

УДК 504.6:502.175

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.60.1226

## АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ КРАКОВА ЯК ФАКТОР ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСТА

КОСЬОР Л.<sup>1</sup>, *магістр*,  
КАЛДА Г.<sup>2,3</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
ПЕТРУХА-УРБАНІК К.<sup>4</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
РИБАЛКА К.<sup>5\*</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
СОКОЛАН Ю.<sup>6</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup> Кафедра водопостачання та водовідведення, Жешувська політехніка, вул. Повстанців Варшави, 12, 35-959, Жешув, Польща, тел. +48-794-203-939, e-mail: [kaldagal@prz.edu.pl](mailto:kaldagal@prz.edu.pl), ORCID ID: 0009-0008-5262-4575

<sup>2</sup> Кафедра водопостачання та водовідведення, Жешувська політехніка, вул. Повстанців Варшави, 12, 35-959, Жешув, Польща, тел. +48-662-690-618, e-mail: [kaldagal@prz.edu.pl](mailto:kaldagal@prz.edu.pl), ORCID ID: 0000-0002-5142-0473

<sup>3</sup> Кафедра будівництва та цивільної безпеки, Хмельницький національний університет, вул. Інститутська, 11, 29016, Хмельницький, Україна, тел. +38 (097) 478-59-86, e-mail: [kalda.galina@ukr.net](mailto:kalda.galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-6309-7661

<sup>4</sup> Кафедра водопостачання та водовідведення, Жешувська політехніка, вул. Повстанців Варшави, 12, 35-959, Жешув, Польща, тел. +48-663-144-913, e-mail: [kaldagal@prz.edu.pl](mailto:kaldagal@prz.edu.pl), ORCID ID: 0000-0003-1160-9009

<sup>5\*</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 905-51-42, e-mail: [ekaterina.rybalka1980@gmail.com](mailto:ekaterina.rybalka1980@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7049-6871

<sup>6</sup> Кафедра будівництва та цивільної безпеки, Хмельницький національний університет, вул. Інститутська, 11, 29016, Хмельницький, Україна, тел. +38 (068) 202-16-17, e-mail: [sokolan.julia@gmail.com](mailto:sokolan.julia@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-0273-5719

**Анотація. Постановка проблеми.** У статті розглядається проблема забруднення повітря Кракова такими речовинами, як зважені тверді частинки (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>), оксиди азоту (NO<sub>x</sub>), оксиди сірки (SO<sub>x</sub>) і бенз(а)пірен, які мають серйозні наслідки як для здоров'я людини, так і для всієї екосистеми. Також проведено аналіз забруднення повітря від джерел шуму. Аналіз даних про якість повітря та рівень шуму дозволить зрозуміти масштаб проблеми та визначити ключові фактори, що впливають на забруднення навколишнього середовища. **Метою роботи** є визначення джерел викидів забруднюючих речовин у повітря та проведення порівняльного аналізу обсягів цих викидів у Кракові у 2019-2024 роках. **Висновок.** Використано методику тестування забруднення повітря хімічними речовинами з різних джерел та методику розрахунку шуму як одного із видів забруднення навколишнього середовища. Наведено результати досліджень забруднення атмосферного повітря від таких основних джерел, як автомобільний і залізничний транспорт, комунально-побутовий сектор, точкові джерела, відвали та шахти, а також джерела транспортного, міського та промислового шуму. Найбільшу загрозу становлять викиди з автомобільного транспорту, який також є основним джерелом шумового забруднення повітря. Основними джерелами викидів з комунально-побутового сектору є низько ефективне побутове обладнання, котельні, поганий технічний стан їх та спалювання неякісного палива та побутових відходів. Основними джерелами викидів точкового сектору є великі промислові об'єкти ТЕЦ, теплоцентралі, котельні, сміттєспалювальні заводи, а також нафтопереробні, сталеливарні, цементні заводи, хімічна та переробна промисловість. З метою зменшення викидів з побутових котелень проводять термомодернізацію будівель та заміну джерел тепла на більш екологічні. Важливим елементом є скорочення викидів від точкових джерел шляхом впровадження сучасних рішень, таких як циклони, рукавні фільтри, електрофільтри та каталітичні нейтралізатори. Заміна автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння на електромобілі значно зменшить викиди від транспорту та покращить акустичний клімат міста.

**Ключові слова:** забруднення повітря; навколишнє середовище; транспорт; комунально-побутовий сектор; шум; земляні роботи; точкові джерела

## ANALYSIS OF AIR POLLUTION IN KRAKOV AS A FACTOR OF THE CITY'S ECOLOGICAL SAFETY

KOSIOR L.<sup>1</sup>, *Master*,  
KALDA G.<sup>2,3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
PIETRUCHA-URBANIK K.<sup>4</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
RYBALKA K.<sup>5\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

SOKOLAN Yu.<sup>6</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Water Supply and Sewage Systems, Rzeszow University of Technology, 12, al. Powstancow Warszawy, 35-959, Rzeszow, Poland, tel. +48-794-203-939, e-mail: [kaldagal@prz.edu.pl](mailto:kaldagal@prz.edu.pl), ORCID ID: 0009-0008-5262-4575

<sup>2</sup> Department of Water Supply and Sewage Systems, Rzeszow University of Technology, 12, al. Powstancow Warszawy, 35-959, Rzeszow, Poland, tel. +48-662-690-618, e-mail: [kaldagal@prz.edu.pl](mailto:kaldagal@prz.edu.pl), ORCID ID: 0000-0002-5142-0473

