

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОЗРОБОК У ПОШУКУ ДОСТУПНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ

Стасевич С.П., Махняк А.Я.

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери 12, м. Львів, 79013

serhiy.p.stasevych@lpnu.ua, andrii.y.makhniak@lpnu.ua

У статті представлено комплексний порівняльний аналіз новітніх технологій виготовлення фільтрувальних матеріалів для очищення повітря від дрібнодисперсних частинок (PM_{2.5}) та токсичних газів. Доведено, що традиційні методи фільтрації (HEPA, целюлозні фільтри, циклони) не забезпечують комплексного вирішення проблеми в умовах агресивних промислових середовищ через швидке засмічення, високий аеродинамічний опір та термічну нестабільність. Досліджено ефективність застосування нановолокнистих мембран, отриманих методом електроформування, які завдяки надзвичайно високій пористості забезпечують ефективне захоплення забруднювачів при мінімальному перепаді тиску. Особливу увагу приділено інтеграції металоорганічних каркасів (MOF) у біорозкладні полімерні матриці, що дозволяє перетворити пасивну бар'єрну фільтрацію на активний процес із каталітичною нейтралізацією токсичних газів та вирішує проблему екологічної утилізації. Для ділянок із критично високими температурами обґрунтовано використання ієрархічних керамічних аерогелів, здатних зберігати експлуатаційні характеристики та ефективність понад 99,95% при нагріванні до 1000 °C. Проаналізовано перспективи адитивних технологій (3D-друк) у створенні детермінованих мікроканалних ґратчастих і каталітичних монолітних структур для зменшення опору та ефективного окиснення летких органічних сполук (ЛОС). Вперше дані інноваційні матеріалознавчі рішення розглядаються в синергії з фізичними методами попереднього очищення, зокрема акустичною агломерацією для укрупнення субмікронних частинок, та архітектурою Інтернету речей (IoT). Запропоновано використання багатомодельного адаптивного фільтра Калмана для динамічного прогнозування концентрації забруднень, нівелювання промислових шумів і автоматизованого управління витяжними потужностями. Результати дослідження формують науково-технологічні передумови для переходу від статичних бар'єрів до створення гібридних інтелектуальних систем екологічного менеджменту на техногенних підприємствах. *Ключові слова:* очищення повітря, дрібнодисперсні частинки PM_{2.5}, фільтрувальні матеріали, електроформування, нановолокнисті мембрани, металоорганічні каркаси (MOF), керамічні аерогелі, адитивні технології, 3D-друк, акустична агломерація, Інтернет речей (IoT), фільтр Калмана.

Comparative analysis of research and development in search of available technologies for manufacturing filtering materials for air purification. Stasevych S., Makhniak A.

The article presents a comprehensive comparative analysis of advanced technologies for manufacturing air filtration materials designed to remove fine particulate matter (PM_{2.5}) and toxic gases. It is proven that traditional filtration methods (HEPA, cellulose filters, cyclones) fail to provide a comprehensive solution in harsh industrial environments due to rapid clogging, high aerodynamic resistance, and thermal instability. The efficiency of electrospun nanofibrous membranes is investigated; thanks to their extremely high porosity, they ensure effective capture of pollutants with a minimal pressure drop. Special attention is paid to the integration of metal-organic frameworks (MOFs) into biodegradable polymer matrices, which transforms passive barrier filtration into an active process involving the catalytic neutralization of toxic gases and solves the problem of eco-friendly disposal. For areas with critically high temperatures, the use of hierarchical ceramic aerogels capable of maintaining operational characteristics and efficiency of over 99.95% at heating up to 1000 °C is substantiated. The perspectives of additive manufacturing (3D printing) in creating deterministic micro-channel lattice and catalytic monolithic structures to reduce flow resistance and efficiently oxidize volatile organic compounds (VOCs) are analyzed. For the first time, these innovative materials science solutions are considered in synergy with physical pre-cleaning methods, specifically acoustic agglomeration for enlarging submicron particles, and Internet of Things (IoT) architecture. The use of a multiple-model adaptive Kalman filter for dynamic forecasting of pollution concentration, leveling of industrial noise, and automated control of exhaust capacities is proposed. The research results form the scientific and technological prerequisites for the transition from static barriers to the creation of hybrid intelligent environmental management systems at industrial enterprises. *Key words:* air purification, fine particulate matter PM_{2.5}, filtration materials, electrospinning, nanofibrous membranes, metal-organic frameworks (MOFs), ceramic aerogels, additive manufacturing, 3D printing, acoustic agglomeration, Internet of Things (IoT), Kalman filter.

Постановка проблеми. Природні процеси, такі як розпад органічної речовини в ґрунтах, вулканічні виверження та лісові пожежі, які часто виникають внаслідок діяльності людини, призводять до викидів у повітря небезпечних газів, диму та попелу, що фор-

мують базовий рівень атмосферного забруднення [1]. Однак у сучасних умовах це забруднення набуло особливої загрози для здоров'я людей через посилений негативний вплив діяльності техногенних підприємств, оскільки містить шкідливі компоненти,



зокрема дрібнодисперсні частинки PM_{2,5}, які здатні проникати глибоко в організм і викликати широкий спектр захворювань. У результаті забруднення повітря стало однією з ключових глобальних проблем, що спричиняє передчасну смертність, погіршення якості життя населення та негативно впливає на екосистеми, вимагаючи системного підходу до його зменшення та контролю [12, 13].

