

УДК 504

БАГІН А. В.¹, ІВАНЕНКО О. І.², ПАНОВ Є. М.², ІВАНЮТА С. П.³, МАРТИНЮК А. С.^{2*}

¹ Приватне акціонерне товариство «Український графіт»

² Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

³ Національний інститут стратегічних досліджень

СТРАТЕГІЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ВІД ПРАТ «УКРГРАФІТ» В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Дослідження спрямоване на аналіз рівня забруднення атмосфери підприємством ПрАТ «Укрграфіт», визначення канцерогенних та неканцерогенних ризиків для здоров'я населення, а також розробка рекомендацій щодо мінімізації шкідливого впливу в умовах сталого розвитку та поствоєнного відновлення промислового сектору.

Об'єктом дослідження є вплив викидів забруднюючих речовин ПрАТ «Укрграфіт» на навколишнє середовище в м. Запоріжжя. Математичне моделювання розсіювання викидів виконувалося за допомогою програмного середовища у ISC-AERMOD View. Оцінка ризиків для здоров'я населення проводилася відповідно до методології оцінки ризику для здоров'я населення (Human Health Risk Assessment). Для визначення оптимальних шляхів мінімізації забруднення було здійснено порівняльний аналіз міжнародного досвіду впровадження екологічних технологій у вуглеграфітовій промисловості.

Результати дослідження показали, що одною з найбільш важких забруднюючих речовин викидів ПрАТ «Укрграфіт» є пил недиференційований за складом (НДЗС), зокрема, суспендовані частинки PM₁₀ і PM_{2.5}. Загальний обсяг викидів дисперсних частинок 250,76 т/рік. При моделюванні інгаляційного впливу пріоритетних забруднюючих речовин у 80 рецепторних вузлах і 11 контрольних точках не зафіксовано перевищень допустимих рівнів концентрацій. Перевищення мінімального рівня сумарного неканцерогенного ризику (НІ) від викидів усіх пріоритетованих забруднюючих речовин у вузлах рецепторної сітки та контрольних точках за умови гострого інгаляційного впливу спостерігаються на відстані 500 м в усіх напрямках за румбами сторін світу, окрім західного та північно-західного напрямків. Коефіцієнти небезпеки (Н_Q) для окремих речовин не перевищували рівень $HQ \leq 1$, що свідчить про мінімальний ризик для здоров'я населення. Канцерогенний ризик, обумовлений присутністю бенз(а)пірену, оцінено на рівні $ICR_{total} < 1 \times 10^{-6}$, що відповідає мінімальному ризику згідно класифікації Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ). Рівні індивідуального ризику смерті (ІРМ) від впливу твердих частинок PM₁₀ у рецепторних вузлах та контрольних точках відповідає умовно прийнятному ризику, що потребує постійного контролю. Аналіз концентрацій забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери не виявив значних перевищень допустимих норм, проте показав потенційний вплив на стан здоров'я населення, яке проживає в зоні впливу підприємства. Це підкреслює необхідність підвищення ефективності екологічного контролю та вдосконалення газоочисних систем підприємства для забезпечення сталого розвитку та зменшення техногенного навантаження на довкілля. Для мінімізації негативного впливу підприємства запропоновано комплекс заходів, які включають модернізацію газоочисних систем, посилення екологічного моніторингу та адаптацію до міжнародних екологічних стандартів. Впровадження регенеративного термічного окислення (РТО) дозволить знизити концентрацію органічних сполук у викидах на 90 %. Додаткове встановлення рукавних фільтрів сприятиме зменшенню рівня твердих частинок PM₁₀ та PM_{2.5} на 99 %. Для забезпечення прозорості екологічного моніторингу необхідно розширити мережу автоматизованих постів контролю якості повітря, що дозволить в реальному часі отримувати дані про рівень забруднення та оперативно вживати відповідні заходи.

Запропоновані заходи дозволять суттєво знизити рівень забруднення та адаптувати підприємство до міжнародних екологічних стандартів, сприяючи сталому розвитку промислового сектора України.

Ключові слова: екологічні ризики, сталий розвиток, газоочисні технології, газоочисні системи, екологічний моніторинг

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2025.333976

* Corresponding author: martuniukartem1123@gmail.com

Received 14 March 2025; Accepted 24 April 2025

Постановка проблеми. Промислові підприємства є значними джерелами техногенного навантаження на довкілля, що призводить до забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів та ґрунтів. У воєнний час ці загрози посилюються через зниження ефективності екологічного моніторингу, руйнування природоохоронної інфраструктури та збільшення рівня техногенного навантаження.

Одним із найбільш значущих джерел промислових викидів в Україні є ПрАТ «Укрграфіт» – підприємство, що виробляє графітовану продукцію, зокрема електроди, які широко використовуються в металургійній галузі. Його діяльність пов'язана з викидами великої кількості забруднюючих речовин, зокрема, твердих частинок PM10, PM2.5 та поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАУ). У воєнний період контроль за цими викидами значно ускладнюється через руйнування частини екологічної інфраструктури, відсутність належного фінансування природоохоронних заходів та скорочення ресурсів для регулярного моніторингу.

Загальною науковою проблемою є вивчення впливу викидів промислових підприємств на здоров'я населення та їх відповідність принципам сталого розвитку. У багатьох дослідженнях підтверджено, що забруднення повітря промисловими викидами є основною причиною розвитку серцево-судинних та респіраторних захворювань у промислових регіонах. Наприклад, за даними Агентства з охорони довкілля США (EPA), підвищення концентрації дрібнодисперсних частинок PM2.5 на кожні 10 мкг/м³ збільшує ризик смертності на 8 % [1]. У промислових регіонах України ці показники можуть бути ще вищими через недостатній контроль та перевищення гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин.

Неконтрольоване забруднення повітря має значні наслідки для довкілля та здоров'я населення. Оцінка ризиків, виконана у попередніх міжнародних дослідженнях, вказує, що індивідуальний ризик смертності (IRM) у зоні впливу великих промислових підприємств може перевищувати допустимий рівень у 1,5–2 рази [2]. У випадку ПрАТ «Укрграфіт» ці показники можуть бути ще вищими через високу концентрацію оксиду вуглецю та твердих частинок у приземному шарі атмосфери.

Невирішеною частиною наукової проблеми є розробка ефективних заходів з мінімізації забруднення в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення України. У сучасних дослідженнях пропонуються різні технології очищення промислових викидів, зокрема регенеративне термічне окислення (РТО). Однак, адаптація цих технологій для українських підприємств вимагає додаткових досліджень щодо їхньої економічної доцільності та ефективності в умовах післявоєнної відбудови.

Аналіз попередніх досліджень. Оцінка впливу промислових підприємств на атмосферне повітря та здоров'я населення є важливим напрямом наукових досліджень, що охоплює різні методики аналізу ризиків, математичного моделювання розсіювання забруднюючих речовин та розробки технологій мінімізації шкідливих викидів. Загальною науковою проблемою є вплив промислових викидів на стан здоров'я населення та адаптація підприємств до екологічних стандартів сталого розвитку. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється оцінці канцерогенних та неканцерогенних ризиків, спричинених забрудненням атмосферного повітря, а також пошуку ефективних технологічних рішень для зменшення викидів забруднюючих речовин.

