

С. В. Сукач, Є. Є. Лашко, О. О. Ченчева, Д. В. Резнік, І. С. Петренко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

## СИНТЕЗ ТРИФАКТОРНОЇ РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ ПИЛОПОГЛИНАННЯ У ПОВІТРЯНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ

**Анотація. Актуальність.** Забезпечення нормативної якості повітря у виробничих приміщеннях є важливою умовою промислової, техногенної безпеки, безпеки праці, оскільки дрібнодисперсний пил здатний тривалий час перебувати у зваженому стані, ресуспендуватися з поверхонь і формувати підвищене інгаляційне навантаження на працівників. **Предмет дослідження:** процеси пилопоглинання, седиментації та ресуспензії дрібнодисперсних частинок у внутрішньому повітряному середовищі за змінних параметрів мікроклімату. **Мета дослідження:** розроблення науково обґрунтованої трифакторної регресійної моделі коефіцієнта пилопоглинання з урахуванням температури, відносної вологості та масової концентрації пилу для предиктивного керування якістю повітря у приміщеннях. **Завдання дослідження.** Систематизувати фізичні механізми осадження та вторинного зависання дрібнодисперсного пилу; встановити аналітичну залежність концентрації пилу від відносної вологості; синтезувати та статистично перевірити регресійну модель пилопоглинання; визначити області стабілізації та сухої деструкції пилової хмари й обґрунтувати можливість практичного використання моделі. **Методи дослідження.** Теоретичний аналіз, узагальнення експериментальних даних, нелінійний метод найменших квадратів, трифакторне рототабельне планування другого порядку, регресійний і дисперсійний аналіз, перевірка коефіцієнтів за критерієм Стюдента, перевірка адекватності за критерієм Фішера, аналіз поверхонь відгуку й ізоліній. **Результати дослідження.** У роботі узагальнено сучасні уявлення про вплив вологості, температури, адгезії частинок, гіроскопічного росту та механічної активності людини на формування аерозольного навантаження. На основі експериментального масиву побудовано експоненційну залежність концентрації від відносної вологості повітря, а також синтезовано поліноміальну трифакторну модель другого порядку для коефіцієнта пилопоглинання. За результатами математичного моделювання встановлено домінуючу роль відносної вологості, визначено зони стабілізації пилової хмари та зону сухої деструкції, у якій зростає інтенсивність вторинного зависання частинок. **Висновки.** Запропонована модель із коефіцієнтом детермінації 94 % може бути використана як алгоритмічна основа для Smart HVAC, аспіраційних і зволожувальних систем промислових приміщень, а також для оцінювання ризиків впливу дрібнодисперсного пилу на персонал.

**Ключові слова:** якість повітря у приміщеннях, пилопоглинання, ресуспензія, відносна вологість, температура, мікроклімат, регресійна модель, Smart HVAC.

### 1. Вступ

#### 1.1 Актуальність тематики

Забезпечення нормативних показників якості повітряного середовища у приміщеннях (IAQ) належить до пріоритетних завдань у галузях промислової, техногенної безпеки й охорони праці. В умовах сучасної урбанізації людина перебуває у закритих просторах різного призначення до 80–90 % добового часу. Внутрішнє повітряне середовище часто характеризується вищим рівнем забруднення порівняно з атмосферним через акумуляцію та постійну рециркуляцію аерозолів антропогенного та природного походження [1, 2].

Особливу небезпеку становлять дрібнодисперсні зважені частинки фракцій  $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$ . Результати епідеміологічних і токсикологічних досліджень ВООЗ свідчать, що тривалий інгаляційний вплив таких частинок спричиняє розвиток хронічних обструктивних захворювань легень, серцево-судинних патологій, а також зниження когнітивної та фізичної працездатності [3, 4]. На промислових об'єктах накопичення пилу на поверхнях із його подальшою ресуспензією створює ризики формування зон підвищеної небезпеки [5].