<sup>3</sup> Department of Construction and Civil Security, Khmelnytskyi National University, 11, Instytutaska str., Khmelnytskyi, 29016, Ukraine, tel. +38 (097) 478-59-86, e-mail: [kalda.galina@ukr.net](mailto:kalda.galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-6309-7661

<sup>4</sup> Department of Water Supply and Sewage Systems, Rzeszow University of Technology, 12, al. Powstancow Warszawy, 35-959, Rzeszow, Poland, tel. +48-663-144-913, e-mail: [kaldagal@prz.edu.pl](mailto:kaldagal@prz.edu.pl), ORCID ID: 0000-0003-1160-9009

<sup>5\*</sup> Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 905-51-42, e-mail: [ekaterina.rybalka1980@gmail.com](mailto:ekaterina.rybalka1980@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7049-6871

<sup>6</sup> Department of Construction and Civil Security, Khmelnytskyi National University, 11, Instytutaska Str., Khmelnytskyi, 29016, Ukraine, tel. +38 (068) 202-16-17, e-mail: [sokolan.julia@gmail.com](mailto:sokolan.julia@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-0273-5719

**Abstract. Statement of the problem.** The article discusses the issue of air pollution in a city located in the Małopolskie Voivodeship caused by substances such as particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), and benzo(a)pyrene, which have serious consequences for both human health and the entire ecosystem. An analysis of air pollution from noise sources was also conducted. The analysis of data concerning air quality and noise levels makes it possible to understand the scale of the problem and identify the key factors affecting environmental pollution. **Objective.** The aim of the study is to determine the sources of air pollutant emissions and to conduct a comparative analysis of their magnitude in a city in the Małopolskie Voivodeship in the years 2019–2024. **Conclusion.** The methodology applied included the examination of air pollution caused by chemical substances originating from various sources and the calculation of noise as one of the types of environmental pollution. The study presents the results of air pollution analyses from major sources such as road and rail transport, the municipal and residential sector, point sources, heaps and excavations, as well as noise sources of transport, municipal, and industrial origin. The greatest threat is posed by emissions from road transport, which is also the main source of noise pollution. The main sources of emissions in the municipal and residential sector are low-efficiency household devices, boiler installations, improper operation, poor technical condition, and the combustion of low-quality fuels and municipal waste. The main emission sources in the point sector include large industrial facilities, combined heat and power plants, heating plants, boiler houses, waste incineration plants, as well as refineries, steelworks, cement plants, and the chemical and processing industries. To reduce emissions, it is necessary to continue combating low emissions from household boiler rooms through building thermal modernization and replacing heat sources with more ecological ones. Another important measure is to limit emissions from point sources by implementing modern technologies such as cyclones, bag filters, electrostatic precipitators, and catalysts. Replacing combustion vehicles with electric ones would significantly reduce transport-related emissions and improve the city's acoustic climate.

**Keywords:** *pollution of the air; environment; transport; municipal and residential sector; noise; excavations; point sources*

**Постановка проблеми.** Забруднення повітря є однією з найсерйозніших екологічних загроз, з якими стикається сучасний світ, негативні наслідки якого впливають не лише на природу, а й на людей. Зростаюча кількість населення нашої планети піддається шкідливому впливу хімічних речовин, пилу та газів. Протягом останніх десятиліть інтенсивна урбанізація, промисловий розвиток та транспорт сприяли значному погіршенню якості повітря в багатьох регіонах і у багатьох країнах. До цього додалися ще проблеми, пов'язані із забрудненням повітря від щоденних числених вибухів у війні в Україні. У статті ми розглянемо основні джерела забруднення повітряного середовища одного із

найбільших міст Польщі – Кракова, якими є вихлопні гази автомобілів, промисловість та спалювання палива у домогосподарствах. Такі речовини, як тверді частинки (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>), оксиди азоту (NO<sub>x</sub>), оксиди сірки (SO<sub>x</sub>) та бензо(а)пірен, потрапляючи в атмосферу, мають шкідливий вплив як для здоров'я людини, так і для всієї екосистеми. Тривале знаходження шкідливих речовин в атмосфері може призвести до розвитку чисельних серйозних захворювань, що вражають дихальну та серцево-судинну системи. Тверді частинки PM<sub>2,5</sub> особливо небезпечні, оскільки вони можуть проникати в найглибші частини легень, збільшуючи ризик запалення та хронічних захворювань легень, таких як астма та хронічна

обструктивна хвороба легень. Крім того, забруднене повітря сприяє розвитку серцевих захворювань, інсульту та раку, зокрема раку легень. Дослідження показують, що тривалий вплив забруднення повітря також може сприяти розвитку нейродегенеративних розладів, таких як деменція та хвороба Альцгеймера. Групи ризику, до яких відносяться діти, люди похилого віку, вагітні жінки та люди з хронічними респіраторними або серцевими захворюваннями, особливо вразливі до негативного впливу забруднення повітря. У дітей, які швидко розвиваються, забруднення повітря може впливати на ріст легень і збільшувати ризик астми та інших респіраторних проблем. У людей похилого віку з ослабленою імунною системою та зниженою функцією дихання наслідки можуть бути більш серйозними, що призводить до погіршення якості життя та збільшення кількості госпіталізацій і смертей [1–4].