Результати досліджень, проведених в Європейському Союзі та США, підтверджують суттєвий вплив промислового забруднення на тривалість життя та поширеність респіраторних і серцево-судинних захворювань. Наприклад, згідно з даними EPA, вплив дрібнодисперсних частинок PM2.5 та PM10 є однією з основних причин розвитку хронічних захворювань дихальної системи та серцево-судинної недостатності, особливо серед населення промислових регіонів [1]. У контексті промислових регіонів України вплив може підвищуватись через високу концентрацію забруднювачів та слабку систему екологічного моніторингу.

Окрему увагу в наукових дослідженнях приділено оцінці канцерогенних ризиків, пов'язаних із викидами ПАУ. Викиди ПАУ з промислових підприємств у Китаї є основною причиною підвищення рівня онкологічних захворювань серед населення промислових районів [3]. Аналогічні дослідження в Європейському Союзі підтверджують, що викиди важких металів і вуглеводневих сполук значною мірою сприяють зростанню ризиків розвитку ракових захворювань у населення, яке мешкає в зонах інтенсивної промислової діяльності [4].

Попри значний обсяг попередніх досліджень, невирішеною частиною наукової проблеми є оцінка впливу війни на промислові викиди та ефективність екологічного моніторингу в Україні. Через воєнні дії багато постів спостереження за якістю повітря було зруйновано або виведено з експлуатації, що ускладнює оцінку реального рівня забруднення. Дослідження екологічного впливу промислових підприємств у період війни залишаються недостатньо вивченими, що створює науковий та практичний виклик для адаптації екологічної політики до кризових умов.

Таким чином, дана стаття спрямована на вирішення двох ключових аспектів: (1) визначення рівня забруднення атмосферного повітря в зоні впливу ПрАТ «Укрграфіт» в умовах війни й оцінку реальних ризиків для здоров'я населення та (2) розробку технологічних та управлінських рішень для мінімізації негативного впливу промислових підприємств на довкілля, з урахуванням міжнародного досвіду та сучасних викликів, пов'язаних із війною в Україні.

Метою статті є оцінка екологічних ризиків, спричинених викидами ПрАТ «Укрграфіт», та розробка шляхів їх мінімізації відповідно до принципів сталого розвитку в умовах війни та післявоєнного відновлення. Дослідження спрямоване на визначення рівня забруднення атмосферного повітря, оцінку канцерогенних та неканцерогенних ризиків для здоров'я населення, а також аналіз впливу воєнних дій на ефективність екологічного моніторингу. На основі міжнародного досвіду запропоновано технологічні рішення для зниження викидів, зокрема впровадження регенеративного термічного окислення та сучасних систем очищення газових потоків.

Методика роботи. Для оцінки екологічних ризиків, пов'язаних із викидами ПрАТ «Укрграфіт», та розробки заходів щодо їх мінімізації було використано комплексний підхід, що включає аналіз даних екологічного моніторингу, математичне моделювання розсіювання забруднюючих речовин, оцінку ризиків для здоров'я населення та аналіз ефективності природоохоронних заходів.

На першому етапі проведено аналіз фактичних даних про викиди підприємства на основі офіційних звітів та результатів екологічного моніторингу. Викиди оцінювалися за категоріями основних забруднюючих речовин, серед яких тверді частинки PM10 і PM2.5 та ПАУ.

За відсутності офіційних даних щодо нормування PM10 та PM2.5, відповідно до чинного природоохоронного законодавства додатково було проведено моделювання концентрацій PM10 та PM2.5, виходячи з умов наявних наукових даних щодо коефіцієнтів перерахунку: $PM10 = 0,55 \times \text{концентрація (пилу НДЗС)}$; $PM2.5 = 0,65 \times \text{концентрація (PM10)}$ [5, 6]

Для прогнозування просторового розподілу забруднюючих речовин використано програмний комплекс ISC-AERMOD View (Industrial Source Complex – American Meteorological Society Regulatory Model), який дозволяє оцінити рівень забруднення на різних відстанях від джерела викидів. Вхідні параметри моделювання: 1. Джерела викидів: основні димові труби ПрАТ «Укрграфіт», 2. Метеорологічні умови: середньорічні показники температури, швидкості та напрямку вітру, отримані з локальної метеостанції, 3. географічні особливості: рельєф території підприємства та прилеглих районів.

Територія розміром 5×5 км була визначена як зона впливу викидів стаціонарних джерел ПрАТ «Укрграфіт». Розрахункові вузли було задано у вигляді рецепторної сітки радіального типу, окремих рецепторних точок у радіусі 5000 м від центроїда по відношенню до проммайданчику та 11 контрольних точках на межі СЗЗ та найближчої житлової забудови. Кожний сегмент рівномірно поділено від центроїда підприємства на сектори на відстанях від 500 до 5000 м з кроком 500 м. Кількість розрахункових вузлів радіальної рецепторної сітки – 80.

Оцінку ризику розвитку канцерогенних ефектів проводили з урахуванням середньої добової дози сполуки, що може надходити до організму людини протягом природної тривалості життя (LADD), та фактора її канцерогенного потенціалу (SF). Середня добова доза (або надходження) розраховується за формулою, що враховує концентрацію, яка впливає на людину, тривалість контакту зі сполукою, частоту дії, масу тіла та час осереднення впливу:

$$LADD = C \times CR \times EF \times ED / BW \times AT \times 365 \quad (1)$$

де: LADD – надходження (або середня добова доза), мг/(кг×добу);

C – концентрація сполуки у забрудненому повітряному середовищі, мг/м³;

CR- швидкість надходження повітря до організму, м³/добу (20 м³/добу);

EF – частота впливу, днів на рік;

ED – тривалість впливу, років (для канцерогенів 70 років);

BW – маса тіла людини, кг (70 кг);

AT – період усереднення експозиції, років (для канцерогенів – 70 років);

365 – кількість днів на рік.

Розрахунок індивідуального канцерогенного ризику CR здійснюють за формулою:

$$CR = LADD \times SF \quad (2)$$

де: LADD – середня добова доза сполуки протягом життя, мг/(кг×доба);

SF – фактор канцерогенного потенціалу сполуки, (мг/(кг×доба))⁻¹.

За умови впливу декількох канцерогенів сумарний канцерогенний ризик було розраховано за формулою:

$$ICR_{total} = \sum ICR_i \quad (3)$$

де: ICR_{total} – сумарний канцерогенний ризик;

ICR_i – канцерогенний ризик для *i*-ої канцерогенної речовини.

Оцінку ризику розвитку неканцерогенних ефектів здійснюють шляхом визначення коефіцієнтів небезпеки (HQ) – порівняння фактичного рівня впливу сполук з безпечними (референтними):

$$HQ = C / RfC \quad (4)$$

де: HQ - коефіцієнт небезпеки;

C – рівень впливу речовини, мг/м³ ;

RfC – безпечний рівень впливу (референтна концентрація), мг/м³ .