Забруднення повітря тягне за собою зміну природних характеристик внутрішнього або навколишнього середовища через викид біологічних, хімічних або фізичних речовин [1]. Основні фактори забруднення повітря включають неякісні транспортні засоби, що використовують забруднююче паливо, нестійку побутову практику, що значною мірою передбачає використання палива та речовин, що викидають вуглець, для опалення, приготування їжі та освітлення, споживання вугілля та нерегульоване спалювання відходів. Згідно зі звітом Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) [2], населення світу стикається з серйозним ризиком забруднення повітря: приблизно 99% людей дихають повітрям, що містить значні забруднюючі речовини, що перевищують рекомендовані порогові рівні, встановлені ВООЗ.

Забруднення навколишнього середовища, що виникає внаслідок впливу забруднюючих речовин, як бруд, пил, дим, сажа, краплі рідини та промислові хімікати [9,10] утворюється у вигляді твердих частинок (PM) і вважається основним джерелом забруднення повітря [11]. Частинки діаметром 2,5 мікрметри (PM_{2,5}) визначені як такі, що становлять найбільший ризик для здоров'я людей. Відповідно до оновлених рекомендацій ВООЗ 2021 року, нормативи якості повітря стали суворішими порівняно з показниками 2005 року: допустима середньорічна концентрація часток PM_{2.5} знизилася з 10 до 5 мкг/м³, а середньодобова – з 25 до 15 мкг/м³. Для часток PM₁₀ середньорічний поріг зменшили з 20 до 15 мкг/м³, а середньодобовий – з 50 до 45 мкг/м³. Головною причиною такого перегляду стало накопичення наукових доказів того, що забруднення повітря негативно впливає на здоров'я людини навіть при значно нижчих концентраціях, ніж вважалося раніше.

Зокрема, вплив PM_{2,5} збільшує ймовірність серцево-судинних захворювань [15], інсультів, хронічних обструктивних хвороб легень, раку дихальних шляхів, зниження видимості та інших несприятливих наслідків [12,13,14], що призводить до вищого рівня передчасної смертності та скорочення тривалості життя. Найбільш вразливими до такого впливу є діти, літні люди та особи з хронічними захворюваннями, у яких навіть короткочасний вплив забрудненого повітря може викликати загострення симптомів. У всьому світі PM_{2.5} є причиною мільйонів смертей [16]. Таким чином, проблема глобального забруднення PM_{2.5} є критичною, і для її вирішення потрібні термінові та ефективні заходи.

Актуальність дослідження. Рішенням для зниження викидів твердих частинок в навколишнє середовище є застосування фільтруючого устаткування з ефективними методами очищення повітря від шкідливих включень. Основою фільтруючого устаткування є фільтр, що забезпечує сепарацію дисперсної твердої фази від дисперсійного середовища із заданою ефективністю та мінімальними енергетичними втратами. При проектуванні фільтрувальних систем ключовими параметрами, що визначають їхню експлуатаційну придатність, є забезпечення заданої ефективності очищення, мінімізація аеродинамічного опору та максимізація пилоємності. Досягнення оптимального балансу між цими характеристиками є пріоритетною метою.

Ринок пропонує широкий спектр рішень з різними показниками ефективності. Зокрема, золотим стандартом у галузі вважаються паперові та волокнисті фільтри класів HEPA (High Efficiency Particulate Air) та ULPA (Ultra-Low Penetration Air), які отримали найбільше розповсюдження завдяки своїй високій здатності затримувати дрібнодисперсні частки. Менш ефективними але досить поширеними також є целюлозні фільтри, які використовуються як у вигляді паперу для лабораторної фільтрації, так і у вигляді нетканих волокон у панельних фільтрах для систем вентиляції та кондиціонування і здатні затримувати пил та інші механічні домішки, залежно від пористості та способу виготовлення [17].

Стандартні HEPA та ULPA-фільтри, а також целюлозні фільтри чудово працюють у побуті, але на техногенних підприємствах вони швидко забиваються, не витримують високих температур і створюють величезний перепад тиску. Ще одним видом фільтрації, що найчастіше застосовуються на техногенних підприємствах є використання циклонних сепараторів, принцип роботи яких базується на використанні відцентрової сили для відділення зважених часток, що виключає потребу у пористих фільтрувальних матеріалах. Однак, ця технологія має суттєве обмеження: низьку ефективність вловлювання дрібнодисперсних фракцій (розміром менше 5–10 мкм).

Традиційні методи фільтрації не забезпечують комплексного вирішення проблеми очищення повітря від дрібнодисперсних частинок. Попри високу ефективність вловлювання, недоліком існуючих аналогів є необхідність частої заміни одноразових компонентів, що зумовлює високу вартість експлуатації. Окрім того, утилізація відпрацьованих фільтрів, які зазвичай не підлягають рециклінгу, створює додаткове екологічне навантаження та суперечить принципам сталого розвитку. Враховуючи зазначені обмеження, виникає гостра необхідність переходу до фільтрувальних матеріалів нового покоління, здатних працювати в агресивних промислових умовах.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Визначальним етапом модернізації є інтеграція сис-

тем фільтрації в архітектуру Інтернету речей (IoT). Використання масивів високоточних оптичних сенсорів у поєднанні з мікроконтролерами забезпечує безперервний моніторинг якості повітря. Завдяки алгоритмічній обробці даних (наприклад, використанню фільтрів Калмана для мінімізації промислових шумів у вимірюваннях) система здатна динамічно регулювати потужність витяжного обладнання залежно від поточної концентрації забруднювача в реальному часі. Для досягнення максимальної ефективності та енергозбереження необхідний перехід до «розумного» управління повітряними потоками та попередньої підготовки викидів.