У відповідь на зростаючу загрозу забруднення повітря багато країн, включаючи Польщу, запроваджують правила, спрямовані на скорочення викидів, інвестування у відновлювані джерела енергії та сприяння розвитку транспорту з низьким рівнем викидів. Багато великих міст, в тому числі Краків, стикаються із серйозними проблемами якості повітря та шуму, що негативно впливає на здоров'я їхніх мешканців. У цій статті детально розглянуто основні джерела забруднення повітря Кракова. Аналіз даних про якість повітря та рівень шуму дозволить нам зрозуміти масштаб проблеми та визначити ключові фактори, що впливають на забруднення навколишнього середовища.

**Аналіз публікацій.** Повітря навколишнього середовища забруднюється газоподібними, твердими або рідкими речовинами, що присутні в повітрі у кількостях, що перевищують їх середньодопустимий вміст. Забруднене повітря – це повітря, хімічний склад якого може негативно впливати на здоров'я людей, тварин і рослин, а також на інші компоненти навколишнього середовища, такі як вода та

грунт. Забруднення повітря є найбільш шкідливим із усіх забруднювачів, оскільки повітряні забруднювачі є рухливими, швидко переміщуються і можуть за короткий проміжок часу забруднити великі території. Такі забруднювачі поділяються на пил та газу [1; 5–7].

Види забруднювачів у вигляді пилу – то:

1. Тверді частинки PM10 – це суміш зважених частинок діаметром менше 10 мкм. Речовини, які можуть бути присутніми у твердих частинках PM10 та вважаються забруднювачами повітря – це свинець (Pb), кадмій (Cd) - важкі метали; миш'як (As), нікель (Ni) - токсичні елементи.

2. Бензо(а)пірен (B(a)P) – хімічна сполука, канцероген.

3. PM2,5 – тверді частинки діаметром менше 2,5 мкм.

4. Органічні тверді частинки – біологічні частинки, розсіяні у повітрі або іншій газовій фазі.

5. Тверді частинки мінерального походження, що різняться за розміром та хімічним складом.

6. Дрібні металеві частинки.

Типи газоподібних забруднювачів:

1. Діоксид сірки (SO<sub>2</sub>) – безбарвний газ з різким, їдким та задушливим запахом, що сильно подразнює дихальні шляхи.

2. Чадний газ (CO) – газ без запаху, кольору, смаку, високотоксичний, щільність якого подібна до щільності повітря.

3. Діоксид азоту (NO<sub>2</sub>) – проміжний продукт у промисловому синтезі азотної кислоти.

4. Бензол (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) – органічна хімічна сполука з групи миш'яку.

5. Озон (O<sub>3</sub>) – алотропна форма кисню [8; 9].

Існує три основні джерела викидів забруднювачів атмосфери:

1. Точкові джерела – переважно великі промислові підприємства, що викидають пил, оксид азоту, діоксид сірки, чадний газ та важкі метали.

2. Поверхневі (дифузні) – котельні, домашні печі та невеликі промислові підприємства, що викидають переважно пил та діоксид сірки.

3. Лінійні – переважно забруднення від транспорту, що викидає оксиди азоту, оксиди вуглецю, ароматичні вуглеводи та важкі метали [10].

У Польщі найбільшою проблемою є забруднення повітря твердими частинками PM10 та PM2,5 і бензо(а)піреном. Найважливішими джерелами цих забруднювачів є промисловість, автомобільний транспорт, енергетичний сектор та вихлопні гази від котлів на твердому паливі та від печей у домогосподарствах [9].

До причин поганої якості повітря у Польщі належать, наприклад, відсутність просторового планування, що забезпечує сталий розвиток міст; розвиток транспорту, що базується на великій і постійно зростаючій кількості автомобілів; розвиток коридорів повітрообміну (зелених зон); висока ціна на газ; застарілі системи опалення; спалювання відходів; низька

екологічна свідомість суспільства та високе споживання енергії.

Забруднення повітря в містах є серйозною проблемою з наслідками для довкілля та здоров'я людини. Моніторинг якості повітря має вирішальне значення для контролю забруднення, прийняття політичних рішень та впровадження екологічних норм [2; 11].

**Метою** цієї статті є визначення джерел викидів забруднюючих речовин у повітря та аналіз обсягів цих викидів у Кракові у 2019–2024 роках.

**Виклад основного матеріалу.**

**Джерела забруднення повітря у Кракові.**

**Забруднення повітря автомобільним транспортом.** У таблиці 1 представлені результати вимірювань викидів забруднюючих речовин у повітря автомобільним транспортом у 2019, 2020 та 2024 роках.

Таблиця 1

**Зведена інформація про хімічні викиди від автомобільного транспорту в Кракові**

Назва та код зони	Площа поверхні, [км <sup>2</sup> ]	Календарний рік	Тип забруднюючої речовини	Кількість викидів, [кг/рік]
Краківська агломерація PL1201	327	2024	Викиди SO <sub>x</sub>	16 159
		2020		4 096
		2019		3 897
		2024	Викиди NO <sub>x</sub>	2 279 331
		2020		1 912 030
		2019		1 971 206
		2024	Викиди PM10	273 213
		2020		129 371
		2019		131 227
		2024	Викиди PM2,5	150 274
		2020		97 484
		2019		102 868
2024	Викиди B(a)P	3,3		
2020		1,9		
2019		1,9		

