свідчить про те, що за умов фактичних концентрацій забруднюючих речовин ризик виникнення несприятливих реакцій організму не перевищує меж, які вважаються прийнятними для здоров'я населення при хронічній дії. Такий результат свідчить про відносну ефективність існуючих технологічних процесів та організаційних заходів щодо контролю викидів.

Показник індексу небезпеки розвитку неканцерогенних ефектів для досліджуваних речовин з урахуванням фону ( $HI_{\phi}$ ) становить 5,24, що відповідає, згідно табл. 1, насторожуючому рівню ризику. Отримане значення вказує, що хоч внесок підприємства є контрольованим, кумулятивний вплив локальних та регіональних джерел забруднення може формувати додаткове навантаження на довкілля і здоров'я

Розрахунок концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі виконувався програмним комплексом ЕОЛ+. Максимальні концентрації забруднюючих речовин без врахування фону та сумарні з фоном визначені на межі санітарно-захисної зони наведено в табл. 3.

Визначення коефіцієнта небезпеки  $HQ_i$ , для всіх забруднюючих речовин здійснено за формулою (2).

$$HQ_{\text{бензол}} = \frac{0,075}{1,5} = 0,05 < 1$$

$$HQ_{\text{бенз(a)пірен}} = \frac{0,00000005}{0,000001} = 0,05 < 1$$

$$HQ_{\text{одорант СПМ}} = \frac{0,0000045}{0,00005} = 0,09 < 1$$

$$HQ_{\text{вуглеводні}} = \frac{0,15}{1} = 0,15 < 1$$

$$HQ_{\text{тверді}} = \frac{0,285}{0,5} = 0,57 < 1$$

$$HQ_{\text{пропан}} = \frac{3,25}{65} = 0,05 < 1$$

населення. Це підкреслює важливість комплексного підходу до оцінки якості повітря, який враховує синергетичну дію усіх джерел забруднення, а не лише окремих підприємств. Такий підхід є ключовим для систем управління екологічним станом територій, що орієнтовані на принципи сталого розвитку.

Для визначення канцерогенного ризику, розраховуємо одиничний ризик UR,  $(\text{мг}/\text{м}^3)^{-1}$  для бензолу та бенз(а)пірену за формулою (4),  $UR_{\text{бензол}} = 0,0077$ ;  $UR_{\text{бенз(a)пірен}} = 0,8857$ .

Індивідуальний канцерогенний ризик для бензолу та бенз(а)пірену визначено за формулою (3),  $CR_{\text{бензол}} = 5,8 \times 10^{-4}$ ;  $CR_{\text{бенз(a)пірен}} = 4,4 \times 10^{-8}$ .

Канцерогенний ризик за комбінованої дії бензолу та бенз(а)пірену розраховано за формулою (5),  $CR_a = 5,8 \times 10^{-4}$ .

Отже, рівень канцерогенного ризику комбінованої дії бензолу та бенз(а)пірену, відповідно до табл. 2, визначається як середній, прийнятний для виробничих умов, але не прийнятний для населення. Така ситуація вказує на необхідність поглибленого аналізу джерел утворення канцерогенів і всебічної оцінки можливих довгострокових наслідків для здоров'я населення та стану довкілля. У контексті забезпечення сталого розвитку підприємство має впроваджувати

заходи екологічного менеджменту, спрямовані не лише на дотримання регламентованих норм, а й на мінімізацію ризиків шляхом модернізації технологічних процесів та підвищення екологічної ефективності виробництва. Одним із ключових напрямів є оптимізація температурного режиму під час приготування асфальтобетонних сумішей, зокрема перехід на технології теплих асфальтобетонів, які дозволяють зменшити температуру виробництва на 20–40 °C і, відповідно, скоротити інтенсивність утворення бензолу, поліциклічних ароматичних вуглеводнів та інших токсичних компонентів. Важливим завданням також є модернізація газоочисних систем через установлення вискоелективних фільтрів і локальних відсмоктувачів у зонах найбільшого виділення забруднюючих речовин, що забезпечить зниження їх вмісту у приземному шарі атмосфери. Додаткове зменшення ризиків може бути досягнуто шляхом переходу на менш токсичні види палива, удосконалення процесів згоряння, технічного обслуговування пальникового обладнання та контролю за якістю сировини. З огляду на те, що середній канцерогенний ризик є неприйнятним для населення, підприємству рекомендовано створити буферні зелені насадження, де це доцільно, та реалізувати заходи зі зниження викидів під час транспортування та зберігання матеріалів. Необхідним є впровадження динамічного моніторингу якості атмосферного повітря із застосуванням автоматизованих станцій та регулярним вимірюванням концентрацій пріоритетних канцерогенів, а також проведення планових інвентаризацій викидів із визначенням найбільш небезпечних технологічних ділянок. Удосконалення умов праці персоналу через використання засобів індивідуального захисту, поліпшення вентиляції та ротацію працівників сприятиме зниженню індивідуального впливу канцерогенних речовин. Комплексне впровадження зазначених заходів дозволить підприємству не лише зменшити рівень канцерогенних ризиків до прийнятних значень, але й підвищити екологічну відповідальність, сприяти поліпшенню якості атмосферного повітря та забезпечити відповідність стратегічним цілям сталого розвитку.