Для розрахунку та оцінки неканцерогенних ризиків за коефіцієнтами небезпеки (HQ), індивідуальних канцерогенних ризиків для здоров'я експонованого населення, що зазнає впливу від забруднення атмосферного повітря викидами стаціонарних джерел діючого підприємства ПрАТ «Укрграфіт», відповідно до наданих матеріалів було включено до дослідження стаціонарні джерела викидів ПрАТ «Укрграфіт».

Застосована методика оцінки екологічних ризиків від викидів ПрАТ «Укрграфіт» базується на комплексному підході, що поєднує аналіз екологічного моніторингу, математичне моделювання та оцінку впливу на здоров'я населення. Методи оцінки канцерогенних та неканцерогенних ризиків, засновані на розрахунку середньої добової дози (LADD), канцерогенного потенціалу (SF) та коефіцієнтів небезпеки (HQ), дозволяють отримати кількісну характеристику ризиків для здоров'я населення.

Використання програмного комплексу ISC-AERMOD View забезпечило достовірне прогнозування просторового розподілу забруднюючих речовин з урахуванням метеорологічних і географічних факторів. Додаткове моделювання концентрацій PM₁₀ і PM_{2.5} дозволило компенсувати відсутність офіційних нормативів для цих забруднювачів, що підвищує точність розрахунків.

Виклад основного матеріалу. Місто Запоріжжя є обласним центром Запорізької області та розташоване на обох берегах р. Дніпро. У цілому клімат міста класифікують як континентальний з теплим літом та малою кількістю опадів.

Основними підприємствами-забруднювачами атмосферного повітря в Запорізькій області є ПАТ «Запоріжсталь», ПрАТ «Дніпроспецсталь», АТ «Запорізький завод феросплавів», ПрАТ «Український графіт», ПрАТ «Запорізький абразивний комбінат», ПрАТ «Запоріжжюкс», ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат», ПрАТ «Запоріжвогнетрив», ПрАТ «Запорізький завод зварювальних флюсів та скловиробів». Сукупні викиди цих підприємств становлять 95% від загального обсягу викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел у регіоні [7].

ПрАТ «Укрграфіт» – українське підприємство в галузі обробки графіту та виробництва вуглеграфітової електродної продукції, на сьогодні виробляє електроди для електрометалургійних підприємств, графітовані аноди для магнієвої промисловості, а також графітовані блоки для алюмінієвої та металургійної промисловості. Підприємство розташоване у північно-західній частині промислового вузла Вознесенівського району м. Запоріжжя. На території виробничого майданчика розташовані модернізовані цехи випалу та цехи графітації.

Підприємство здійснює значний вплив на навколишнє середовище через викиди забруднюючих речовин у повітря, що є типовим для вуглеграфітового виробництва [7]. Випалювання та графітація сировини,

супроводжуються значними викидами забруднюючих речовин, серед яких обсяг викидів суспендованих частинок 250,76 т/рік.

Викиди цих речовин призводять до значного погіршення якості повітря в зоні впливу підприємства та негативно позначаються на здоров'ї населення. Детальна оцінка впливу викидів на атмосферне повітря здійснювалася за допомогою математичного моделювання розсіювання забруднюючих речовин (ISC-AERMOD View).

Отримані рівні усереднених 1-годинних концентрацій порівнювалися з гранично допустимими концентраціями (ГДК) та референтними нормативами якості повітря, рекомендованими БООЗ. Результати щодо рівнів забруднення атмосферного повітря викидами пилу НДЗС, PM10 та PM2.5 було візуалізовано, картографовано та представлено у мкг/м³ (рис. 1–6).

Моделювання концентрацій PM10 та PM2.5, були виконані з урахуванням коефіцієнтів перерахунку: PM10 = 0,55×концентрація (пилу НДЗС); PM2.5 = 0,65×концентрація (PM10). У процесі аналізу встановлено, що концентрації PM2.5 протягом доби коливаються в межах 2,95–6,72 мкг/м³ (рис. 3), тоді як середньорічне значення для цієї фракції становить 0,31–1,01 мкг/м³ (рис. 4). У порівнянні з рекомендаціями БООЗ концентрації PM2.5 перевищують нормативи в окремі періоди доби, що свідчить про несприятливий вплив на здоров'я населення [3].

За даними ймовірнісних оцінок на підставі даних моделювання на рівні усереднених річних концентрацій PM10 та PM2.5, відповідно до Директиви ЄС 2008/50/ЄС та рекомендацій БООЗ, перевищень у вузлах рецепторної сітки та контрольних точках в усіх напрямках за румбами сторін світу – не виявлено.

Оцінка неканцерогенних ризиків свідчить про перевищення мінімального рівня сумарного неканцерогенного ризику в межах санітарно-захисної зони підприємства [8]. Неканцерогенні ризики, спричинені вдиханням завислих часток, є особливо значущими для вразливих груп населення, зокрема дітей та осіб похилого віку (табл.1).

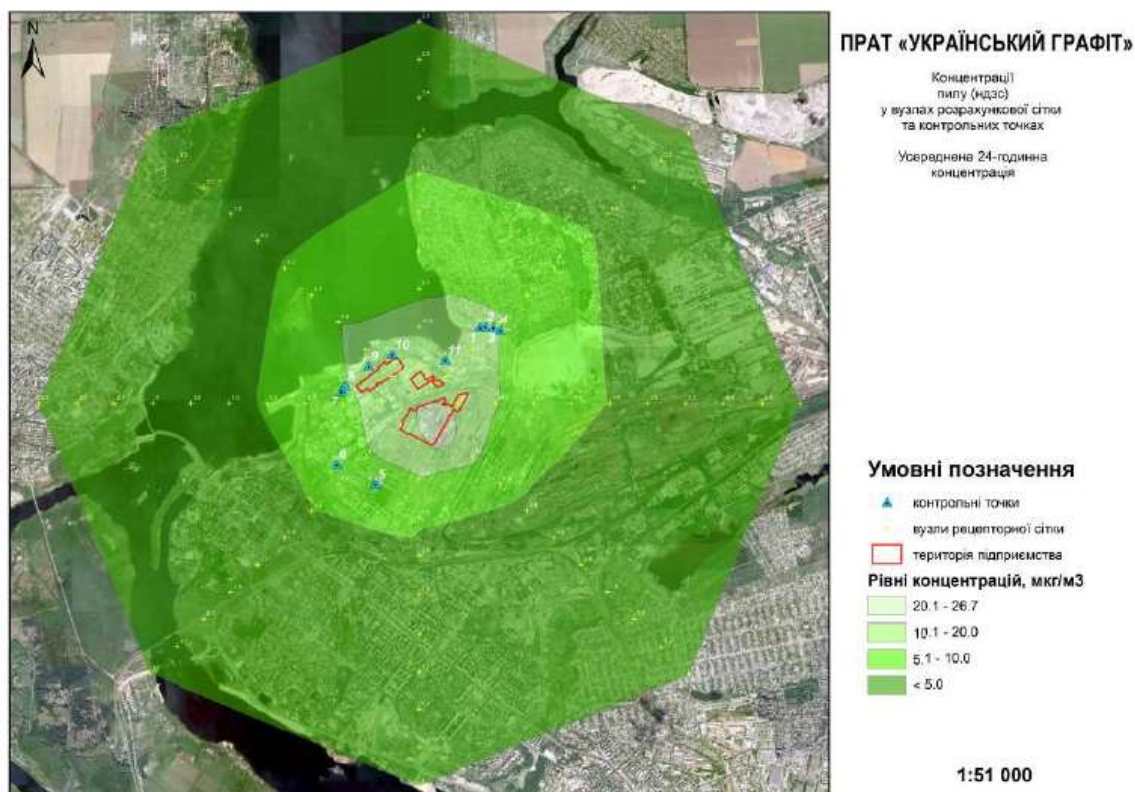


Рис. 1 – Результати розсіювання усереднених 24-годинних концентрацій пилу НДЗС у контрольних точках та вузлах рецепторної сітки