Аналізуючи значення, представлені в таблиці 1, впливає, що у 2019–2024 роках спостерігалось збільшення викидів усіх протестованих забруднювачів повітря від автомобільного транспорту. Зниження рівня забруднення у 2020 році було спричинене локдауном, запровадженим унаслідок пандемії коронавірусу (SARS-CoV-2). Викиди оксидів сірки, азоту, твердих частинок PM10 та PM2,5, а також

бензо(а)пірену збільшуються через постійно зростаючу кількість транспортних засобів на дорогах та їх неналежне обслуговування та ремонт. Дослідження показують, що кількість автомобілів на вулицях Кракова щороку збільшується, а їхній середній вік продовжує зростати. Дизельні автомобілі, що не відповідають стандарту Євро-5, та бензинові автомобілі, що не відповідають стандарту Євро-3, становлять найбільшу

частку викидів від автомобільного транспорту. Зростання кількості кур'єрських компаній також сприяло збільшенню викидів. Зросла кількість комерційних транспортних засобів, які викидають більше забруднюючих речовин, ніж легкові автомобілі. Влада Кракова вжила заходів щодо покращення якості повітря, а саме запровадила «Зони чистого транспорту» та зміни в управлінні дорожнім рухом. Розширення дорожньої інфраструктури призвело до тимчасових перебоїв у русі, що спричинило додаткове забруднення середовища міста. Затори на дорогах мали значний вплив на збільшення забруднення

повітря. У методі оцінки викидів від сектору автомобільного транспорту, який було використано у 2024 році, запровадили відмінності порівняно з тими, що були використанні у попередні роки. Ці зміни зумовлені модифікаціями та вдосконаленням методології оцінки викидів, що був запропонований Інститутом охорони навколишнього середовища.

**Забруднення повітря комунально-побутовими секторами.** У таблиці 2 представлені результати вимірювань викидів забруднюючих речовин у повітря комунально-побутовими секторами у 2019, 2020 та 2024 роках.

Таблиця 2

## Зведена інформація про хімічні викиди комунально-побутовими секторами Кракова

Назва та код зони	Площа поверхні, [км <sup>2</sup> ]	Календарний рік	Тип забруднюючої речовини	Кількість викидів, [кг/рік]
Краківська агломерація PL1201	327	2024	Викиди SO <sub>x</sub>	41 115
		2020		20 082
		2019		442 210
		2024	Викиди NO <sub>x</sub>	268 614
		2020		290 832
		2019		286 226
		2024	Викиди PM10	66 342
		2020		40 834
		2019		574 890
		2024	Викиди PM2,5	57 520
		2020		40 047
		2019		564 923
		2024	Викиди B(a)P	26,7
		2020		20,2
		2019		272,1

Аналіз значень, наведених у таблиці 2, показує зменшення викидів оксидів сірки, азоту, твердих частинок PM10 та PM2,5, а також бензо(а)пірену з комунально-побутового сектору. Рівні всіх цих забруднюючих речовин у 2024 році нижчі, ніж у 2019. Протягом опалювального сезону комунально-житловий сектор несе основну відповідальність за забруднення повітряного середовища Кракова. Із зростанням населення міста частка опалення викопним паливом, як джерела забруднення, неухильно зростала. Наразі це є доміантним джерелом тепла на протязі зимових місяців. Тепер у Кракові діє повна заборона на використання твердого палива для опалення, тому основні

джерела забруднення такого типу тепер розташовані за межами міста.

Зниження концентрацій забруднюючих речовин відбулося завдяки впровадженню програм, що підтримують заміну вугільних печей на більш екологічні джерела опалення. Збільшилась кількість будівель, що проходять термомодернізацію, включаючи заміну вікон, покращення ізоляції будівель, встановлення енергозберігаючих систем та відновлювальних джерел енергії. Наразі спостерігається зменшення попиту на енергію для опалення, що призвело до зменшення викидів.

Аналізуючи викиди забруднюючих речовин у повітря від комунально-побутових секторів Кракова, помітне зниження у

2020 році також пов'язане із епідемією коронавірусу (SARS-CoV-2). Внаслідок соціальної ізоляції економічна активність знизилась, що призвело до збільшення кількості людей, які працювали дистанційно. А це призвело до зменшення попиту на енергію в офісних будівлях. Значна кількість підприємств припинила свою діяльність, що призвело до безробіття і до зниження достатку населення, що в свою чергу призвело до зниження витрат на опалення будинків та до зменшення викидів у навколишнє середовище [12].

Метод, що використовувався для оцінки якості повітря у 2024 році, змінився порівняно з попередніми роками завдяки модифікаціям, впровадженим Інститутом охорони навколишнього середовища. Нововведення пов'язане із врахуванням

викидів при нагріванні гарячої води для побутових потреб, яке розраховується на основі очікуваної кількості домогосподарств у певній будівлі. Це значення залежить від типу будівлі та її площі. При проведенні аналізу використовувались дані про коефіцієнти викидів та частки палива аналогічно визначенню викидів, пов'язаних із опаленням будівель. Крім того, коефіцієнти викидів були оновлені, приділяючи особливу увагу змінам бензо(а)пірену від спалювання вугілля та деревини.

**Забруднення повітря від точкових джерел.** У таблиці 3 представлені результати вимірювань викидів забруднюючих речовин у повітря навколишнього середовища міста Краків від точкових джерел за 2019, 2020 та 2024 роки.