Відомі методи оцінювання якості повітря зазвичай ґрунтуються на порівнянні миттєвих концентрацій із гранично допустимими значеннями [6]. Проте такий підхід є пасивним і не враховує динаміку фізико-хімічних процесів у закритому

просторі під впливом параметрів мікроклімату [7]. Розвиток систем кондиціювання й інтелектуальної вентиляції (Smart HVAC) обумовлює необхідність переходу до предиктивних систем керування якістю повітряного середовища. Одним із ключових параметрів у таких системах має стати коефіцієнт пилопоглинання внутрішнього середовища  $k_{ds}$  – інтегральний показник, який описує здатність гетерогенної системи приміщення зв'язувати, коагулювати та виводити зважені частинки з аеродисперсного стану під дією термодинамічних чинників.

#### 1.2 Аналіз літературних джерел і визначення проблеми

Аналіз наукових праць свідчить, що концентрація пилу у приміщенні визначається динамічною рівновагою між процесами генерації, дифузії, гравітаційної седиментації та вентиляційного видалення. Зокрема, у дослідженнях [8, 9] розглянуто механізми вторинного пилоутворення внаслідок рухової активності людини у приміщенні. Авторами встановлено, що кінетична енергія механічного контакту є основним чинником руйнування адгезійних зв'язків, проте інтенсивність цього процесу суттєво залежить від вологовмісту середовища.

Вплив відносної вологості на адгезію в системі «частинка – поверхня» детально описано у роботі [10]. Встановлено, що за умови перевищення

порогу вологості 50–60 % виникає капілярна конденсація водяної пари, що посилює зв'язування пилу на поверхнях і перешкоджає його ресуспензії. Крім того, згідно з дослідженням [11], у вологому середовищі спостерігається гігроскопічне укрупнення аерозолів ( $>2,5$  мкм), що прискорює їх седиментацію за законом Стокса.

Вплив температурного градієнта повітряного середовища на аеродисперсні системи має складну подвійну природу. Підвищення температури повітря призводить до збільшення його в'язкості, що сповільнює гравітаційне осадження частинок. Водночас температурні коливання інтенсифікують конвективні потоки та прискорюють випаровування води з капілярів, що сприяє відриву сухих частинок від поверхонь [12, 13].

Незважаючи на значний обсяг експериментальних даних, представлених зокрема у праці [14], на сьогодні відсутній уніфікований аналітичний апарат для комплексного опису залежності масової концентрації пилу від температури та вологості через інтегральну функцію пилопоглинання. Існуючі моделі переважно обмежені ізотермічними умовами чи мають вузькоспеціалізований статистичний характер [15, 16].

На основі теоретичного аналізу висунуто гіпотезу, що коефіцієнт пилопоглинання є нелінійною функцією термодинамічного стану повітряного середовища у приміщенні. У цій моделі вологість виступає депресором пилової фази за рахунок капілярних ефектів і гігроскопічного росту, тоді як температура регулює кінетичну енергію системи та стабільність адгезійних зв'язків, що визначає специфіку поведінки різних фракцій пилу.

### 1.3 Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розробка науково обґрунтованого підходу до математичного моделювання коефіцієнта пилопоглинання  $PM_{2,5}$  у повітряному середовищі приміщень з урахуванням комплексного впливу температури, відносної вологості та поточної масової концентрації пилу як базових параметрів предиктивного керування якістю внутрішнього повітря.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- систематизувати теоретичні положення щодо формування, седиментації та вторинної ресуспензії дрібнодисперсного пилу  $PM_{2,5}$  у повітряному середовищі виробничих приміщень;
- сформуувати репрезентативний масив експериментальних даних і встановити аналітичну залежність масової концентрації  $PM_{2,5}$  від відносної вологості повітря;
- синтезувати регресійну модель сукупного впливу температури, відносної вологості та початкової концентрації  $PM_{2,5}$  на коефіцієнт пилопоглинання;
- виконати статистичну ідентифікацію та перевірку адекватності моделі;
- інтерпретувати поверхні відгуку й ізолінії, локалізувати області стабілізації та сухої деструкції

пилової хмари, а також обґрунтувати умови інтегрування одержаної моделі в алгоритми предиктивного керування Smart HVAC.