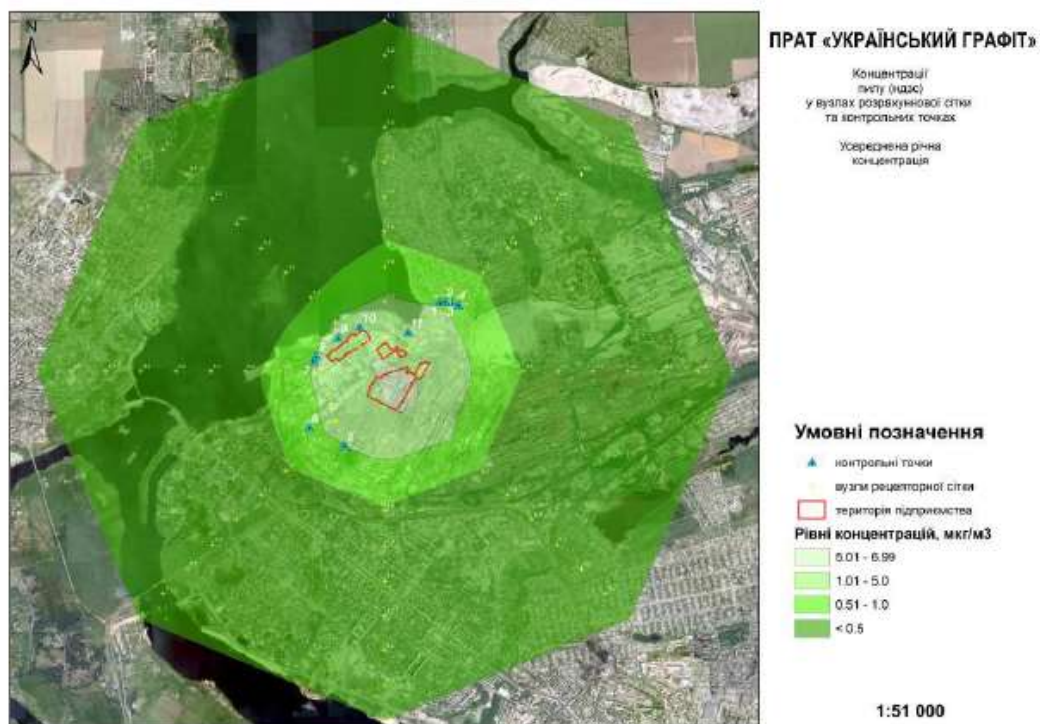


Рис. 2 – Результати розсіювання усереднених річних концентрацій пилу НДЗС у контрольних точках та вузлах рецепторної сітки

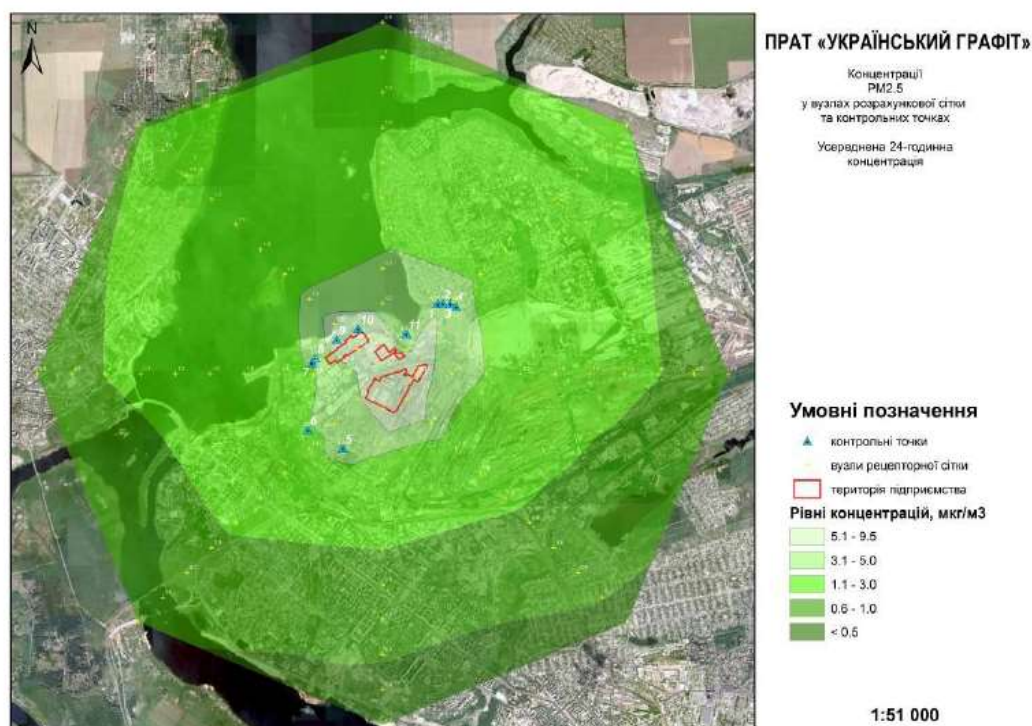


Рис. 3 – Результати розсіювання усереднених 24-годинних концентрацій PM_{2.5} у контрольних точках та вузлах рецепторної сітки