Таблиця 3

Зведена інформація про хімічні викиди з точкових джерел у Кракові

Назва та код зони	Площа поверхні, [км <sup>2</sup> ]	Календарний рік	Тип забруднюючої речовини	Кількість викидів, [кг/рік]
Краківська агломерація PL1201	327	2024	Викиди SO <sub>x</sub>	808 691
		2020		1 523 180
		2019		2 910 517
		2024	Викиди NO <sub>x</sub>	1 723 195
		2020		2 399 394
		2019		3 810 346
		2024	Викиди PM <sub>10</sub>	145 259
		2020		219 358
		2019		260 117
		2024	Викиди PM <sub>2,5</sub>	70 137
		2020		169 851
		2019		203 078
		2024	Викиди B(a)P	14,7
		2020		13,1
		2019		8,2

З таблиці 3 видно зменшення викидів оксидів сірки, азоту, PM<sub>10</sub> та PM<sub>2,5</sub>. Зменшення цих речовин відбулось завдяки посиленню норм щодо промислових викидів та модернізації промислових установок. На сьогодні промислові підприємства адаптувались щодо більш суворих екологічних стандартів. Багато компаній вирішили модернізувати своє енергетичне та технологічне обладнання. Підприємства інвестували в технології, що дозволяють використовувати сонячну, вітрову енергетику та енергію біомаси.

Збільшення викидів бенз(а)пірену пов'язане із спалюванням твердого палива у сусідніх муніципалітетах [1; 5; 10]. І хоча існує заборона щодо використання твердого палива у Кракові, забруднюючі речовини мігрують до міста з навколишніх територій і тим самим збільшують забруднення повітря міста, особливо під час опалювального сезону.

До основних підприємств, що викидають речовини у повітряне середовище, відносяться: PGE Energia Ciepła Oddział 1, TAMEH Polska (виробництво енергетичних

носіїв), Holcim Polska S.A. (виробництво будівельних матеріалів), завод Alfa Laval (виробництво обладнання для відцентрової сепарації), ArcelorMittal Poland S.A. (виробництво сталі), Краківський технологічний парк [11].

**Забруднення повітря з відвалів та шахт.** У таблиці 4 представлені результати вимірювань викидів забруднюючих речовин у повітря з відвалів та шахт у 2019, 2020 та 2024 роках.

Таблиця 4

Зведена інформація про хімічні викиди з відвалів та шахт у Кракові

Назва та код зони	Площа поверхні, [км <sup>2</sup> ]	Календарний рік	Тип забруднюючої речовини	Кількість викидів, [кг/рік]
Краківська агломерація PL1201	327	2024	Викиди PM10	215
		2020		7 586
		2019		92 280
		2024	Викиди PM2,5	156
		2020		1 820
		2019		22 142

З таблиці 4 видно зменшення викидів твердих частинок PM10 та PM2,5 між 2019 та 2024 роками. На зменшення викидів забруднюючих речовин з відвалів та шахт вплинуло запровадження правових норм щодо управління відходами гірничодобувної промисловості та моніторингу їхнього впливу на навколишнє середовище. Були впроваджені інноваційні технологічні рішення. Наприклад, трансформовані території на колишньому вапняковому кар'єрі. Частина території була затоплена водою, що призвело до появи Залеви Закшувека, де на місці видобутку вугілля зараз розташована зелена зона навкруги штучної водойми. Район Копець Ванда перетворився на зелену зону, а території колишніх піщаних та гравійних кар'єрів перетворені на пішохідні та велосипедні доріжки. У 2024 році було проведено польові дослідження у рамках проекту під назвою «Розробка параметризації викидів пилу із звалищ та котлованів на основі результатів вимірювань та математичного моделювання – Пілотний проект» з метою пов'язати вторинні викиди пилу PM10 та PM2,5 зі звалищ та котлованів із швидкістю вітру та площею, яку займає даний об'єкт.

**Шумове забруднення повітря.** Шум у Кракові є серйозною проблемою. Він впливає негативно на багатьох мешканців, особливо у районах, прилеглих до основних транспортних артерій. Найбільшим джерелом шуму у місті є шум від великої

кількості легкових автомобілів та міського транспорту, який у багатьох районах міста перевищує допустимі норми [13; 14]. Дані досліджень показують, що понад 20 тисяч мешканців проживають у районах, що знаходяться у надмірному дорожньому шумі. Рівень шумового забруднення в районах навколо доріг залежить від багатьох факторів, таких як схеми руху, тип дороги, а також стан і тип дорожнього покриття. Топографія також відіграє значну роль. Крім того, на рівень шуму впливають види землекористування, тип будівель, розташованих поблизу доріг, а також методи забудови. Дорожня мережа Кракова включає національні та регіональні дороги. Через місто також проходить швидкісна автомагістраль. У межах міста Краків налічується 36,3 км національних доріг, 26,3 км регіональних доріг, 265,6 км районних доріг та 782,0 км муніципальних доріг. Значним фактором, що впливає на акустичний клімат міста, є дороги, по яким курсують важкі транспортні засоби. Слід зазначити, що все таки більша частина транспортного руху поглинається об'їзною дорогою Кракова [15].

Основними джерелами залізничного шуму є, перш за все, під'їзні шляхи та залізничні станції. Краків є важливим залізничним вузлом, що з'єднує регіони, міста та внутрішні пункти призначення. На рівень шумового забруднення залізниці впливають структура руху, тип колії та її

стан. Більша частка вантажних поїздів у структурі руху посилює негативний вплив залізничних колій на акустичний клімат міста. У Кракові є два головних вокзали: Головний залізничний вокзал і вокзал Краків Плашув. Залізничні колії проходять в адміністративних межах міста. Сполучення, які мають найбільший вплив на акустичний клімат міста, це: Краків Головний – Домброва Гурнича, Краків Плашув – Освенцім, Краків Головний – Варшава Західна та Краків Головний – Медика [16; 17].