З позицій забезпечення сталого розвитку отримані результати мають важливе практичне значення. По-перше, вони свідчать про

необхідність подальшої оптимізації технологічних процесів виробництва асфальтобетонного дорожнього покриття з метою мінімізації викидів твердих суспендованих частиннок недеференційованих за складом, летких органічних сполук та продуктів неповного згоряння. По-друге, наявність насторожуючого рівня неканцерогенного ризику з урахуванням фону вказує на потребу інтегрованого екологічного моніторингу на рівні громади та регіону. По-третє, встановлений середній рівень канцерогенного ризику, який є прийнятним для виробничих умов, але неприйнятним для населення, вимагає реалізації цілеспрямованих технічних і організаційних заходів зі зниження утворення та поширення пріоритетних канцерогенів. Своєчасне реагування на зазначені виклики сприятимуть формуванню більш безпечного виробничого середовища, зменшенню антропогенного навантаження на атмосферне повітря та забезпеченню досягнення стратегічних орієнтирів сталого розвитку, зокрема ЦСР 3 «Міцне здоров'я і благополуччя» та ЦСР 11 «Сталий розвиток міст і громад».

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Таким чином, проведений аналіз дозволяє не лише кількісно оцінити ступінь впливу виробництва асфальтобетонного дорожнього покриття на довкілля та здоров'я населення, але й окреслити ключові напрями підвищення екологічної безпеки та ефективності управління ризиками. Отримані результати підтверджують важливість систематичного моніторингу атмосферного повітря та регулярної інвентаризації викидів, що є необхідними для своєчасного виявлення тенденцій зміни рівнів забруднення та оперативного коригування технологічних процесів. Встановлення середнього рівня канцерогенного ризику та насторожуючих значень неканцерогенних ризиків із урахуванням фону свідчить про потребу поглибленого аналізу джерел утворення небезпечних речовин, оптимізації температурних режимів, удосконалення газоочисних систем і впровадження сучасних екологічно орієнтованих технологій.

Важливою складовою подальшого удосконалення є модернізація систем екологічного менеджменту підприємства на основі принципів адаптивного управління, що передбачає реагування на зміну екологічних умов та підвищення прозорості екологічної інформації.

Розвиток інтегрованих підходів до екологічного контролю на рівні громади та регіону забезпечить підвищення ефективності регіонального планування, сприятиме формуванню збалансованої просторової політики та зменшенню антропогенних навантажень на довкілля.

Забезпечення низьких рівнів екологічних ризиків і підтримання прийняттого екологічного стану становить фундамент для сталого функціонування підприємств з виробництва

