

УДК 504.3.054:351.777

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-13>

СУЧАСНА СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ ЕМІСІЄЮ ТВЕРДИХ МІКРОЧАСТИНОК: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА НОРМАТИВНОЇ БАЗИ

Вадим Гончарук¹, Василь Петрук²¹ПП «Інтер-Еко», вул. Київська, 16, м. Вінниця, 21009, Україна²Вінницький національний технічний університет,

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна

АНОТАЦІЯ

Забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсними частинками (PM₁₀, PM_{2.5}) визнано ВООЗ пріоритетним фактором екологічного ризику, що зумовило глобальну трансформацію управлінських стратегій. У статті розкрито сутність еволюції світових стандартів: від контролю загального пилу до цілеспрямованого управління саме дрібними, найбільш небезпечними фракціями. Проаналізовано природу утворення мікрочастинок, зокрема специфіку формування вторинних аерозолів в урбанізованому середовищі, що вимагає впровадження новітніх природоохоронних технологій та комплексного контролю газів-прекурсорів. Особливу увагу приділено тому, як розвинені країни, керуючись європейською Директивою 2008/50/ЄС, переходять від жорстких короткострокових нормативів до дворівневої системи нормування та довгострокових референтних оцінок експозиції. Це дозволяє реагувати на хронічні ризики для здоров'я людей, а не просто фіксувати разові перевищення. На основі глибокого аналізу нормативно-правового поля України у роботі виявлено ключові колізії вітчизняної системи екологічного менеджменту. Доведено, що спроби

імплементції європейських Планів поліпшення якості повітря блокуються застарілою метричною базою — орієнтацією на гранично допустимі концентрації (ГДК) недиференційованого загального пилу та гострим дефіцитом затверджених на державному рівні методик виконання вимірювань безпосередньо для дрібнодисперсних фракцій. Такий розрив унеможливорює створення достовірних кадастрів емісії та застосування сучасного математичного моделювання розсіювання забруднювачів. Обґрунтовано критичну необхідність комплексної адаптації національної дозвільної системи до європейських стандартів. Гармонізація цих підходів та стимулювання впровадження сучасних технологій захисту навколишнього середовища дозволить не лише усунути методичні розбіжності, а й перейти до більш ефективного управління якістю повітря задля реального зниження шкідливих викидів у містах, що є базовою умовою забезпечення екологічної безпеки держави.

Ключові слова: технології захисту навколишнього середовища, екологічна безпека, управління якістю повітря, тверді мікрочастинки (PM₁₀, PM_{2.5}), екологічне нормування, загальний пил, гранично допустимі концентрації (ГДК), оцінка експозиції, плани поліпшення якості повітря.

MODERN STRATEGY FOR SOLID PARTICULATE MATTER EMISSION MANAGEMENT: AN ANALYTICAL REVIEW OF METHODS AND REGULATORY FRAMEWORKS

ABSTRACT

Air pollution by fine particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) has been recognized by the WHO as

a priority environmental risk factor, prompting a global transformation in air quality management strategies. The article reveals the essence of the

evolution of global standards: from controlling "total suspended particles" to specifically managing the finer, most hazardous fractions. The study analyzes the nature of microparticle formation, particularly the specifics of secondary aerosol formation in urban environments, which requires the implementation of the latest environmental protection technologies and comprehensive control of precursor gases. Special attention is given to how developed countries, guided by European Directive 2008/50/EC, are transitioning from rigid short-term limit values to a two-level regulatory system and long-term reference assessments of exposure. This enables proactive responses to chronic human health risks rather than merely recording singular regulatory exceedances. Based on an in-depth analysis of Ukraine's regulatory framework, the paper identifies key contradictions in the national environmental management system. It is proven that attempts to implement European Air Quality Improvement Plans are hindered by an outdated metric base—specifically, the reliance on Maximum Permissible Concentrations (MPC) of undifferentiated total dust and an acute shortage of state-approved measurement techniques specifically for fine fractions. This gap precludes the creation of reliable emission inventories and the application of modern mathematical dispersion modeling of pollutants. The study substantiates the critical need for a comprehensive adaptation of the national permitting system to European standards. Harmonizing these approaches and stimulating the implementation of modern environmental protection technologies will not only eliminate methodological discrepancies but also facilitate a transition toward more effective air quality management, ultimately leading to a tangible reduction of harmful emissions in urban areas, which is a fundamental condition for ensuring the ecological safety of the state.