## 2. Матеріали і методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес формування пилопоглинальної здатності повітряного середовища виробничого приміщення дрібнодисперсної фракції  $PM_{2,5}$  за сукупної дії температури, відносної вологості та початкової масової концентрації пилу. Предмет дослідження становлять кількісні закономірності впливу зазначених факторів і їхніх взаємодій на інтегральний коефіцієнт пилопоглинання  $k_{ds}$ , який характеризує результуюче вилучення частинок із повітряної фази внаслідок гігроскопічного росту, коагуляції, адгезійного закріплення та седиментації з урахуванням протилежного процесу вторинної ресуспензії.

Наукова проблема полягає у відсутності компактної, статистично обґрунтованої та фізично інтерпретованої моделі, придатної для прогнозування зміни пилопоглинальної здатності внутрішнього повітря за одночасної дії кількох мікрокліматичних факторів. Контроль лише поточної концентрації  $PM_{2,5}$  має реактивний характер і не дає змоги завчасно виявляти режими, за яких послаблюється природне осадження та зростає ймовірність повторного зависання осілого пилу. Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що  $k_{ds}$  є нелінійною функцією  $T$ ,  $\varphi$  і  $C$ , причому вологісний фактор має домінуючий стабілізуювальний вплив, температура модифікує цей вплив через конвективні та випаровувальні процеси, а зростання концентрації обмежує відносну ефективність самоочищення повітряного об'єму.

Дослідження виконано як теоретико-розрахункове узагальнення лабораторних даних. Матеріалом слугував масив із 21 значення масової концентрації  $PM_{2,5}$  у діапазоні відносної вологості 10–90 % із кроком 4 %, сформований на основі результатів досліджень в ізолюванні аеродисперсійній симуляційній камері [14] та доповнений даними про варіативність ресуспензії за умови механічного збурення [8, 9]. Такий діапазон обрано для охоплення як сухих режимів, потенційно сприятливих для повторного зависання, так і режимів підвищеної вологості, за яких посилюються капілярне зв'язування та седиментація. Рівномірне розміщення реперних точок забезпечує порівнювану інформаційну щільність у всій області вологості і надає змогу ідентифікувати кривину однофакторної залежності.

У дослідженні прийнято такі припущення та спрощення: повітряне середовище у межах розрахункового об'єму вважається квазіоднорідним за температурою, вологістю та концентрацією; домінантною контрольованою фракцією є  $PM_{2,5}$ ; упродовж окремого вимірювального інтервалу мінералогічний склад, густина та форма частинок не змінюються; швидкість повітря, кратність вентиляції, шорсткість поверхонь й активність працівників не вводяться як окремі фактори, а їхній усереднений

вплив частково відображається у варіації  $k_{ds}$ ; фазові перетворення води без утворення макроскопічного конденсату не моделюються; взаємодія факторів у дослідженій області може бути адекватно апроксимована поліномом другого порядку. Ці припущення забезпечують ідентифікованість моделі за наявного обсягу даних, але одночасно визначають межі її подальшого застосування.

Для незалежного відтворення експериментальної частини необхідні герметизована камера з контрольованим повітрообміном; генератор або дозатор тестового пилу; оптичний аналізатор масової концентрації  $PM_{2.5}$  із можливістю реєстрації часових рядів; референтний гравіметричний канал для періодичної перевірки оптичного сигналу; калібрований термогігрометр; система керованого зволоження й осушення; пристрій відтворюваного механічного збурення поверхневої пилової фази та реєстратор даних. Застосування одночасного оптичного та референтного вимірювання є необхідним через залежність світлорозсіювання від гігроскопічного росту частинок [16, 17]. У цьому дослідженні конкретні марки приладів не задавалися, оскільки математичний етап ґрунтувався на узагальненому масиві опублікованих лабораторних даних; критеріями вибору обладнання для подальшої натурної валідації мають бути метрологічна простежуваність, достатня часова роздільна здатність і відома невизначеність у заданому діапазоні зміни вологості.