асфальтобетонного дорожнього покриття. Комплексне впровадження рекомендованих технічних, організаційних і моніторингових заходів сприятиме створенню екологічно безпечного життєвого середовища, підвищенню стійкості територій до забруднення, а також реалізації ключових цілей сталого розвитку, зокрема тих, що стосуються здоров'я населення, якості повітря, безпеки виробничих процесів і формування екологічно відповідального виробництва.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Вагін А. В., Іваненко О. І., Панов Є. М., Іванюта С. П., Мартинюк А. С. Стратегія мінімізації екологічних ризиків від ПрАТ «Укрграфіт» в контексті сталого розвитку. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2025. № 2. С. 70–82. URL: <https://chemengine.kpi.ua/article/view/333976/322870>
2. Державні медико-санітарні нормативи допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць : Наказ МОЗ України від 10.05.2024 № 813. Київ, 2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0763-24#Text>
3. Державні медико-санітарні нормативи допустимого вмісту хімічних речовин у повітрі робочої зони : Наказ МОЗ України від 09.07.2024 № 1192. Київ, 2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#Text>
4. Іваненко О. І., Панов Є. М., Вагін А. В., Терещенко О. М., Довголап С. Д. Оцінка ризиків для здоров'я населення в зоні впливу викидів забруднюючих речовин підприємств вуглеграфітового виробництва. *Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2024. № 2 (23). С. 33–46. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/70792>
5. Караїм О. А., Милько І. П., Караїм В. П. Формування системи екологічного менеджменту підприємств в аспекті відновлення сталого розвитку регіонів. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Економічна»*. 2022. № 2 (26). С. 29–38. DOI: [http://doi.org/10.31474/1680-0044-2022-2\(26\)-29-38](http://doi.org/10.31474/1680-0044-2022-2(26)-29-38)
6. Караїм О. А., Цьось О. О., Бакараєв О. О., Бедункова О. О., Караїм В. П., Хомацький В. М. Екологічний контроль впливу на довкілля викидів забруднюючих речовин при виробництві асфальтобетону. *Вісник НУВГП. Сільськогосподарські науки : зб. наук. праць*. Рівне, 2023. Вип. 3 (103). С. 97–115. DOI: <https://doi.org/10.31713/vs320237>
7. Онул Н. М., Юнтунен Г. М., Шевченко О. А., Вальчук С. І. Ризик для здоров'я населення Дніпропетровської області від забруднення атмосферного повітря важкими металами. *Intermedical journal*. 2024. № 1. С. 155–159. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-7684/2024-1-24>
8. Оцінка канцерогенного та неканцерогенного ризику для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря : Метод. рек. від. 18.10.2023 № 1811. МОЗ України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1811282-23#Text>
9. Оцінка ризиків для здоров'я працівників від забруднення повітря робочої зони хімічними речовинами : Метод. рек. від 02.03.2024 № 358 / Міністерство охорони здоров'я України. Київ, 2024. 33 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0358282-24#Text>
10. Шаравара Л. П. Оцінка неканцерогенних ризиків від впливу хімічних речовин у працівників машинобудівного підприємства. *Перспективи та інновації науки. Педагогіка. Психологія. Медицина*. 2025. № 5. С. 3260–3270. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-5\(51\)-3260-3270](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-5(51)-3260-3270)
11. Chlebnikova A., Marčiulaitienė E., Šernas O., Škuldeckė J., Januševičius T. Research on air pollutants and odour emissions from paving hot-mix asphalt with end-of-life tyre rubber. *Environment International*. 2023. Vol. 181. Article 108281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108281>
12. Dehghani F., Omid F., Fallahzadeh R. A., Pourhassan B. Health risk assessment of occupational exposure to heavy metals in a steel casting unit of a steelmaking plant using Monte–Carlo simulation technique. *Toxicology and Industrial Health*. 2021. Vol. 37, № 7. P. 431–440. DOI: <https://doi.org/10.1177/07482337211019593>
13. Esmaili R., Ebrahimpour K., Esmaili S. V., Karimi A., Kamranifar M., Pour M. N. et al. Chemical Health Risk Assessment of Exposure to Metal Fumes among Employed Workers in a Metal Manufactory with an Electric Arc Furnace. *International Journal of Environmental Health Engineering*. 2024. Vol. 13, № 5. Article 18. DOI: [https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe\\_52\\_23](https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe_52_23)

14. Golbaghi A., Nematpour L., Damiri Z., Dehaghi B. F. Carcinogenic and non-carcinogenic health risk assessment of air pollutant in a steel industry. *P J M H S*. 2021. Vol. 15, № 7. P. 1950–1955. DOI: <https://doi.org/10.53350/pjmhs211571950>
15. Mousavi M., Emrani J., Teleha J. C., Jiang G., Johnson B. D., Shamshiripour A., Fini E. H. Health risks of asphalt emission: State-of-the-art, advances and research gaps. *Journal of Hazardous Materials*. 2024. Vol. 480. Article 136048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136048>
16. Pahlavan F., Gholipour A., Zhou T., Fini E. H. Cleaner asphalt production by suppressing emissions using phenolic compounds. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2023. Vol. 11(7). P. 2737–2751. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05345>
17. Raulf-Heimsoth M., Pesch B., Kendzia B., Spickenheuer A., Bramer R., Marczynski B., Brüning T. Irritative effects of vapours and aerosols of bitumen on the airways assessed by non-invasive methods. *Archives of toxicology*. 2011. Vol. 85. P. 41–52. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-011-0681-6>
18. Tepper, A. L., Burr, G. A., Feng, H. A., Singal, M., Miller, A. K., Hanley, K. W., Olsen, L. D. Acute symptoms associated with asphalt fume exposure among road pavers. *American journal of industrial medicine*. 2006. Vol. 49(9). P. 728–739. DOI: <https://doi.org/10.1002/ajim.20346>
19. Wang Z., Li H., Jia M., Du Q. Emission risk and inhibition technology of asphalt fume from crumb rubber modified asphalt. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(20). Article 8840. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16208840>