Keywords: environmental protection technologies, ecological safety, air quality management, particulate matter (PM10, PM2.5), environmental regulation, total suspended particles (TSP), maximum permissible concentrations (MPC), exposure assessment, air quality improvement plans.

1. ВСТУП

Якість атмосферного повітря сьогодні є одним із головних індикаторів екологічної безпеки урбанізованих територій. За даними

Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), забруднене повітря щороку стає причиною мільйонів передчасних смертей, причому ледь частка цих випадків пов'язана саме з впливом дрібнодисперсних твердих частинок (Particulate Matter — PM).

Довгий час у світовій практиці, і в Україні зокрема, основним критерієм забруднення вважався так званий «загальний пил» (Total Suspended Particles — TSP). Цей підхід передбачав контроль валової маси всіх твердих домішок, що знаходяться у повітрі, без розрізнення їхнього розміру чи хімічного складу. Проте сучасна наука довела, що такий метод є недостатньо інформативним, а іноді й помилковим з точки зору оцінки реальної загрози.

Ключова небезпека полягає не стільки в кількості пилу, скільки в його дисперсності. Частинки з аеродинамічним діаметром менше 10 мкм (PM10) здатні проникати глибоко в легені, а фракція PM2.5 (менше 2,5 мкм) потрапляє безпосередньо в кровоносну систему, викликаючи серцево-судинні та респіраторні захворювання. Саме тому «великий» пил, який затримується верхніми дихальними шляхами, становить значно меншу загрозу, ніж невидимі оком аерозолі.

Це розуміння призвело до зміни управлінської парадигми в усьому світі. Розвинені країни відмовилися від боротьби з пилом «взагалі» і перейшли до цілеспрямованого управління емісією конкретних дрібнодисперсних фракцій. Для України, яка знаходиться на етапі імплементації європейських екологічних директив, перехід на ці нові рейки є не просто вимогою законодавства, а питанням національної безпеки в сфері громадського здоров'я.

2. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Проблема забруднення атмосферного повітря мікрочастинками (PM10, PM2.5) є предметом інтенсивних досліджень провідних міжнародних інституцій, зокрема Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), Європейського агентства з довкілля (ЕЕА) та Агентства з охорони довкілля США (USEPA) [1, 2]. Аналіз сучасного світового наукового дискурсу свідчить про остаточну зміну дослідницької парадигми: від простої оцінки валових викидів до глибокого вивчення дисперсного складу аерозолів та їхнього впливу на здоров'я населення.

3. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Фундаментальну роль у цій трансформації відіграли дослідження впливу дрібнодисперсних фракцій на рівень захворюваності та смертності. Зокрема, класичні праці С. А. Pope та D. W. Dockery [3] науково обґрунтували прямий епідеміологічний зв'язок між забрудненням дрібними частинками та кардіоваскулярними ризиками. Спираючись на подібні дослідження, низка європейських та американських вчених у своїх роботах [4, 5] переконливо довела неефективність традиційного контролю «недиференційованого пилу» (TSP) та необхідність переходу до управління на основі довгострокової експозиції.

В українському науковому просторі проблема якості повітря висвітлюється достатньо широко. Вітчизняні науковці активно досліджують санітарно-гігієнічні аспекти та безпосередній вплив забруднення повітря на розвиток серцево-судинних захворювань, зокрема артеріальної гіпертензії [6]. Окрім того, з'являються сучасні емпіричні дослідження, присвячені безпосередньому інструментальному моніторингу та аналізу динаміки забруднення саме мікрочастинками PM_{2.5} в українських містах [7].