Розвиток технологій фізичного впливу, таких як акустична агломерація, дозволяє за допомогою звукових хвиль укрупнювати субмікронні частинки до розмірів (понад 10 мкм), які потім з легкістю вловлюються класичними циклонами. Це суттєво знижує пилове навантаження на тонкі фільтрувальні елементи на наступних етапах очищення. Таким чином, парадигма сучасного очищення повітря на техногенних підприємствах еволюціонує від простого застосування статичних бар'єрів до створення гібридних автоматизованих комплексів. Синергія передових наноматеріалів, просторового моделювання та інтелектуальних систем адаптивного управління потоками є тим необхідним кроком, який дозволить вирішити проблему забруднення дрібнодисперсним пилом ефективно та економічно доцільно, що повністю відповідає завданням галузі технологій захисту навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасний вектор досліджень зосереджений на застосуванні нановолокнистих мембран (зокрема, створених методом електроформування), які завдяки надзвичайно високій пористості забезпечують ефективне захоплення частинок PM_{2.5} при мінімальному аеродинамічному опорі [18-20]. Тривалий час стандартом залишалися мікрОВОЛОКОННІ матеріали, однак у традиційних фільтрувальних матеріалах діаметр волокон зазвичай знаходиться в мікрометровому діапазоні, а сам фільтр складається з кількох шарів [18]. Хоча такий фільтр здатний досягти високої ефективності видалення частинок, він збільшує аеродинамічний опір та підвищує енергоспоживання обладнання. Функціонування нановолокнистих мембран базується на фізичному захопленні твердих частинок із газового потоку [19, 20].

Традиційні фільтрувальні матеріали, які захищають дихальні шляхи від токсичних газів та дрібнодисперсного пилу, переважно виготовляються з матеріалів на основі нафти. Широке застосування таких матеріалів стає серйозним викликом для інфраструктури переробки та утилізації. Згідно з даними попередніх матеріалознавчих досліджень, застосування металоорганічних каркасів (MOF) демонструє високу ефективність у процесах сорбції токсичних

газів, що зумовлено їхньою розвиненою питомою поверхнею та високою пористістю [29].

Щодо високотемпературних умов, проблема очищення викидів від твердих частинок залишається одним із головних викликів. Як зазначають у своїх дослідженнях Лі та ін. [31], а також Нао та ін. [32], розробка термостійких нановолокнистих мембран є критично важливою для промисловості. Проте існуючі рішення часто демонструють високий опір потоку повітря або обмежений термін служби при екстремальних температурах [33].

На відміну від традиційних відкритопористих піноматеріалів, які мають стохастичний характер внутрішньої морфології, технологія 3D-друку забезпечує безпрецедентний рівень керованості структурою матеріалу. Як показано у роботах [35, 36], класичні методи виробництва не дають можливості прецизійно контролювати локальну архітектуру комірок, що суттєво обмежує аеродинамічну оптимізацію фільтрувальних середовищ. Натомість адитивне виробництво повністю долає ці лімітації, дозволяючи створювати оптимізовані детерміновані геометрії із наперед заданими характеристиками.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на високий потенціал, кожна з новітніх технологій має певні обмеження, які стримують їхнє масове впровадження і які досі залишалися недостатньо систематизованими в єдиному порівняльному аналізі. Аналіз ефективності методу електроспінінгу вказує на два головні бар'єри: низька виробнича потужність та той факт, що промислове виробництво ще не повністю реалізовано [25, 26]. Створення складних функціональних фільтрів супроводжується складністю виробництва та високою вартістю [27].

Для біорозкладних мембран з MOF дослідники відзначають технологічний компроміс: спроби підвищити ефективність захоплення пилу до 99% шляхом збільшення шару нановолокон призводять до різкого зростання опору повітря (до ~67 Па). У сфері високотемпературних аерогелів варто звернути увагу на технологічну складність процесу. Створення багатшарового фільтра вимагає складного багатокомпонентного синтезу та енергоємного високотемпературного випалювання, що суттєво підвищує вартість [31, 33].

В адитивних технологіях вагомим технологічним викликом залишається явище потоншення структурних елементів (strut-thinning), що призводить до просторової невідповідності між надрукованим зразком та цифровою моделлю [40]. При друці антибактеріальних полімерів основним недоліком є явище «занурення» наночастинок металу вглиб полімерної матриці, внаслідок чого матеріал втрачає здатність до інгібування росту бактерій у сухому стані [41]. У каталітичних монолітах критичним фактором є значна об'ємна усадка матеріалу (до 22%) під час спікання [45].

Щодо моніторингу та агломерації, акустичні методи мають високу залежність ефективності від параметрів процесу, складність масштабування та значний рівень шуму. А впровадження IoT датчиків супроводжується високою чутливістю вихідних сигналів до шумів і дрейфу, вимагаючи складних алгоритмів фільтрації (таких як багатомодельний фільтр Калмана), що, у свою чергу, підвищує обчислювальну вартість [50].

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у проведенні всебічного порівняльного аналізу розрізаних інноваційних методів виробництва фільтруючих матеріалів. Інтеграція металоорганічних каркасів (MOF) дозволяє перетворити пасивну бар'єрну фільтрацію на активний процес, залучаючи електростатичні сили та здатність до каталітичної нейтралізації супутніх токсичних газів. Для ділянок із критично високими температурами розробляються ізотропні керамічні аерогелі та поліімідні фільтри, які зберігають свої характеристики при нагріванні понад 300–700 °С.