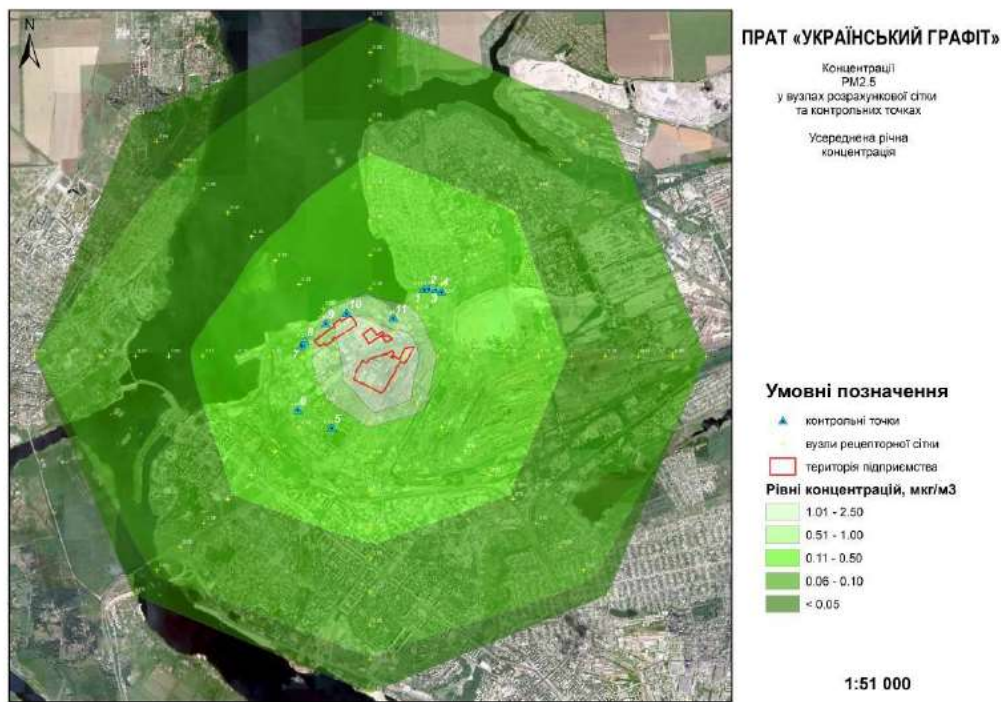


Рис. 4 – Результати розсіювання усереднених річних концентрацій PM_{2.5} у контрольних точках та вузлах рецепторної сітки

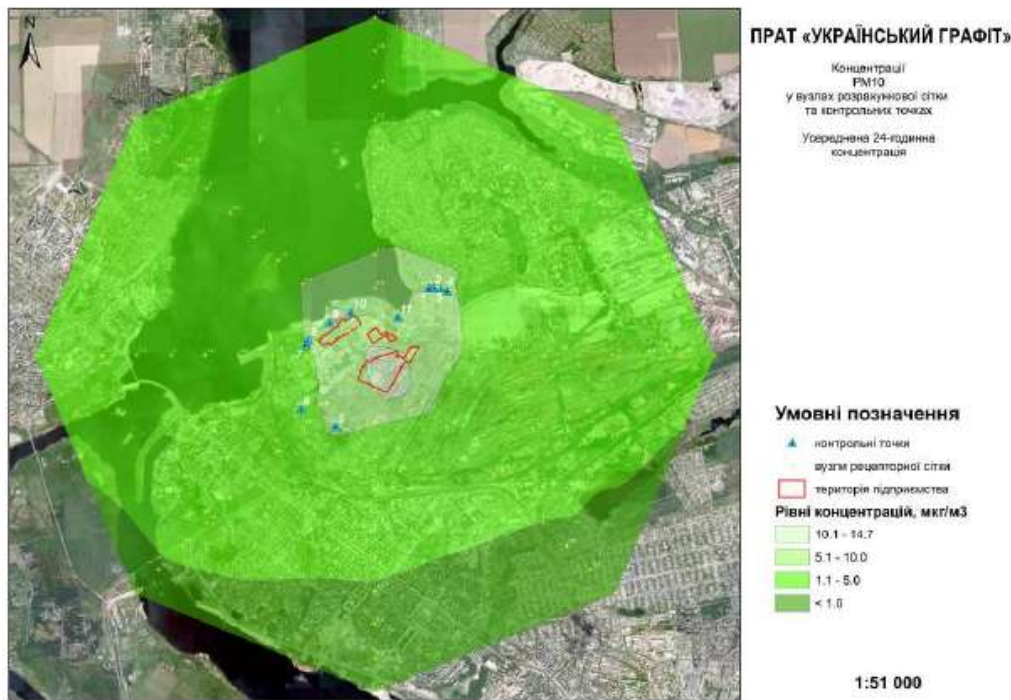


Рис. 5 – Результати розсіювання усереднених 24-годинних концентрацій PM₁₀ у контрольних точках та вузлах рецепторної сітки

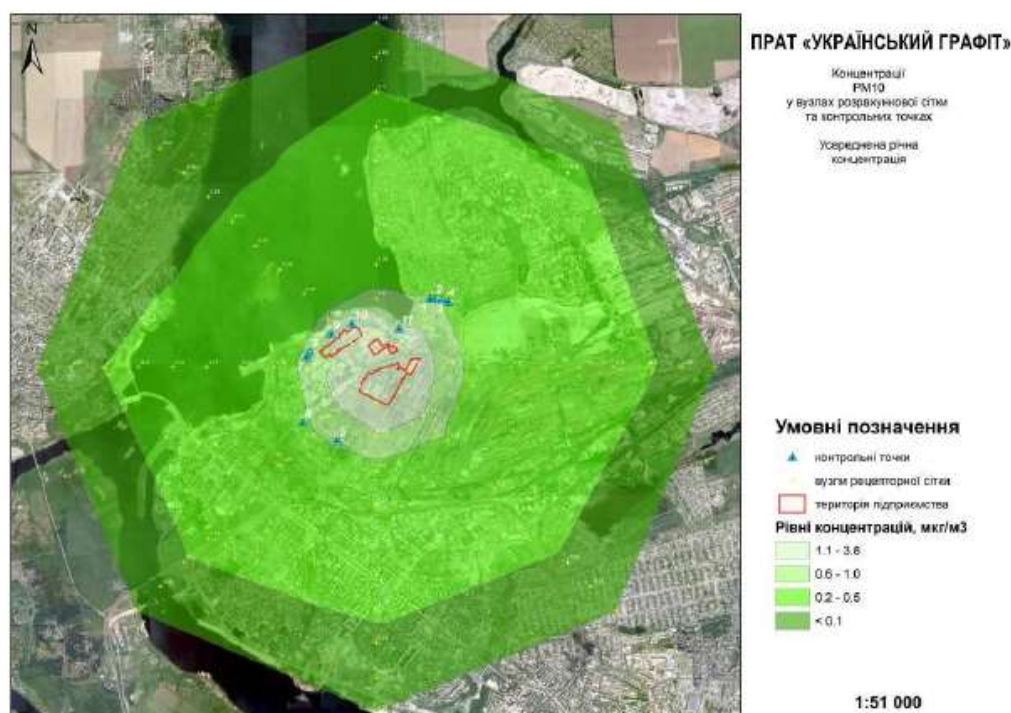


Рис. 6 – Результати розсіювання усереднених річних концентрацій PM10 у контрольних точках та вузлах рецепторної сітки

Таблиця 1 – Рівні сумарного неканцерогенного ризику для здоров'я населення у вузлах рецепторної сітки при гострому у та хронічному інгаляційному впливах хімічних речовин, що викидають стаціонарні джерела ПРАТ «УКРАЇНСЬКИЙ ГРАФІТ»