#### REFERENCES:

1. Vahin, A. V., Ivanenko, O. I., Panov, Ye. M., Ivaniuta, S. P., & Martyniuk, A. S. (2025). Stratehiia minimizatsii ekolohichnykh ryzykiv vid PrAT «Ukrhafit» v konteksti staloho rozvytku [Strategy for minimizing environmental risks from PJSC “Ukrhrafit” in the context of sustainable development]. *Visnyk NTUU “KPI imeni Ihoria Sikorskoho”. Seriya: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia*, (2), 70–82. <https://chemengine.kpi.ua/article/view/333976/322870> [in Ukrainian].
2. Derzhavni medyko-sanitarni normatyvy dopustymoho vmistu khimichnykh i biolohichnykh rehovyn v atmosfernomu povitri naselenykh mist: Nakaz MOZ Ukrainy vid 10.05.2024 № 813 [State sanitary norms of permissible content of chemical and biological substances in the atmospheric air of settlements: Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 813 of May 10, 2024]. (2024). Kyiv. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0763-24#Text> [in Ukrainian].
3. Derzhavni medyko-sanitarni normatyvy dopustymoho vmistu khimichnykh rehovyn u povitri robochoi zony: Nakaz MOZ Ukrainy vid 09.07.2024 № 1192 [State sanitary norms of permissible content of chemical substances in the air of the working zone: Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 1192 of July 9, 2024]. (2024). Kyiv. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#Text> [in Ukrainian].
4. Ivanenko, O. I., Panov, Ye. M., Vahin, A. V., Tereshchenko, O. M., & Dovholap, S. D. (2024). Otsinka ryzykiv dlia zdorovia naseleння v zoni vplyvu vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn pidpriemstv vuhlehratitovoho vyrobnytstva [Assessment of health risks for the population in the zone of emissions impact from carbon-graphite enterprises]. *Visnyk NTUU «KPI im. Ihoria Sikorskoho». Seriya “Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia”*, 2(23), 33–46. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/70792> [in Ukrainian].
5. Karaim, O. A., Mylko, I. P., & Karaim, V. P. (2022). Formuvannia systemy ekolohichnoho menedzhmentu pidpriemstv v aspekti vidnovlennia staloho rozvytku rehioniv [Formation of an environmental management system for enterprises in the context of restoring sustainable regional development]. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: “Ekonomichna”*, 2(26), 29–38. [http://doi.org/10.31474/1680-0044-2022-2\(26\)-29-38](http://doi.org/10.31474/1680-0044-2022-2(26)-29-38) [in Ukrainian].
6. Karaim, O. A., Tsos, O. O., Bakaraiev, O. O., Biedunkova, O. O., Karaim, V. P., & Khomatskyi, V. M. (2023). Ekolohichni kontrol vplyvu na dokillia vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn pry vyrobnytstvi asfaltobetonu [Environmental control of the impact on the environment of pollutant emissions during asphalt concrete production]. *Visnyk NUVHP. Silskohospodarski nauky*, 3(103), 97–115. <https://doi.org/10.31713/vs320237> [in Ukrainian].
7. Onul, N. M., Yuntunen, H. M., Shevchenko, O. A., & Valchuk, S. I. (2024). Ryzyk dlia zdorovia naseleння Dnipropetrovskoi oblasti vid zabrudnennia atmosfernoho povitria vazhkymy metalamy [Health risk to the population of Dnipropetrovsk region from atmospheric air pollution by heavy metals]. *Intermedical Journal*, (1), 155–159. <https://doi.org/10.32782/2786-7684/2024-1-24> [in Ukrainian].
8. Otsinka kantserohennoho ta nekantserohennoho ryzyku dlia zdorovia naseleння vid khimichnoho zabrudnennia atmosfernoho povitria: Metod. rek. vid 18.10.2023 № 1811 / MOZ Ukrainy [Assessment of carcinogenic and non-carcinogenic risk to public health from chemical air pollution: Guidelines No. 1811 of October 18, 2023]. (2023). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1811282-23#Text> [in Ukrainian].
9. Otsinka ryzykiv dlia zdorovia pratsivnykiv vid zabrudnennia povitria robochoi zony khimichnymy rehovynamy: Metod. rek. vid 02.03.2024 № 358 / MOZ Ukrainy [Assessment of workers’ health risks from chemical pollution