Краків також є важливим економічним центром, де зосереджена значна частина промисловості Малопольщі. Разом із сусідніми містами, такими як Бохня, Скавіна, Мисленіце та Величка, він утворює Краківський промисловий район. У регіоні переважають сталеливарна та електротехнічна промисловість. Хімічна промисловість, включаючи фармацевтичну та газову промисловість, також відіграє значну роль. У самому Кракові розташована велика кількість промислових та комерційних об'єктів. Великі промислові зони зосереджені в районах Нова Гута та в Чижинах. Ці промислові заклади працюють цілодобово, що суттєво впливає на місцевий акустичний клімат. Багато інших заводів розташовані переважно в центральній та південній частинах міста. У місті також розташована велика кількість торгових центрів з великими парковками поблизу. Ці місця, крім забруднення атмосфери вихлопними газами, також створюють шум, особливо вдень і ввечері.

Основним джерелом шуму від літаків є робота міжнародного аеропорту Краків-Баліце імені Яна Павла II, розташованого в 11 км на захід від центру Кракова у містечку Баліце. Це досить потужний аеропорт, який став набагато більшим по кількості авіарейсів за останні майже 4 роки. Це пов'язано з тим, то пасажиропотік значно зріс після закриття аеропортів України з початку війни. Найгучнішим житловим районом є район Борковська, де вимірвальні прилади фіксують рівень шуму навіть більше 70 дБ. А біля Національного

музею рівень шуму не буває нижче 74–75 дБ [18–20].

**Інші джерела забруднення повітря.** Проблема забруднення атмосферного повітря у Кракові тісно пов'язана з його географічним розташуванням та метеорологічними характеристиками міста. Краків розташований у долині, розділений навпіл річкою Вісла, що в поєднанні з унікальним рельєфом значно перешкоджає природній вентиляції повітря як у вертикальному, так і в горизонтальному вимірі. Гори Татри та міжгірський Карпатський басейн розташовані лише за 100 км на південь від міста, що сприяє виникненню сильних теплих вітрів на території міста [15–17]. Це також погіршує хімічний склад атмосферного повітря.

Іншим джерелом є викиди, пов'язані з хімічними реакціями, каталітичними процесами та певними видами при виплавці металів, які не підпадають під стандартні промислові категорії. До цієї ж групи також належать викиди від залізничного та повітряного транспорту. Слід також враховувати транспортування сировини, такої як пісок, гравій та каміння, які не класифікуються як автомобільний транспорт.

У Кракові також триває інтенсивне будівництво як нових будівель, так і реконструкція і знесення старих будинків, що також спричиняє значне збільшення викидів твердих частинок. Такі роботи, як земляні, транспортування будівельних матеріалів, демонтаж застарілих будівель, можуть негативно впливати на якість атмосферного повітря міста.

На забруднення повітря міста та його околиць також впливають викиди, пов'язані з військовою діяльністю, яка сприяє викидам парникових газів. Ці викиди є результатом споживання палива армією та використання боєприпасів під час навчання, кількість яких значно збільшилась під час воєної агресії на Україні і шантажу європейських країн з російської сторони [21].

## Висновки

Системи моніторингу, які досить активно останнім часом використовуються, дозволяють швидко виявляти збільшення концентрацій забруючих речовин, в тому числі у атмосферному повітрі. Регулярний збір даних про якість повітря дозволяє аналізувати зміни та виявляти джерела забруднення. Це важливо для планування дій, спрямованих на покращення якості повітря. Інформація про джерела викидів має вирішальне значення для розробки політики охорони навколишнього середовища, екологічної безпеки та правових норм, спрямованих на обмеження шкідливих викидів у атмосферу.

Результати проведеного аналізу показали, що не всі обмеження щодо забруднення повітря, запроваджені міською владою Кракова, дали очікувані результати. Наразі найбільшу загрозу становлять викиди забруднюючих речовин від автомобільного транспорту. У 2024 році загальні викиди оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>), твердих частинок (PM<sub>10</sub> та PM<sub>2,5</sub>) та бензо(а)пірену від автомобільного транспорту в Кракові склали понад 2 млн 700 тисяч кг/рік. Рівень забруднення у цьому секторі зріс порівняно з попередніми роками. Найвищі концентрації забруднюючих речовин були зафіксовані на дорогах та перехрестях з інтенсивним рухом транспорту. Постійно зростаюча кількість транспортних засобів на дорогах та їх неналежне обслуговування та ремонт сприяють проблемам забруднення повітря. Автомобільний транспорт також є основним джерелом забруднення навколишнього середовища шумом.

З результатів проведених аналізів видно, що найбільша проблема забруднення повітря в комунальних та побутових секторах була зафіксована теж у 2024 році. Загальні викиди оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>), твердих частинок (PM<sub>10</sub> та PM<sub>2,5</sub>) та бензо(а)пірену в Кракові склали біля 434 тисячі кг/рік. Основними джерелами викидів з цього сектору є низькоефективні побутові прилади, котельні установки, неправильна їх експлуатація, поганий

технічний стан та спалювання низькоякісного палива та побутових відходів. Незважаючи на нормативні акти, багато домогосподарств продовжували спалювати відходи, що значно погіршувало якість повітря.