Вплив	Румб	500 м	1000 м	1500 м	2000 м	2500 м	3000 м	3500 м	4000 м	4500 м	5000 м
Гострий	пн	1.05*	0.70	0.55	0.46	0.41	0.35	0.29	0.25	0.22	0.20
	пн-сх	1.01	0.92	0.69	0.51	0.42	0.36	0.31	0.27	0.26	0.24
	сх	1.02	0.75	0.56	0.42	0.34	0.29	0.26	0.24	0.21	0.19
	пд-сх	1.48	0.95	0.63	0.44	0.33	0.26	0.20	0.18	0.16	0.14
	пд	1.37	0.87	0.53	0.37	0.28	0.22	0.18	0.16	0.13	0.11
	пд-зх	1.33	0.77	0.48	0.35	0.29	0.23	0.19	0.16	0.13	0.12
	зх	0.89	0.67	0.51	0.40	0.33	0.28	0.24	0.22	0.20	0.17
	пн-зх	0.93	0.95	0.57	0.43	0.36	0.31	0.27	0.25	0.25	0.22
Хронічний	пн	0.43	0.18	0.11	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	пн-сх	0.45	0.21	0.13	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	сх	0.60	0.25	0.14	0.10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	пд-сх	0.89	0.33	0.17	0.11	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	пд	0.84	0.30	0.16	0.10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	пд-зх	0.63	0.25	0.14	0.10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	зх	0.37	0.20	0.13	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	пн-зх	0.62	0.16	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

* — - перевищення мінімального рівня ризику (HI>1);

Таким чином, перевищення мінімального рівня сумарного неканцерогенного ризику (НІ) від викидів усіх пріоритезованих забруднюючих речовин у вузлах рецепторної сітки та контрольних точках за умови гострого інгалаційного впливу спостерігаються на відстані 500 м в усіх напрямках за румбами сторін світу, окрім західного та північно-західного напрямків (НІ=1,01÷1,48) дану територію складають промзона та вільні від забудови землі. На рис. 7 візуалізовано розраховані рівні сумарного неканцерогенного ризику при оцінках гострих інгалаційних впливів.

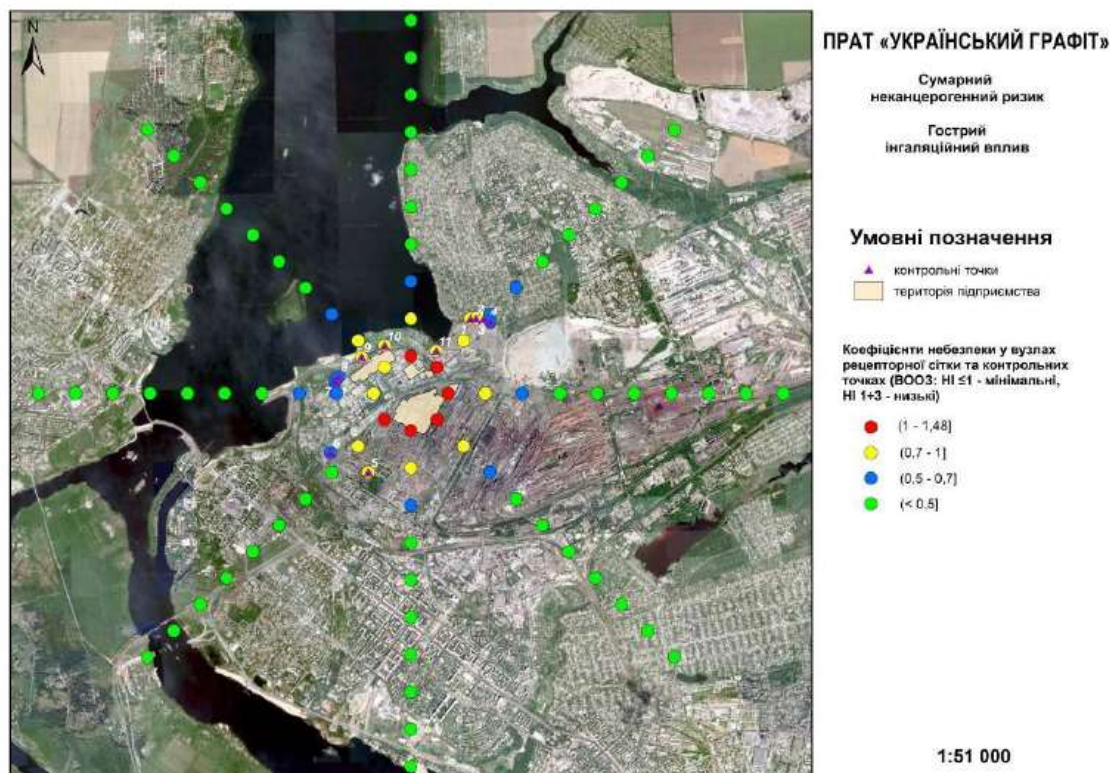


Рис. 7 – Розрахунки рівнів сумарного неканцерогенного ризику (НІ) при оцінках гострих інгалаційних впливів ПРАТ «УКРАЇНСЬКИЙ ГРАФІТ»

Результати розрахунків рівнів неканцерогенного ризику (НҚ) при оцінках хронічних (на рівні усередненої річної концентрації) інгалаційних впливів наведено у таблиці 2 та візуалізовано на рис. 8.

Таблиця 2 – Рівні сумарного неканцерогенного ризику для здоров'я населення у контрольних точках при гострому та хронічному інгалаційному впливах хімічних речовин, що викидають стаціонарні джерела ПРАТ «УКРАЇНСЬКИЙ ГРАФІТ»

Вплив	Сумарний неканцерогенний ризик (НІ)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Гострий	0,71	0,72	0,72	0,67	0,80	0,60	0,61	0,67	0,98	0,96	0,86
Хронічний	0,15	0,15	0,14	0,14	0,21	0,17	0,18	0,18	0,27	0,38	0,30