Створення складних, оптимізованих структур таких новітніх фільтрів дедалі частіше реалізується за допомогою технологій адитивного виробництва (3D-друку). Це дозволяє проектувати мікроканалні геометрії (наприклад, "лабіринтні" каталітичні структури), які значно знижують перепад тиску, створюють ідеальні умови для проходження повітря і уможливають створення багаторазових елементів, які легко піддаються регенерації, відповідаючи вимогам сталого розвитку. Однак, впровадження інноваційних матеріалів – це лише частина комплексного рішення, яке вперше в даній роботі розглядається крізь призму поєднання з IoT та фізичними методами (акустика).

Методологічне або загальнонаукове значення. Застосування електроформованих нановолоконних мембран, керамічних аерогелів та 3D-друкованих структур становить значний науково-практичний інтерес у контексті вдосконалення сучасних систем очищення повітря. Їхні специфічні морфологічні характеристики дозволяють досягти високого ступеня сепарації твердофазних включень за умов низького аеродинамічного опору, що нівелює фундаментальні недоліки класичних фільтрувальних середовищ.

Перехід від стохастичних відкритопористих піно-матеріалів до детермінованих мікроканалних гратчастих структур є актуальним напрямом вдосконалення аерозольних фільтрів. Прецизійне керування геометричними параметрами забезпечує створення систем із прогнозованими експлуатаційними характеристиками, що суттєво перевершують показники традиційних середовищ. Це формує науково-технологічні передумови для розробки спеціалізованих рішень у галузях промислової безпеки. Стратегія подальшого розвитку даного напрямку вимагає вирішення інженерних завдань щодо промислового масштабування процесу та оптимізації економічних показників масового випуску.

Викладення основного матеріалу.

Блок 1: Інноваційні матеріали для захоплення мікрочастинок

1.1. Нановолоконні мембрани (технологія електроформування)

Електроформовані нановолоконні мембрани у системах фільтрації повітря демонструють нові принципи та переваги. Саме потреба знизити перепад тиску та збільшити пилоємність стимулювала перехід до застосування волокон нанометрового діапазону. Завдяки малим розмірам пор, надзвичайно високій пористості (яка може сягати 80% і більше) та відмінній зв'язності, електроформовані мембрани ефективно вловлюють забруднювачі, зберігаючи при цьому достатній простір для проходження повітря.

Основним методом отримання таких мембран є електроспінінг (електроформування). Електроспінінг – це метод виробництва волокон шляхом витягування полімеру за допомогою сили електричного поля [21]. Процес формування нановолокон поділяється на три ключові етапи: 1) Полімерний розчин утворює краплю під дією поверхневого натягу та сили тяжіння; 2) Під впливом високої напруги поверхня краплі накопичує заряд і витягується; 3) Коли кулонівська сила перевищує поверхневий натяг, утворений конус (конус Тейлора) випускає прямий струмінь [22]. Через швидке випаровування розчинника струмінь стає нестабільним, починає хаотично вигинатися і розтягуватися, утворюючи тонкі полімерні волокна, що осідають на колекторі.

Впровадження електроформованих мембран дозволяє обійти критичні недоліки традиційних фільтрів. Сучасні матеріали відзначаються високою пористістю, хорошою зв'язністю пор, високою ефективністю видалення забруднень та низьким перепадом тиску [23, 24]. Окрім цього, процес забезпечує рівномірний діаметр волокон та є відносно простим однокроковим методом, який дозволяє легко модифікувати матеріали, наприклад, додавати наночастинки для створення антибактеріальних чи вогнезахисних властивостей [23, 24].

1.2. Металоорганічні каркаси (MOFs) та їх інтеграція в текстиль

Традиційні фільтрувальні матеріали мають високу хімічну стабільність, що призводить до екологічних проблем. Тому виникла нагальна потреба у створенні біорозкладних фільтрувальних матеріалів. Група вчених (Ryu S., Kim D. та ін., 2023) розробила інноваційну повністю біорозкладну мембрану, яка поєднує нановолокна, металоорганічні каркаси (MOF) та бавовну [28]. Запропонована мембрана характеризується біфункціональними властивостями, які забезпечують одночасну хімічну нейтралізацію газоподібних забруднювачів та ефективне уловлення дрібнодисперсних частинок (PM2.5).

Роль доступної полімерної підкладки виконує бавовняна основа, на поверхні якої шляхом спрямо-

ваної кристалізації формуються структури цеолітного імідазолатного каркаса (ZIF-8). У запропонованому композитному матеріалі шар MOF забезпечує ефективність адсорбції сірководню, формальдегіду та аміаку на рівні, що перевищує 99%. Оскільки природна макропористість бавовни перешкоджає ефективному затриманню субмікронних аерозолів, функцію фізичної сепарації PM2.5 реалізує осаждена на її поверхню методом електроформування нановолоконна сітка з ацетату целюлози. Мембрана демонструє ефективність фільтрації дрібнодисперсних частинок на рівні 93.1% при дуже низькому аеродинамічному опорі (перепад тиску лише 14.2 Па). Визначальною перевагою є здатність матеріалу до біологічного розпаду – втрата маси становить 62.5% вже через 45 днів у стандартних умовах компостування [30]. Дане дослідження демонструє життєздатність гібридних підходів у матеріалознавстві.