Проте більшість вітчизняних досліджень у сфері екологічного управління традиційно зосереджені на констатації перевищень гранично допустимих концентрацій (ГДК) загального пилу. При цьому питанням розробки сучасних управлінських стратегій щодо зниження емісії саме дрібнодисперсних фракцій приділяється недостатньо уваги. Відчувається брак комплексних досліджень щодо проблематики гармонізації національної нормативної бази з європейськими стандартами, зокрема з механізмами імплементації Директиви 2008/50/ЄС на рівні муніципального управління. [8] [9] [10].

Наявність зазначених нормативних та методологічних прогалин зумовлює актуальність цього дослідження.

Метою статті є комплексний аналіз наукових та нормативно-правових засад сучасного управління якістю повітря в частині РМ-забруднення, а також виявлення ключових суперечностей у вітчизняній системі екологічного менеджменту для обґрунтування шляхів її адаптації до європейських стандартів.

3.1. Природа утворення та фізико-хімічні властивості мікрочастинок

Для формування ефективної стратегії управління якістю повітря критично важливо розуміти природу об'єкта управління. На відміну від більшості класичних забруднювачів (наприклад, чадного газу чи діоксиду сірки), тверді мікрочастинки (РМ) не є окремою хімічною речовиною. Це складна гетерогенна суміш твердих і рідких частинок органічного та неорганічного походження, що знаходяться у зваженому стані в атмосфері.

З управлінської точки зору принциповим є поділ аерозолів за генезисом на первинні та вторинні. **Первинні частинки** емітуються в атмосферу безпосередньо з джерел (сажа від згоряння палива, мінеральний пил від будівництва, знос автомобільних шин та гальмівних колодок). Натомість **вторинні частинки** утворюються безпосередньо в атмосфері внаслідок складних фотохімічних реакцій між газами-прекурсорами, насамперед діоксидом сірки (SO₂), оксидами азоту (NO_x), аміаком (NH₃) та леткими органічними сполуками (VOCs). Урбанізовані території характеризуються високою часткою саме вторинних аерозолів, що робить традиційні методи пилоочищення на джерелах викидів недостатніми: управління забрудненням РМ_{2.5} вимагає одночасного контролю емісії газоподібних прекурсорів.

Джерела емісії мікрочастинок також мають суттєві відмінності порівняно із «загальним пилом» (TSP). Якщо валові викиди великого пилу традиційно асоціюються з промисловими гігантами (металургія, теплоенергетика, гірничозбагачувальні комбінати), то ключовим джерелом дрібнодисперсних фракцій у містах є неорганізовані та муніципальні джерела: вихлопні та невихлопні викиди автотранспорту, а також індивідуальне опалення у приватному секторі.

Саме дисперсність та фізико-хімічні властивості визначають рівень небезпеки РМ для здоров'я, що робить їх пріоритетним об'єктом нормування. Частинки фракції РМ₁₀ (аеродинамічний діаметр менше 10 мкм) осідають переважно у верхніх дихальних шляхах. Натомість фракція РМ_{2.5} (менше 2,5 мкм) здатна

долати альвеолярно-капілярний бар'єр і потрапляти безпосередньо в кровоносну систему. Крім механічного пошкодження тканин, експоненційне зростання питомої площі поверхні при зменшенні розміру частинок робить PM2.5 ідеальним сорбентом для високотоксичних сполук — важких металів та поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ). Це пояснює парадокс, встановлений сучасними дослідженнями: навіть при суттєвому зниженні валової маси викидів загального пилу (TSP), рівень захворюваності населення може не зменшуватися, якщо концентрація найнебезпечнішої фракції PM2.5 залишається високою.