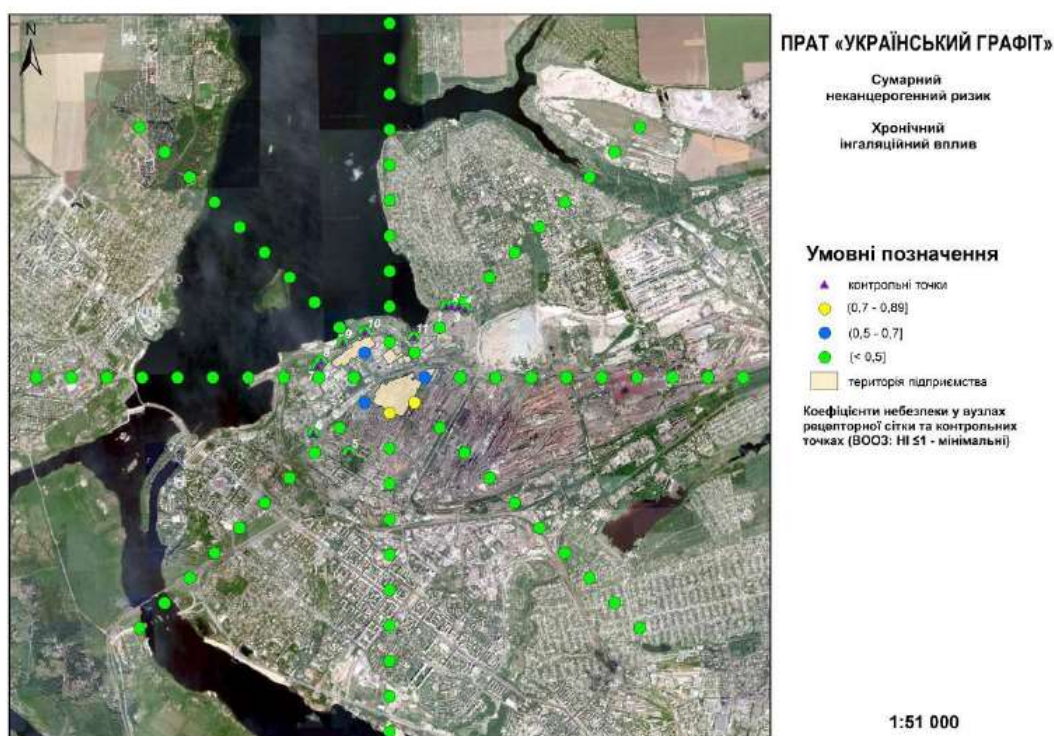


Рис. 8 – Розрахунки рівнів сумарного неканцерогенного ризику (НІ) при оцінках хронічних інгалаційних впливів ПРАТ «УКРАЇНСЬКИЙ ГРАФІТ»

Проведені розрахунки рівнів неканцерогенного ризику при оцінках хронічних інгалаційних впливів свідчать про те, що перевищень мінімального рівня ризику у вузлах рецепторної сітки на території, де проживає населення, та контрольних точках – не визначено [8].

При аналізі рівнів забруднення атмосферного повітря пріоритетованими хімічними канцерогенами (бенз(а)піреном), який входить до складу викидів стаціонарних джерел ПРАТ «УКРАЇНСЬКИЙ ГРАФІТ» було встановлено, що рівні індивідуального канцерогенного ризику (ICR_{total}) протягом всього життя людини коливаються в наступних межах у:

- вузлах рецепторної сітки (у всіх напрямках за румбами від центрoїда по відношенню до проммайданчиків на відстанях від 500 до 5000 м) – $ICR = 4,8 \times 10^{-12} \div 4,4 \times 10^{-10}$
- контрольних точках (на межі найближчої житлової забудови та нормативної СЗЗ) $ICR = 3,1 \times 10^{-11} \div 1,9 \times 10^{-10}$

Отримані показники значно нижчі за встановлену ВООЗ порогову величину 1×10^{-6} , що свідчить про мінімальний канцерогенний ризик для населення [8, 9].

Додатково було проведено дослідження індивідуального ризику смерті (IRM) від впливу твердих частинок PM_{10} . В результаті розрахунків визначено, що IRM для фракції пилу з діаметром часток менше 10 мкм у рецепторних вузлах (у всіх напрямках за румбами від центрoїда по відношенню до проммайданчиків коливаються в межах $IRM = 1,9 \times 10^{-6} \div 4,9 \times 10^{-5}$; у контрольних точках (найближча житлова забудова, СЗЗ) $IRM = 1,5 \times 10^{-5} \div 3,5 \times 10^{-5}$. Такі рівні ризику (протягом життя $1 \times 10^{-6} < ICR_{total} < 1 \times 10^{-4}$), відповідають зоні умовно прийнятного (допустимого) ризику та потребують постійного контролю з боку підприємства та контролюючих органів щодо постійного контролю з боку підприємства та контролюючих органів щодо дотримання потужності викидів та технологічних режимів роботи обладнання підприємства [9].

Мінімізація прорахованих екологічних ризиків на ПрАТ «Укрграфіт» вимагає комплексного підходу, що включає технічні, організаційні та управлінські заходи. Одним із ключових напрямів є модернізація газоочисного обладнання, що передбачає встановлення сучасних електрофільтрів та рукавних фільтрів, здатних ефективно вловлювати тверді частки та шкідливі гази. Зокрема, підприємством впроваджено 13 електрофільтрів та 9 рукавних фільтрів різних типів з ефективністю очистки 97,4–99,9 %. Додатково рекомендовано впровадження систем допалювання викидів, що дозволить знизити концентрацію токсичних сполук у газових потоках. Наприклад, встановлення факельних допалювачів газу забезпечує очистку від сірководню на 100 %, оксиду вуглецю – на 99,3 %, а вуглецевого пилу – на 92 %.

Автоматизація екологічного моніторингу є ще одним важливим кроком, що включає розширення мережі автоматизованих постів контролю за якістю повітря та інтеграцію отриманих даних у загальнодержавну екологічну систему моніторингу. Це дозволить своєчасно виявляти перевищення нормативів та оперативно реагувати на екологічні загрози.

Оптимізація технологічних процесів також відіграє важливу роль у зменшенні негативного впливу на довкілля. Модернізація випалювальних печей, що включає автоматизацію процесів та встановлення регенеративного термічного окиснювача (РТО) замість смоляних електрофільтрів, дозволить скоротити концентрацію смолистих речовин більш ніж на 90 %.

В умовах воєнного стану важливим є вдосконалення нормативно-правової бази, що регламентує екологічну безпеку, та посилення контролю за дотриманням екологічних стандартів підприємствами. Враховуючи міжнародні зобов'язання України, необхідно адаптувати природоохоронне законодавство до нових викликів, зокрема забезпечити екологічну безпеку в зоні активних бойових дій через оперативний моніторинг якості повітря, води та контроль за можливим пошкодженням екологічно небезпечних об'єктів. Одночасно слід підсилити відповідальність за екологічні злочини, включаючи порушення природоохоронного законодавства під час війни.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження у сфері мінімізації екологічного впливу промислових підприємств, зокрема ПрАТ «Укрграфіт», мають охоплювати широкий спектр наукових і прикладних аспектів. Одним із ключових напрямів є вдосконалення методів екологічного моніторингу, включаючи розробку автоматизованих систем контролю викидів у режимі реального часу та застосування дистанційного зондування атмосфери для оцінки просторового розподілу забруднюючих речовин. Також, значну увагу слід приділити оцінці довгострокового впливу промислового забруднення на здоров'я населення. Важливим є моделювання сценаріїв поширення забруднюючих речовин залежно від змін у технологічному процесі, метеорологічних умов та впровадження природоохоронних заходів. Такі дослідження дозволять розробити оптимальні стратегії управління викидами та прогнозувати екологічні наслідки ще на етапі планування виробничих змін.

В цьому контексті, окремої уваги заслуговує аналіз економічної ефективності впровадження екологічних інновацій. Дослідження в цьому напрямі мають бути спрямовані на оцінку витрат і вигод від модернізації виробництва, впровадження циркулярної економіки та переходу до екологічно безпечних технологій.