У аналізовані роки спостерігалось зменшення викидів забруднюючих речовин у повітря з точкових джерел у Кракові. Незважаючи на скорочення викидів, значення залишились високими. У 2024 році загальні викиди оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>), твердих частинок (PM<sub>10</sub> та PM<sub>2,5</sub>) та бензо(а)пірену становили понад 2 млн 700 тисяч кг/рік. Збільшення викидів було зумовлене будівництвом нових заводів, а також розширенням і розвитком існуючих промислових закладів. Основними джерелами викидів з цього сектору є великі промислові об'єкти, теплоелектроцентралі, теплоцентралі, котельні, сміттєспалювальні заводи, а також нафтопереробні, сталеливарні, цементні заводи, хімічна та переробна промисловості.

Висока щільність населення та автомобільний, залізничний та трамвайний рух спричиняють ще й до всього високий рівень шуму. У багатьох частинах міста бракує тихих зон.

Щоб зменшити викиди забруднюючих речовин, слід підвищувати обізнаність громадян за допомогою проведення заходів з покращення якості повітря. Вкрай важливо продовжувати протидіяти викидам від побутових котлів шляхом продовження термомодернізації будівель та заміною джерел тепла на більш екологічні. Також надзвичайно важливо скоротити викиди від точкових джерел шляхом впровадження сучасних рішень, таких як використання циклонів, рукавних фільтрів, електростатичних фільтрів та каталітичних нейтралізаторів. Заміна автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння на електроавтомобілі значно зменшить викиди від транспорту та покращить акустичний клімат міста. Впровадження інтелектуальних світлофорів, систем управління дорожнім рухом, розвиток громадського транспорту та

організація зелених зон також позитивно вплинуть на навколишнє середовище.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jędrak J., Konduracka E., Badyda A., Dąbrowiecki A. Wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie. 2017.
2. URL: [https://loveair.pl/smog/najbardziej-zanieczyszczone-miasta-polski-i-europy?srsId=AfmBOOrL7L2q9PPKD3ILownvoSQU\\_edEEhpxu2PV4gMnLUVywkRnwzP](https://loveair.pl/smog/najbardziej-zanieczyszczone-miasta-polski-i-europy?srsId=AfmBOOrL7L2q9PPKD3ILownvoSQU_edEEhpxu2PV4gMnLUVywkRnwzP)
3. Kalda G., Krokos J., Pietrucha-Urbanik K. Analysis of the Factors Contributing to Environmental Pollution in the Subcarpathian Province. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2024. Vol 71. Pp. 19–31. URL: <https://doi.org/10.7862/rb.2024.2>
4. Kalda G., Łopuszyńska P. Analiza zagrożeń środowiska Podkarpacia. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. T. XXXI, z. 61 (nr 1/2014). 2014. S. 101–117.
5. Danek T., Weglińska E., Zareba M. The influence of meteorological factors and terrain on air pollution concentration and migration : a geostatistical case study from Krakow. *Scientific Reports*. 2022.
6. URL: [https://przemylisrodowisko.pl/jakie-sa-glowne-zrodla-emisji-zanieczyszczen-do-powietrza-z-przemyslu-i-jakie-sektory-najbardziej-przyczyniaja-sie-do-tego#\\_ftn1](https://przemylisrodowisko.pl/jakie-sa-glowne-zrodla-emisji-zanieczyszczen-do-powietrza-z-przemyslu-i-jakie-sektory-najbardziej-przyczyniaja-sie-do-tego#_ftn1)
7. Kosior L., Kalda G., Pietrucha-Urbanik K. Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza Warszawy. *Problems and Innovations in the Development of Engineering, Technologies and Transport : II International scientific conference of students and young scientists*. 24–26.04.2025. Pp. 423–437.
8. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie : Ocena jakości powietrza w strefach w Polsce : Zbiorczy raport krajowy z rocznej oceny jakości powietrza w strefach wykonanej przez GIOŚ według zasad określonych w art. 89 ustawy “Prawo ochrony środowiska”. Warszawa, 2021.
9. Kuchcik M., Milewski P. Zanieczyszczenie powietrza w Polsce – stan, przyczyny i skutki. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. St. Leszczyckiego, PAN, 2018.
10. URL: <https://krakowskialarmsmogowy.pl/portfolio/analiza-zmian-jakosci-powietrza-w-krakowie-i-malopolsce/>
11. URL: [https://panoramafirm.pl/zaklady\\_produkcyjne/malopolskie,,krakow](https://panoramafirm.pl/zaklady_produkcyjne/malopolskie,,krakow)”
12. URL: [https://www.bip.krakow.pl/?sub\\_dok\\_id=20376](https://www.bip.krakow.pl/?sub_dok_id=20376)
13. Kalda G., Paździorny T., Pietrucha-Urbanik K. Noise Analysis and Reduction Methods in Sanitation Facilities and Equipment. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2022. Z. 69. Str. 17–26. DOI:10.7862/rb.2022.2.
14. Kalda G., Sokolan Yu., Pietrucha-Urbanik K., Studziński A. Occupational and Ecological Safety of Employees. Rzeszow, 2023. 156 p.
15. URL: <https://www.geoportal.gov.pl>
16. URL: [https://www.krakow.pl/start/13183,artykul,charakterystyka\\_obszaru\\_podlegajacego\\_ocenie.html](https://www.krakow.pl/start/13183,artykul,charakterystyka_obszaru_podlegajacego_ocenie.html)
17. URL: [https://www.krakow.pl/start/13224,artykul,identyfikacja\\_i\\_charakterystyka\\_zrodel\\_halasu.html](https://www.krakow.pl/start/13224,artykul,identyfikacja_i_charakterystyka_zrodel_halasu.html)
18. Saint-Gobain Polska. Raport : Polska w decybelach. 2020.
19. Kalda G. Ochrona przed hałasem. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*. Rzeszów, 2020. 151 str.
20. URL: <https://rynekpierwotny.pl/wiadomosci-mieszkaniowe/ciche-osiedla-mieszkaniowe/11998/>
21. URL: <https://ziemianarozdrozu.pl/przemilczane-emisje-wojny-i-dzialania-wojskowe-odbijaja-sie-rowniez-na-klimacie/>