1.3. Високотемпературні рішення для екстремальних термальних умов

Традиційні неорганічні та полімерні нановолокнисті фільтри часто стикаються з проблемою термічної та механічної нестабільності. Логічним кроком у подоланні цих недоліків стала нещодавня розробка команди дослідників під керівництвом Chuan-Hui Guo, яка представила інноваційний ієрархічний гнучкий керамічний аерогель зі структурою багатомасштабного градієнтного волокна (gZCFA) [34]. Цей матеріал виготовляється інноваційним методом градієнтного аеродинамічного формування (air-blown spinning). Розчин-прекурсор видувається потоком повітря різної швидкості, що дозволяє формувати волокна різних діаметрів. Після збору матеріалу волокна випаляються при температурі 1100°C протягом 1 години.

В основі роботи фільтра лежить його ієрархічна структура з безперервним мультимасштабним градієнтом. Верхні, більш товсті волокна затримують великі частинки (PM10), середні – PM3, а найтонші волокна знизу вловлюють найдрібніші частинки (PM0.6). Такий підхід забезпечує багатоступеневу фільтрацію, мінімізує накопичення пилу лише на поверхні та запобігає засміченню [34]. Головною перевагою матеріалу є висока ефективність фільтрації, яка сягає 99,96% при перепаді тиску в 156 Па, а також безпрецедентна пилоємність на рівні 101 г/м². Матеріал зберігає робочу ефективність понад 99,95% навіть при впливі високих температур до 1000°C. Розробка ієрархічного керамічного волокнистого аерогелю з діоксиду цирконію ZrO₂ пропонує масштабований шлях для створення систем очищення промислових димових газів нового покоління.

Блок 2: Адитивні технології (3D-друк) у проектуванні фільтрів

2.1. Створення складної мікроканальної геометрії

Впровадження адитивних технологій дозволяє здійснити перехід від випадкових пористих середо-

вищ до впорядкованих ґратчастих структур (lattices), геометричні параметри яких можна цілеспрямовано модифікувати на мікрорівні. В основі лежить параметричне проектування ідеалізованих комірок, таких як кубічна, октаедрична або складні структури Кельвіна (Kelvin) та Вейра-Філана (Weaire-Phelan) [37]. Для виготовлення використовується метод цифрового синтезу світлом (Digital Light Synthesis, DLS) на базі полімерної смоли UMA90, що забезпечує високу точність відтворення мікроканалів.

Механізм очищення повітря базується на комбінації інерційного зіткнення частинок з елементами ґратки та електростатичного притягання [38]. Ключовою перевагою є здатність нівелювати традиційний компроміс між високою ефективністю сепарації та низьким перепадом тиску [39]. 3D-друковані ґратки забезпечують майже 100% ефективність вловлювання частинок навіть при високих швидкостях потоку (до 4 м/с).

2.2. Багаторазові префільтри зі спеціальними властивостями

Функціонування потужних систем вентиляції супроводжується ризиком акумуляції біологічних контамінантів. Згідно з дослідженнями [41], застосування методів адитивного виробництва дозволяє синтезувати фільтрувальні елементи з детермінованою пористістю та антимікробними поверхнями. В основі лежить використання методу моделювання методом наплавлення (FFF). В якості матриці обрано полілактид (PLA) та термопластичний поліуретан (TPU), армовані наночастинками міді (Cu) у концентрації 1 мас.%. Вибір міді базується на її здатності генерувати активні форми кисню [42, 43].

Процес передбачає друк гексагональних або лінійних структур із різним рівнем заповнення. Введення мідних наночастинок покращує експлуатаційні характеристики виробів, зокрема для TPU спостерігається зростання модуля пружності на 330% [41]. Використання термопластів дозволяє повністю переробляти відпрацьовані фільтри. Комбінація адитивного виробництва та нанокompозитів відкриває шлях до створення нового покоління інтелектуальних систем фільтрації з функцією дезінфекції.

2.3. 3D-друк каталітичних монолітних структур

Леткі органічні сполуки (ЛОС) найефективніше нейтралізуються через каталітичне окиснення [45]. Впровадження технології 3D-друку (FFF) дозволяє створювати керамічні носії зі складними внутрішніми геометріями. Використання перехідних металів, таких як марганець та залізо, робить технологію економічно ефективною. Процес базується на використанні композитних філаментів з порошку діоксиду цирконію (ZrO₂) та полімерного зв'язуючого компонента [46]. Після 3D-друку структури проходять термічну обробку та спікання при температурі близько 1475°C [45]. Активна фаза (MnFeOx) наноситься методом вологого просочення, де від-

бувається окиснення сполук групи ВТЕХ (бензол, толуол, етилбензол, ксилол).

Експериментальні дані підтверджують, що подання структурної гнучкості ZrO_2 та активності шару $MnFeO_x$ дозволяє досягти понад 99% ефективності знешкодження суміші ВТЕХ при температурі всього $177^\circ C$ [46]. Цей підхід є високоефективним рішенням для боротьби з промисловими викидами ЛОС.

Блок 3: Фізичні методи попереднього очищення

3.1. Акустична агломерація у витяжних каналах

Оскільки традиційні методи газоочищення демонструють недостатню здатність до уловлювання субмікронних часток, перспективним рішенням є акустична агломерація – процес, при якому звукові хвилі впливають на рух частинок у повітрі, сприяючи їх зіткненню та утворенню більших агломератів. Основними механізмами є ортокінетична взаємодія та гідродинамічні сили.