Список використаної літератури

1. U.S. Environmental Protection Agency. The impact of PM_{2.5} pollution on respiratory diseases. URL: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm> (дата звернення: 16 липня 2024).
2. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата звернення: 24 жовтня 2024).
3. Coal and biomass combustion emissions increase the cancer and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} from Nanchang, central China // ScienceDirect. 2024. Vol. 15, Issue 7. P. 102149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102149>

4. Sources and health risks of ambient polycyclic aromatic hydrocarbons in China // ScienceDirect. 2020. Vol. 698. P. 134229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134229>
5. Турос О.І., Маремуха Т.П., Петросян А.А., Брезіцька Н.В. Дослідження забруднення атмосферного повітря зваженими частинками пилу (PM10 та PM2,5) у м. Києві // Довкілля та здоров'я. 2018. №4(89). С. 36-39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gnm_2017_67_9
6. Маремуха Т.П. Гігієнічна оцінка забруднення атмосферного повітря теплоенергетичними об'єктами: дис. канд. мед. наук / державна установа "Інститут громадського здоров'я ім. О. І. Марзєєва НАМНУ". Київ 2021. с 65: URL: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/thesis_files_text_maremukha_t_p.pdf
7. Звіт про стратегічну екологічну оцінку Плану заходів з реалізації Стратегії розвитку міста Запоріжжя до 2028 року на період 2021–2024 роки. – Запоріжжя, 2020. URL: https://zp.gov.ua/upload/content/o_1epqkgtbmbmba8nb7q1v9f6hmip.pdf
8. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря: методичні рекомендації / МОЗ України: наказ № 89 від 17.01.2022. – К., 2022. – 8 с. URL: <https://moz.gov.ua/uk/decrees/nakaz-moz-ukraini-vid-17012022--89-pro-zatverdzhennja-metodichnih--rekomendacij-ocinka-riziku-dlja--zdorovja-naselennja-vid-zabrudnennja-atmosfernogo-povitria>
9. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Kameneva I., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T. Risk Assessment for the Population of Kyiv, Ukraine as a Result of Atmospheric Air Pollution // J Health Pollut. – 2020. – Vol. 10, No. 25. – Article 200303. DOI: <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.25.20030>

Andrii Vahin, Olena Ivanenko, Yevgen Panov, Serhii Ivaniuta, Artem Martyniuk

STRATEGY FOR MINIMIZING ENVIRONMENTAL RISKS FROM PRJSC "UKRGRAPHIT" IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

The study is aimed at analyzing the level of atmospheric pollution by the enterprise PrJSC "Ukrgrafit", determining carcinogenic and non-carcinogenic risks to public health, as well as developing recommendations for minimizing harmful effects in the context of sustainable development and post-war restoration of the industrial sector. The object of the study is the impact of pollutant emissions of PrJSC "Ukrgrafit" on the environment in the city of Zaporizhzhia. Mathematical modeling of emission dispersion was performed using the ISC-AERMOD View software environment. The assessment of risks to public health was carried out in accordance with the methodology of Human Health Risk Assessment. To determine the optimal ways to minimize pollution, a comparative analysis of international experience in implementing environmental technologies in the carbon graphite industry was carried out. The results of the study showed that one of the most significant pollutants in the emissions of PrJSC "Ukrgrafit" is undifferentiated dust, in particular, suspended particles PM10 and PM2.5. The total volume of particulate emissions is 250.76 t/year. When modeling the inhalation exposure of priority pollutants in 80 receptor nodes and 11 control points, no exceedances of permissible concentration levels were recorded. Exceedance of the minimum level of total non-carcinogenic risk from emissions of all prioritized pollutants at receptor network nodes and control points under the condition of acute inhalation exposure is observed at a distance of 500 m in all directions along the cardinal points, except for the west and north-west directions. Hazard coefficients (HQ) for individual substances did not exceed the level of $HQ \leq 1$, which indicates a minimal risk to public health. The carcinogenic risk due to the presence of benzo(a)pyrene is estimated at the level of $ICR_{total} < 1 \times 10^{-6}$, which corresponds to the minimal risk according to the classification of the World Health Organization. The levels of individual risk of death (IRM) from exposure to PM10 particulate matter at receptor nodes and control points correspond to a conditionally acceptable risk that requires constant monitoring. Analysis of pollutant concentrations in the surface layer of the atmosphere did not reveal significant excesses of permissible standards, but showed a potential impact on the health of the population living in the area of influence of

the enterprise. This emphasizes the need to increase the efficiency of environmental control and improve the enterprise's gas purification systems to ensure sustainable development and reduce the man-made load on the environment. To minimize the negative impact of the enterprise, a set of measures has been proposed, which include the modernization of gas purification systems, strengthening environmental monitoring and adaptation to international environmental standards. The introduction of regenerative thermal oxidation (RTO) will reduce the concentration of organic compounds in emissions by 90%. Additional installation of bag filters will help reduce the level of PM₁₀ and PM_{2.5} particulate matter by 99%. To ensure transparency of environmental monitoring, it is necessary to expand the network of automated air quality control stations, which will allow real-time data on the level of pollution and prompt action to be taken. The proposed measures will significantly reduce the level of pollution and adapt the enterprise to international environmental standards, contributing to the sustainable development of the industrial sector of Ukraine.

Keywords: environmental risks, sustainable development, gas purification technologies, gas purification systems, environmental monitoring

References

1. U.S. Environmental Protection Agency. The impact of PM_{2.5} pollution on respiratory diseases. URL: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm> (accessed: 16 July 2024).
2. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accessed: 24 October 2024).
3. Coal and biomass combustion emissions increase the cancer and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} from Nanchang, central China // ScienceDirect. 2024. Vol. 15, Issue 7. P. 102149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102149>
4. Sources and health risks of ambient polycyclic aromatic hydrocarbons in China // ScienceDirect. 2020. Vol. 698. P. 134229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134229>
5. Turos O.I., Maremukha T.P., Petrosyan A.A., Brezitska N.V. Study of atmospheric air pollution by suspended dust particles (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Kyiv // Environment and Health. 2018. №4(89). P. 36-39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gnm_2017_67_9
6. Maremukha T.P. Hygienic assessment of air pollution resulting from operation of thermal power plants: PhD Thesis / State Institution "O.I. Marzeev Institute of Public Health of NAMSU". Kyiv, 2021. p 65: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/thesis_files_text_maremukha_t_p.pdf
7. Report on the Strategic Environmental Assessment of the Action Plan for the Implementation of the Zaporizhzhia City Development Strategy until 2028 for the period of 2021-2024 - Zaporizhzhia, 2020. URL: https://zp.gov.ua/upload/content/o_1epqkgbtmbmba8nb7q1v9f6hmip.pdf
8. Assessment of the risk to public health from air pollution: methodological recommendations / Ministry of Health of Ukraine: Order No. 89 of 17.01.2022. - Kyiv, 2022. - 8 p URL: <https://moz.gov.ua/uk/decrees/nakaz-moz-ukraini-vid-17012022--89-pro-zatverdzhennja-metodichnih--rekomendacij-ocinka-riziku-dlja--zdorovja-naselennja-vid-zabrudnennja-atmosfernogo-povitnja>
9. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Kameneva I., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T. Risk Assessment for the Population of Kyiv, Ukraine as a Result of Atmospheric Air Pollution // J Health Pollut. – 2020. – Vol. 10, No. 25. – Article 200303. DOI: <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.25.20030>