На першому етапі оцінювали однофакторну залежність  $C(\varphi) = a \cdot \exp(b\varphi)$ . Параметри  $a$  і  $b$  визначали нелінійним методом найменших квадратів, а якість апроксимації – за коефіцієнтом детермінації  $R^2$  й аналізом відповідності знака параметра  $b$  фізичному механізму вологості депресії аерозольної фази. Експоненційну форму обрано тому, що вона відтворює інтенсивне зменшення концентрації на початковій ділянці зі зниженням граничного приросту ефекту за високої вологості, тобто відповідає очікуваному насиченню механізмів гігроскопічного росту та капілярної адгезії.

На другому етапі застосовано трифакторне рототабельне планування другого порядку. Незалежними факторами прийнято  $T$ ,  $\varphi$  і  $C$ , функцією відгуку –  $k_{ds}$ . Фактори кодували відносно центральних рівнів, після чого оцінювали вільний член, лінійні та квадратичні ефекти, а також парні взаємодії. Вибір рототабельного плану обґрунтований необхідністю отримати приблизно однакову дисперсію прогнозу для точок, рівновіддалених від центра факторного простору, і водночас ідентифікувати нелінійність без проведення повного багаторівневого перебору всіх комбінацій. Поліном другого порядку обрано як оптимальний між фізичною інтерпретованістю, кількістю оцінюваних параметрів і здатністю відтворити кривину поверхні відгуку.

Статистичну значущість коефіцієнтів оцінювали за двобічним критерієм Стюдента при рівні значущості  $\alpha=0,05$ ; незначущі члени послідовно вилучали зі збереженням ієрархічної та фізичної узгодженості моделі. Адекватність

скороченого рівняння перевіряли за критерієм Фішера, описову здатність – за  $R^2$ , а відносний внесок факторів – за стандартизованою картою Парето. Для фізичної інтерпретації будували двовимірні поверхні відгуку й ізолінії при фіксації третього фактора на центральному рівні. Така сукупність методів обрана тому, що поєднує формальну статистичну перевірку з візуальним визначенням областей екстремуму, стабілізації та сухої деградації.

Обчислення коефіцієнтів регресії, стандартизованих ефектів, критеріїв значущості, поверхонь відгуку й ізоліній виконували у програмному середовищі STATGRAPHICS 18. Табличну підготовку та контроль повноти масиву здійснювали засобами електронних таблиць. Вибір STATGRAPHICS 18 обумовлений наявністю реалізованих процедур планування експерименту, регресійного та дисперсійного аналізу, а також узгодженого формування карти Парето та графічних поверхонь за однією моделлю. Критерієм прийнятності результату вважали одночасне виконання статистичних умов адекватності та фізичної несуперечності встановлених ефектів.

### 3. Результати розробки і дослідження методу керування обчислювальними ресурсами туманного шару

Послідовність подання результатів відповідає етапам перевірки гіпотези: спочатку встановлено часткову залежність концентрації  $PM_{2.5}$  від відносної вологості, далі ідентифіковано трифакторне рівняння  $k_{ds}$ , після чого визначено статистичну ієрархію ефектів і параметричні області характерних режимів пилопоглинання.

Для побудови регресійної моделі та визначення аналітичної залежності масової концентрації пилу від відносної вологості повітря використано результати лабораторних досліджень [14]. Зазначені експерименти проводилися в ізолюванні аеродисперсійній симуляційній камері з реєстрацією кінетики вторинного зважування частинок. З метою підвищення репрезентативності даних і врахування варіативності аерозольного фону, вихідний масив точок було доповнено результатами вимірювань із суміжних джерел, зокрема щодо динаміки ресуспензії пилу за умов механічного збурення середовища [8, 9]. Сформована вибірка із 21 реперної точки (табл. 1) враховує природну дисперсію фракції  $PM_{2.5}$  і похибки вимірювальних приладів. На основі цих даних встановлено залежність масової концентрації пилу від відносної вологості повітря у приміщенні (рис. 1).