У дослідженні [47] доведено, що кінетика та ефективність коагуляції критично детермінуються параметрами звукового поля. Встановлено оптимальні режими: у частотному діапазоні 1500–3000 Гц та за рівня звукового тиску 129–135 дБ максимальний коефіцієнт ефективності агломерації сягав 80 % [47]. Технологія дозволяє значно зменшити концентрацію частинок розміром до 1 мкм (до 79 %) та одночасно збільшити частку більших частинок, що полегшує їх уловлювання класичними фільтрами.

Блок 4: Інтеграція системи моніторингу у процесі фільтрації

4.1. Роль IoT-архітектури у сучасному очищенні повітря

Широка доступність недорогих датчиків значно підвищила роздільну здатність моніторингу забруднення [48]. IoT-пристрій будується на базі компактного одноплатного комп'ютера Raspberry Pi Zero 2 W, до якого підключено мультисенсорний модуль Winsen (ZPHS01B), що фіксує концентрації $PM_{2.5}$, PM_{10} , вуглекислого газу, формальдегіду, ЛОС, температуру і вологість. Особливої уваги потребує процедура калібрування сенсорів. Для забезпечення достовірності даних в екстремальних промислових умовах критично важливо проводити експериментальне калібрування сенсорів температури та вологості, порівнюючи показники досліджуваного пристрою з еталонним датчиком у широкому діапазоні температур (від -50 до $80^\circ C$), що дозволяє врахувати та компенсувати температурні девіації.

Ключовим інноваційним елементом є адаптивна фільтрація: система динамічно змінює розмір вікна згладжування для швидкого реагування [48]. Завдяки компактності забезпечується висока масштабованість мережі. Пристрій успішно пройшов тестування у транспортній інфраструктурі, довівши здатність безперервно реєструвати параметри [48].

Інтеграція IoT-рішень формує нову модель екологічного моніторингу для цифрової платформи «розумного міста» [48, 49].

4.2. Прогнозування концентрації ($PM_{2.5}$) за допомогою адаптивного фільтра Калмана

Для підвищення загальної точності прогнозування була розроблена технологія багатомодельного адаптивного фільтра Калмана (MMAUKF) [50], яка концептуально спирається на теорію багатомодельного управління [51]. Принцип роботи базується на інтеграції даних з платформ моніторингу. На першому етапі добові дані розбиваються на три часові періоди. Для кожного створюється своя нелінійна модель на основі методу опорних векторів для регресії (SVR). Далі ця структура подіюється з адаптивним фільтром Калмана. На завершальному етапі прогнозовані значення об'єднуються за допомогою методу байєсівського зважування.

Головною перевагою є підвищення точності та стабільності порівняно з алгоритмами на базі єдиної моделі. Система гнучко адаптується до різних станів середовища. Застосування адаптивного фільтра Калмана дозволяє системі самостійно здійснювати оцінку стороннього шуму, уникаючи проблем з локальним перенавчанням нейронних мереж [52, 53]. Метод MMAUKF ефективно долає обмеження поодиноких статистичних моделей.

Головні висновки. На основі проведеного аналізу можна зробити такі ключові висновки щодо сучасного стану технологій очищення повітря:

1. Еволюція методів фільтрації неминуче рухається від пасивних статичних бар'єрів до інтелектуальних, ієрархічно структурованих матеріалів. Нановолокнисті мембрани та впровадження біорозкладних компонентів із металоорганічними каркасами (MOF) забезпечують високу ефективність уловлювання як дрібнодисперсного пилу, так і токсичних газів, одночасно вирішуючи проблему екологічної безпеки утилізації.

2. Для екстремальних умов техногенних підприємств найбільш перспективним матеріалознавчим рішенням є розробка градієнтних керамічних аерогелів, які демонструють безпрецедентну термічну стабільність (до $1000^\circ C$) та можливість багаторазової регенерації.

3. Адитивні технології (3D-друк) відкривають принципово нові можливості у конструюванні просторової архітектури фільтрів. Застосування мікроканальних ґраток дозволяє оптимізувати аеродинамічний опір, а друк композитів з наночастинками металів чи каталітичними покриттями забезпечує антибактеріальний захист та окиснення летких органічних сполук (ЛОС).

4. Комплексне вирішення проблеми неможливе без застосування допоміжних фізико-інформаційних систем. Акустична агломерація суттєво підвищує продуктивність попереднього очищення, а розгортання масштабованих IoT-мереж з використанням

передових математичних алгоритмів (багатомодельний адаптивний фільтр Калмана) дозволяє здійснювати динамічне прогнозування та автоматизоване управління вентиляційними потужностями у режимі реального часу.

Перспективи використання результатів дослідження. Практична реалізація розглянутих гібридних технологій здатна докорінно змінити підходи до екологічного менеджменту на про-

мислових підприємствах. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на масштабування процесів виробництва (зокрема, подолання обмежень електроспінінгу та усадки при 3D-друці кераміки), а також на інтеграцію розроблених локальних фільтрувальних систем у глобальну екосистему "розумного підприємства" з метою мінімізації енергетичних витрат і досягнення нульового рівня шкідливих викидів.