3.2. Еволюція світових підходів: від ГДК загального пилу до дворівневого нормування мікрочастинок

Ще декілька десятиліть тому екологічні нормативи більшості країн світу фокусувалися на контролі валових викидів. Логіка була простою: чим менше пилу вилітає з труби, тим краще. Однак, наукові дослідження кінця ХХ століття довели, що цей підхід є хибним. З'ясувалося, що зниження маси викидів загального пилу (TSP) часто не призводило до покращення здоров'я населення. Причина крилася у тому, що системи очистки ефективно вловлювали великі важкі частинки, але пропускали дрібні фракції, які є найбільш токсичними.

Це стало поштовхом до першого глобального зрушення у стандартах — зміни об'єкта нормування. Провідну роль тут відіграла Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ), яка переглянула свої рекомендації, чітко виокремивши нормативи для PM10 та PM2.5. Сьогодні саме ці фракції, а не загальний пил, є базовими індикаторами екологічної безпеки у всіх розвинених країнах.

Другим фундаментальним зрушенням у світовій практиці стала зміна підходів до самого нормування якості повітря. Традиційна система, орієнтована переважно на жорсткі гранично допустимі концентрації (ГДК) короткочасної дії (максимальні разові концентрації), виявилася недостатньою для захисту населення від РМ-забруднення. Оскільки мікрочастинок мають здатність накопичуватися в організмі, критично важливим фактором безпеки є не лише разовий сплеск концентрації пилу в повітрі, а й

тривалість постійного фонового впливу (експозиція).

Саме тому сучасні європейські стратегії, зокрема Директива 2008/50/ЄС, запровадили дворівневу архітектуру нормування, яка поєднує контроль за короткочасними та довгостроковими показниками. З одного боку, встановлюються середньодобові граничні величини для запобігання гострим впливам на здоров'я під час локальних пікових забруднень. З іншого — ключову роль відіграють середньорічні ліміти та спеціальні цільові показники зменшення експозиції населення, що дозволяють контролювати хронічний вплив мікрочастинок. Такий комплексний підхід змушує не просто констатувати разові перевищення, а розробляти довгострокові Плани поліпшення якості повітря (Air Quality Plans), спрямовані на системне зниження загального фонового забруднення.

3.3. Українські реалії: нормативні колізії та проблеми імплементації європейських стандартів

Вітчизняна система управління якістю атмосферного повітря нині перебуває у стані глибокої і складної трансформації. Історично в Україні сформувалася модель, орієнтована переважно на санітарно-гігієнічний контроль. Базовим інструментом цієї системи тривалий час залишалися гранично допустимі концентрації (ГДК), зокрема максимальні разові, які фіксують короткочасні пікові забруднення. При цьому головним об'єктом контролю твердих домішок у дозвільній системі досі виступає показник «речовини у вигляді суспендованих твердих частинок» (недиференційований пил, аналог TSP), що суперечить сучасним світовим підходам щодо пріоритетності управління фракціями PM10 та PM2.5.

Масштаб нормативної прогалини посилюється відсутністю цілісного метрологічного та методологічного забезпечення. Незважаючи на спроби імплементації європейських норм, в Україні досі спостерігається гострий дефіцит затверджених на державному рівні сучасних методик виконання вимірювань (МВВ) саме для дрібнодисперсних фракцій. Це стосується як інструментального контролю викидів безпосередньо на стаціонарних джерелах (для проведення інвентаризації), так і розширення мережі референтного моніторингу фонового забруднення. Крім того, нові санітарні

гігієнічні регламенти для PM10 та PM2.5, хоч і задекларовані на рівні охорони здоров'я, досі повноцінно не інтегровані в екологічну дозвільну систему: при встановленні нормативів гранично допустимих викидів (ГДВ) для підприємств продовжують оперувати загальним пилом.

У рамках євроінтеграційних зобов'язань Україна здійснила важливий крок, прийнявши у 2019 році Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря (Постанова КМУ № 827). Цей документ формально запровадив обов'язок для органів місцевого самоврядування та місцевих органів виконавчої влади розробляти Плани поліпшення якості повітря у разі перевищення граничних величин мікрочастинок у відповідних зонах та агломераціях.