of the working air: Guidelines No. 358 of March 2, 2024]. (2024). Kyiv, 33 p. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0358282-24#Text> [in Ukrainian].

10. Sharavara, L. P. (2025). Otsinka nekantserohennykh ryzykiv vid vplyvu khimichnykh rehovyn u pratsivnykiv mashynobudivnoho pidpriemstva [Assessment of non-carcinogenic risks from chemical exposure among workers at a machine-building enterprise]. *Perspektyvy ta innovatsii nauky. Pedahohika. Psykholohiia. Medytsyna*, (5), 3260–3270. [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-5\(51\)-3260-3270](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-5(51)-3260-3270) [in Ukrainian].

11. Chlebnikovas, A., Marčiulaitienė, E., Šernas, O., Škulteckė, J., & Januševičius, T. (2023). Research on air pollutants and odour emissions from paving hot-mix asphalt with end-of-life tyre rubber. *Environment International*, 181, Article 108281. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108281>

12. Dehghani, F., Omidi, F., Fallahzadeh, R. A., & Pourhassan, B. (2021). Health risk assessment of occupational exposure to heavy metals in a steel casting unit of a steelmaking plant using Monte–Carlo simulation technique. *Toxicology and Industrial Health*, 37(7), 431–440. <https://doi.org/10.1177/07482337211019593>

13. Esmaeili, R., Ebrahimipour, K., Esmaeili, S. V., Karimi, A., Kamranifar, M., Pour, M. N., et al. (2024). Chemical health risk assessment of exposure to metal fumes among employed workers in a metal manufactory with an electric arc furnace. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 13(5), Article 18. [https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe\\_52\\_23](https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe_52_23)

14. Golbaghi, A., Nematpour, L., Damiri, Z., & Dehaghi, B. F. (2021). Carcinogenic and non-carcinogenic health risk assessment of air pollutant in a steel industry. *Pakistan Journal of Medical & Health Sciences*, 15(7), 1950–1955. <https://doi.org/10.53350/pjmhs211571950>

15. Mousavi, M., Emrani, J., Teleha, J. C., Jiang, G., Johnson, B. D., Shamshiripour, A., & Fini, E. H. (2024). Health risks of asphalt emission: State-of-the-art, advances and research gaps. *Journal of Hazardous Materials*, 480, Article 136048. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136048>

16. Pahlavan, F., Gholipour, A., Zhou, T., & Fini, E. H. (2023). Cleaner asphalt production by suppressing emissions using phenolic compounds. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(7), 2737–2751. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05345>

17. Raulf-Heimsoth, M., Pesch, B., Kendzia, B., Spickenheuer, A., Bramer, R., Marczynski, B., & Brüning, T. (2011). Irritative effects of vapours and aerosols of bitumen on the airways assessed by non-invasive methods. *Archives of Toxicology*, 85, 41–52. <https://doi.org/10.1007/s00204-011-0681-6>

18. Tepper, A. L., Burr, G. A., Feng, H. A., Singal, M., Miller, A. K., Hanley, K. W., & Olsen, L. D. (2006). Acute symptoms associated with asphalt fume exposure among road pavers. *American Journal of Industrial Medicine*, 49(9), 728–739. <https://doi.org/10.1002/ajim.20346>

19. Wang, Z., Li, H., Jia, M., & Du, Q. (2024). Emission risk and inhibition technology of asphalt fume from crumb rubber modified asphalt. *Sustainability*, 16(20), 8840. <https://doi.org/10.3390/su16208840>

Стаття надійшла: 12.11.2025

Прийнято: 03.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025