Література

1. Dong D., Wang J. Air Pollution as a Substantial Threat to the Improvement of Agricultural Total Factor Productivity: Global Evidence. *Environment International*. 2023. Vol. 173. P. 107842. DOI: 10.1016/j.envint.2023.107842.
2. WHO Ambient Air Quality Database, 2022 Update: Status Report. Geneva : World Health Organization, 2023. 1st ed. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240047693> (дата звернення: 22.04.2026).
3. Hu Y., Yao M., Liu Y., Zhao B. Personal Exposure to Ambient PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, and SO₂ for Different Populations in 31 Chinese Provinces. *Environment International*. 2020. Vol. 144. P. 106018. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106018.
4. Zhao S., Shi A., An H. et al. Does the Low-Carbon City Pilot Contribute to the Blue Sky Defense? Evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30, No. 35. P. 84595–84608. DOI: 10.1007/s11356-023-28712-2.
5. Liu Y., Cao G., Zhao N. Integrate Machine Learning and Geostatistics for High-Resolution Mapping of Ground-Level PM_{2.5} Concentrations // Spatiotemporal Analysis of Air Pollution and Its Application in Public Health. Elsevier, 2020. P. 135–151. DOI: 10.1016/B978-0-12-815822-7.00006-7.
6. Yu-Fei Xing. The Impact of PM_{2.5} on the Human Respiratory System. *Journal of Thoracic Disease*. 2016. Vol. 8, No. 1. P. E69. DOI: 10.3978/j.issn.2072-1439.2015.11.37.
7. Paul A. R., Jain A., Saha S. C. Exposure Assessment of Air Pollution in Lungs. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, No. 11. P. 1767. DOI: 10.3390/atmos13111767.
8. Zhong S., Yu Z., Zhu W. Study of the Effects of Air Pollutants on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16, No. 6. P. 1014. DOI: 10.3390/ijerph16061014.
9. Tian Y., Ma Y., Wu J. et al. Ambient PM_{2.5} Chemical Composition and Cardiovascular Disease Hospitalizations in China. *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58. P. 16327–16335. DOI: 10.1021/acs.est.4c03123.
10. Cohen A. J., Brauer M., Burnett R. et al. Estimates and 25-Year Trends of the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Air Pollution. *The Lancet*. 2017. Vol. 389. P. 1907–1918. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)30505-6.
11. Lippi M., Riva L., Caruso M., Punta C. Cellulose for the Production of Air-Filtering Systems: A Critical Review. *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 976. DOI: 10.3390/ma15030976.
12. Bian Y., Wang S. J., Zhang L., Chen C. Influence of Fiber Diameter, Filter Thickness, and Packing Density on PM_{2.5} Removal Efficiency. *Building and Environment*. 2020. Vol. 170. P. 106628. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106628.
13. Han K. S., Lee S., Kim M. et al. Electrically Activated Ultrathin PVDF-TrFE Air Filter for High-Efficiency PM_{1.0} Filtration. *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 29. P. 1903633. DOI: 10.1002/adfm.201903633.
14. Liu H., Zhang S. C., Liu L. F. et al. A Fluffy Dual-Network Structured Nanofiber/Net Filter Enables High-Efficiency Air Filtration. *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 29. DOI: 10.1002/adfm.201901573.
15. Zhang J., Chen G., Bhat G. S. et al. Electret Characteristics of Melt-Blown Poly(lactic acid) Fabrics for Air Filtration Application. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Vol. 137. P. 48309. DOI: 10.1002/app.48309.
16. Mingjun C., Youchen Z., Li H. et al. An Example of Industrialization of Melt Electrospinning: Polymer Melt Differential Electrospinning. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2019. Vol. 2. P. 110–115. DOI: 10.1016/j.aiepr.2019.05.003.
17. Buivydiene D., Krugly E., Ciuzas D. et al. Formation and Characterisation of Air Filter Material Printed by Melt Electrospinning. *Journal of Aerosol Science*. 2019. Vol. 131. P. 48–63. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2019.01.004.
18. Zulfi A., Hapidin D. A., Munir M. M. et al. The Synthesis of Nanofiber Membranes from Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Waste. *RSC Advances*. 2019. Vol. 9. P. 30741–30751. DOI: 10.1039/C9RA05635E.
19. Roche R., Yalcinkaya F. Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibrous Membranes for Point-of-Use Water and Air Cleaning. *ChemistryOpen*. 2019. Vol. 8. P. 97–103. DOI: 10.1002/open.201800281.
20. Lu T., Cui J., Qu Q. et al. Multistructured Electrospun Nanofibers for Air Filtration: A Review. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. Vol. 13. P. 23293–23313. DOI: 10.1021/acsami.1c04723.
21. Li Y., Wang D., Xu G. et al. ZIF-8/PI Nanofibrous Membranes With High-Temperature Resistance. *Frontiers in Chemistry*. 2021. Vol. 9. P. 810861. DOI: 10.3389/fchem.2021.810861.
22. Ryu S., Kim D., Lee H. et al. Biodegradable Nanofiber/Metal-Organic Framework/Cotton Air Filtration Membranes. *Polymers*. 2023. Vol. 15. P. 3965. DOI: 10.3390/polym15193965.
23. Binaecian E., El-Sayed E.-S. M., Matikolaie M. K., Yuan D. Experimental strategies on enhancing toxic gases uptake of metal-organic frameworks. *Coordination Chemistry Reviews*. 2021. Vol. 430. P. 213738. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213738.
24. Zambrano M. C., Pawlak J. J., Venditti R. A. Effects of chemical and morphological structure on biodegradability of fibers, fabrics, and other polymeric materials. *BioResources*. 2020. Vol. 15. P. 9786. DOI: 10.15376/biores.15.4.9786-9807.
25. Li Z., Song J., Long Y. et al. Large-scale blow spinning of heat-resistant nanofibrous air filters. *Nano Research*. 2020. Vol. 13. P. 861–867. DOI: 10.1007/s12274-019-2603-3.