### REFERENCES

1. Jędrak J., Konduracka E., Badyda A. and Dąbrowiecki A. Wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie. 2017. (in Polish).
2. URL: [https://loveair.pl/smog/najbardziej-zanieczyszczone-miasta-polski-i-europy?srsId=AfmBOOrL7L2q9PPKD3ILownvoSQU\\_edEEhpxu2PV4gMnLUVywkRnwzP](https://loveair.pl/smog/najbardziej-zanieczyszczone-miasta-polski-i-europy?srsId=AfmBOOrL7L2q9PPKD3ILownvoSQU_edEEhpxu2PV4gMnLUVywkRnwzP)
3. Kalda G., Krokos J. and Pietrucha-Urbanik K. Analysis of the Factors Contributing to Environmental Pollution in the Subcarpathian Province. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2024, vol. 71, pp. 19–31. URL: <https://doi.org/10.7862/rb.2024.2>
4. Kalda G. and Łopuszyńska P. Analiza zagrożeń środowiska Podkarpacia. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, t. XXXI, z. 61 (nr 1/2014), pp. 101–117. (in Polish).
5. Danek T., Weglińska E. and Zareba M. The influence of meteorological factors and terrain on air pollution concentration and migration : a geostatistical case study from Krakow. *Scientific Reports*. 2022.
6. URL: [https://przemylisrodowisko.pl/jakie-sa-glowne-zrodla-emisji-zanieczyszczen-do-powietrza-z-przemyslu-i-jakie-sektory-najbardziej-przyczyniaja-sie-do-tego#\\_ftn1](https://przemylisrodowisko.pl/jakie-sa-glowne-zrodla-emisji-zanieczyszczen-do-powietrza-z-przemyslu-i-jakie-sektory-najbardziej-przyczyniaja-sie-do-tego#_ftn1)
7. Kosior L., Kalda G. and Pietrucha-Urbanik K. Analiza stanu zanieczyszczenia powietrza Warszawy. *Problems and Innovations in the Development of Engineering, Technologies and Transport : . II International scientific conference of students and young scientists*. 24–26.04.2025, Khmelnytskyi, pp. 423–437.

8. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie : Ocena jakości powietrza w strefach w Polsce : Zbiórny raport krajowy z rocznej oceny jakości powietrza w strefach wykonanej przez GIOŚ według zasad określonych w art. 89 ustawy "Prawo ochrony środowisk", Warszawa, 2021. (in Polish).
9. Kuchcik M. & Milewski P. Zanieczyszczenie powietrza w Polsce – stan, przyczyny i skutki. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. St. Leszczyckiego, PAN, 2018.
10. URL: <https://krakowskialarmsmogowy.pl/portfolio/analiza-zmian-jakosci-powietrza-w-krakowie-i-malopolsce/>
11. URL: [https://panoramafirm.pl/zaklady\\_produkcyjne/malopolskie,,krakow](https://panoramafirm.pl/zaklady_produkcyjne/malopolskie,,krakow)"
12. URL: [https://www.bip.krakow.pl/?sub\\_dok\\_id=20376](https://www.bip.krakow.pl/?sub_dok_id=20376)
13. Kalda G., Paździorny T. and Pietrucha-Urbanik K. Noise Analysis and Reduction Methods in Sanitation Facilities and Equipment. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. 2022, z. 69, pp. 17–26. DOI:10.7862/rb.2022.2.
14. Kalda G., Sokolan Yu., Pietrucha-Urbanik K. and Studziński A. Occupational and Ecological Safety of Employees. Rzeszow, 2023, 156 p.
15. URL: <https://www.geoportal.gov.pl>
16. URL: [https://www.krakow.pl/start/13183,artykul,charakterystyka\\_obszaru\\_podlegajacego\\_ocenie.html](https://www.krakow.pl/start/13183,artykul,charakterystyka_obszaru_podlegajacego_ocenie.html)
17. URL: [https://www.krakow.pl/start/13224,artykul,identyfikacja\\_i\\_charakterystyka\\_zrodel\\_halasu.html](https://www.krakow.pl/start/13224,artykul,identyfikacja_i_charakterystyka_zrodel_halasu.html)
18. Saint-Gobain Polska. Raport : Polska w decybelach. 2020.
19. Kalda G. Ochrona przed hałasem. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów, 2020, 151 p.
20. URL: <https://rynekpierwotny.pl/wiadomosci-mieszkaniowe/ciche-osiedla-mieszkaniowe/11998/>
21. URL: <https://ziemianarozdrozu.pl/przemilczane-emisje-wojny-i-dzialania-wojskowe-odbijaja-sie-rowniez-na-klimacie/>

Надійшла до редакції: 13.02.2026.