Однак на практиці виник управлінський парадокс: спроба накласти сучасні європейські інструменти на застарілу вітчизняну метричну базу. Органи влади на місцях зобов'язані розробляти заходи зі зниження концентрацій PM10 та PM2.5, проте вони позбавлені достовірних вихідних даних. Через відсутність затверджених методик виконання вимірювань (МВВ) та відповідних нормативів емісії (ГДВ) для дрібнодисперсних фракцій, підприємства продовжують звітувати про викиди недиференційованого пилу.

Цей розрив унеможлиблює створення точних емісійних кадастрів. Без них неможливо застосувати сучасні інструменти математичного моделювання розсіювання, а отже — достовірно визначити частку впливу кожного окремого емітента (транспорту, конкретного промислового об'єкта чи приватного сектору) у формуванні небезпечної експозиції PM2.5. Таким чином, декларовані європейські цілі блокуються відсутністю базового інструментарію на нижньому рівні екологічного нормування.

ВИСНОВКИ

Світова практика екологічного менеджменту демонструє остаточну зміну парадигми управління якістю атмосферного повітря: перехід від контролю валових викидів недиференційованого пилу (TSP) до цілеспрямованого управління емісією дрібнодисперсних фракцій (PM10 та PM2.5). Ця трансформація супроводжується фундаментальною зміною архітектури

нормування. Замість традиційної фіксації короткочасних пікових концентрацій (разових ГДК), розвинені країни впроваджують механізми управління довгостроковою експозицією та оцінки комплексних ризиків для здоров'я населення.

Аналіз вітчизняної нормативно-правової бази засвідчив наявність глибокого системного парадоксу. Україна перебуває на етапі декларованої імплементації європейських механізмів, зокрема впровадження Планів поліпшення якості повітря для зон та агломерацій. Проте ефективність цих сучасних управлінських інструментів повністю нівелюється застарілим нормативним базисом. Чинна дозвільна система, нормативи гранично допустимих викидів (ГДВ) та відсутність затверджених на державному рівні методик виконання вимірювань (МВВ) для PM-фракцій змушують підприємства продовжувати звітувати за показником «загального пилу».

Такий розрив унеможлиблює створення достовірних кадастрів емісії мікрочастинок, що є критично необхідним для ідентифікації реальних джерел забруднення в містах. Для подолання цієї колізії Україні необхідна не фрагментарна, а комплексна синхронізація екологічного законодавства на всіх рівнях: від труби підприємства до муніципального управління фоновими концентраціями.

Пріоритетним напрямком для подальших наукових досліджень у цій сфері є розробка сучасних природоохоронних технологій, адаптованих методологічних підходів до інструментального моніторингу емісії мікрочастинок та впровадження сучасних систем математичного моделювання їх просторового розсіювання в умовах українських міст.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization.
2. European Environment Agency. (2023). *Air quality in Europe 2023*. EEA Report No 10/2023. Publications Office of the European Union.
3. Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air

pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742.

4. Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242.

5. Dominici, F., Greenstone, M., & Sunstein, C. R. (2014). Particulate matter matters. *Science*, 344(6181), 257-259.

6. Волкова Ю. В. Дрібнодисперсний пил як фактор ризику для здоров'я населення м. Запоріжжя. *Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини : матеріали наук.-практ. конф. (15 берез. 2023 р.)*. 2023. URL: <http://ir.librarynmu.com/handle/123456789/7089>

7. Гринчишин Н. М. Якість атмосферного повітря за вмістом твердих мікрочастинок (PM 2,5) у містах України в умовах карантину та воєнного стану. *Вісник ЛДУБЖД*. 2023. № 27. С. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.01>

8. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря : постанова Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 № 827. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text>

9. Про затвердження Порядку розроблення та затвердження планів поліпшення якості атмосферного повітря : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 01.08.2022 № 268. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1071-22#n15>

Про затвердження Порядку розроблення та затвердження короткострокових планів дій : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 01.08.2022 № 267. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1086-22#n15>