26. Hao Z., Wu J., Wang C., Liu J. Electrospun Polyimide/Metal-Organic Framework Nanofibrous Membrane with Superior Thermal Stability for Efficient PM_{2.5} Capture. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019. Vol. 11. P. 11904–11909. DOI: 10.1021/acsami.9b00795.
27. Wang S., Zhao X., Yin X., Yu J., Ding B. Electret Polyvinylidene Fluoride Nanofibers Hybridized by Polytetrafluoroethylene Nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. Vol. 8. P. 23985–23994. DOI: 10.1021/acsami.6b07991.
28. Guo C.-H., Gao Y., Zhang C. et al. Multi-Scale Gradient Fiber Structure Hierarchical Flexible Ceramic Aerogel for High-Temperature Filtration. *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13, No. 13. P. 1957. DOI: 10.3390/nano13131957.
29. Clark A. M., Fromen C. A. Role of flow rate on the deposition of aerosol particles in open-cell foam filters. *Aerosol Science and Technology*. 2021. Vol. 55, No. 10. P. 1146–1159. DOI: 10.1080/02786826.2021.1901234.
30. Hellmann M., Clark A. M., Fromen C. A. Influence of open-cell foam architecture on the pressure drop and filtration efficiency. *Journal of Aerosol Science*. 2021. Vol. 157. P. 105825. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2021.105825.
31. Yu Y., Zhang N., Hoffman D. et al. Design and Evaluation of 3D-Printed Lattice Structures as High Flow Rate Aerosol Filters. *ACS Applied Engineering Materials*. 2024. Vol. 2. P. 2875–2884. DOI: 10.1021/acsaeam.4c00321.
32. Laengert S., Boies A. M., Hochgreb S. Effect of electrostatic charge on the filtration of aerosol particles in foam filters. *Journal of Aerosol Science*. 2020. Vol. 148. P. 105608. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2020.105608.
33. Inayat A., Schwerdtfeger J., Freund H. et al. Periodic open-cell foams: Pressure drop measurements and modeling of an idealized cell architecture. *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 143. P. 372–381. DOI: 10.1016/j.ces.2015.12.042.
34. Kolewe E. L., Padhye S., Woodward I. R. et al. A Pediatric Upper Airway Library to Evaluate Interpatient Variability of In Silico Aerosol Deposition. *AAPS PharmSciTech*. 2023. Vol. 24, No. 6. P. 162. DOI: 10.1208/s12249-023-02515-3.
35. Pinho A. C., Morais P. V., Pereira M. F., Piedade A. P. Changes in the Antibacterial Performance of Polymer-Based Nanocomposites. *Polymers*. 2025. Vol. 17. P. 171. DOI: 10.3390/polym17010171.
36. Soe S., Stratakos A. C. An explorative study on the antimicrobial effects and mechanical properties of 3D printed PLA and TPU surfaces. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2023. Vol. 137. P. 105536. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2022.105536.
37. Petousis M., Vidakis N., Mountakis N. et al. Multifunctional Material Extrusion 3D-Printed Antibacterial Polylactic Acid (PLA) with Binary Inclusions. *Fibers*. 2022. Vol. 10. P. 52. DOI: 10.3390/fib10060052.
38. Vidakis N., Petousis M., Velidakis E. et al. Three-Dimensional Printed Antimicrobial Objects of Polylactic Acid (PLA)-Silver Nanoparticle Nanocomposite Filaments. *Biomimetics*. 2020. Vol. 5. P. 42. DOI: 10.3390/biomimetics5030042.
39. Car F., Zekić N., Vrsaljko D., Tomašić V. Innovative Production of 3D-Printed Ceramic Monolithic Catalysts for Oxidation of VOCs. *Catalysts*. 2025. Vol. 15, No. 2. P. 125. DOI: 10.3390/catal15020125.
40. Guan Z., Yang X., Liu P. et al. Additive manufacturing of zirconia ceramic by fused filament fabrication. *Ceramics International*. 2023. Vol. 49. P. 27742–27749. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.06.123.
41. Kilikevičienė K., Kačianauskas R., Rimša V., Kilikevičius A. Agglomeration of particulate matter in chimneys using acoustic flow. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. P. e25306. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25306.
42. Moldagulova A., Kalpeyeva Z., Uskenbayeva R. et al. IoT-Based Air Quality Monitoring with Adaptive Filtering and RPA-Based Decision Automation. 2026. DOI: 10.13140/RG.2.2.33451.21281.
43. Toma C., Alexandru A., Popa M., Zamfiroiu A. IoT Solution for Smart Cities' Pollution Monitoring and the Security Challenges. *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 15. P. 3401. DOI: 10.3390/s19153401.
44. Li J., Li X., Wang K., Cui G. Atmospheric PM_{2.5} Prediction Based on Multiple Model Adaptive Unscented Kalman Filter. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, No. 5. P. 607. DOI: 10.3390/atmos12050607.
45. Blom H. A. P., Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1988. Vol. 33. P. 780–783. DOI: 10.1109/9.1299.
46. Zhou Q., Jiang H., Wang J., Zhou J. A hybrid model for PM_{2.5} forecasting based on ensemble empirical mode decomposition. *Science of The Total Environment*. 2014. Vol. 496. P. 264–274. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.07.074.
47. Sun W., Sun J. Daily PM_{2.5} concentration prediction based on principal component analysis and LSSVM. *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 188. P. 144–152. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.11.078.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026