Застосовуючи нелінійний метод найменших квадратів до розширеного масиву із 21 експериментальних точок, синтезовано базове математичне рівняння першого етапу:

$$C(\varphi) = 0,8491e^{-0,014\varphi}, \quad (1)$$

де  $C$  – масова концентрація дрібнодисперсного пилу фракції  $PM_{2.5}$ , мг/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – відносна вологість внутрішнього повітряного середовища, %; 0,8491 –

асимптотичний коефіцієнт, який характеризує гранично можливу масову концентрацію сухого зваженого пилу при  $H$  наближається до 0 %; -0,014 – коефіцієнт депресії пилоутворення, який безпосередньо відображає інтенсивність капілярного зв'язування та седиментації для зазначеної дисперсної системи.

Таблиця 1 – Експериментальні значення масової концентрації пилу  $PM_{2,5}$  залежно від відносної вологості

| № точки | Відносна вологість повітря $\varphi$ , % | Фактична масова концентрація $C_{факт}$ , мг/м <sup>3</sup> |
|---------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1       | 10                                       | 0,675                                                       |
| 2       | 14                                       | 0,692                                                       |
| 3       | 18                                       | 0,621                                                       |
| 4       | 22                                       | 0,645                                                       |
| 5       | 26                                       | 0,602                                                       |
| 6       | 30                                       | 0,541                                                       |
| 7       | 34                                       | 0,558                                                       |
| 8       | 38                                       | 0,492                                                       |
| 9       | 42                                       | 0,515                                                       |
| 10      | 46                                       | 0,452                                                       |
| 11      | 50                                       | 0,468                                                       |
| 12      | 54                                       | 0,412                                                       |
| 13      | 58                                       | 0,425                                                       |
| 14      | 62                                       | 0,381                                                       |
| 15      | 66                                       | 0,362                                                       |
| 16      | 70                                       | 0,371                                                       |
| 17      | 74                                       | 0,332                                                       |
| 18      | 78                                       | 0,280                                                       |
| 19      | 82                                       | 0,218                                                       |
| 20      | 86                                       | 0,152                                                       |
| 21      | 90                                       | 0,113                                                       |

Коефіцієнт детермінації отриманої моделі становить  $R^2=0,911$ , що згідно зі шкалою Чеддока свідчить про функціональний, надзвичайно високий рівень адекватності та зв'язку між параметрами.

На основі проведених досліджень та встановленого взаємозв'язку температури та відносної вологості [6] для визначення коефіцієнта пилопоглинання  $PM_{2,5}$  запропоновано застосування методу планування експерименту, який дозволяє варіювати одночасно всі фактори, отримувати кількісні оцінки основних ефектів й ефектів парних взаємодій, визначати параметр пилопоглинання  $PM_{2,5}$  за відомими залежностями шуканого показника окремо для кожного з факторів.

Застосування методів планування експерименту порівняно із традиційними методами дають змогу підвищити ефективність наукових досліджень у 2–10 разів. При цьому результати моделювання можуть бути використані при практичній реалізації у системах керування рівнем пилопоглинання  $PM_{2,5}$  у робочій зоні виробничих приміщень.

В основу побудови моделі покладені визначений діапазон температури, відносної вологості та концентрації пилу  $PM_{2,5}$ , зазначені у нормативних документах.

Трифакторна модель пилопоглинання  $PM_{2,5}$  для врахування мікрокліматичних параметрів і концентрації пилу та результатів їх взаємодії має вигляд:

$$k_{ds} = b_0 + b_1T + b_2\varphi + b_3C + b_{12}T\varphi + b_{23}\varphi C + b_{31}CT + b_{11}T^2 + b_{22}\varphi^2 + b_{33}C^2 + b_{123}T\varphi C, \quad (2)$$

де  $T$  – температура, °C;  $\varphi$  – відносна вологість, %;  $C$  – концентрації пилу  $PM_{2,5}$ , мг/м<sup>3</sup>;  $b$  – коефіцієнти регресійної моделі.

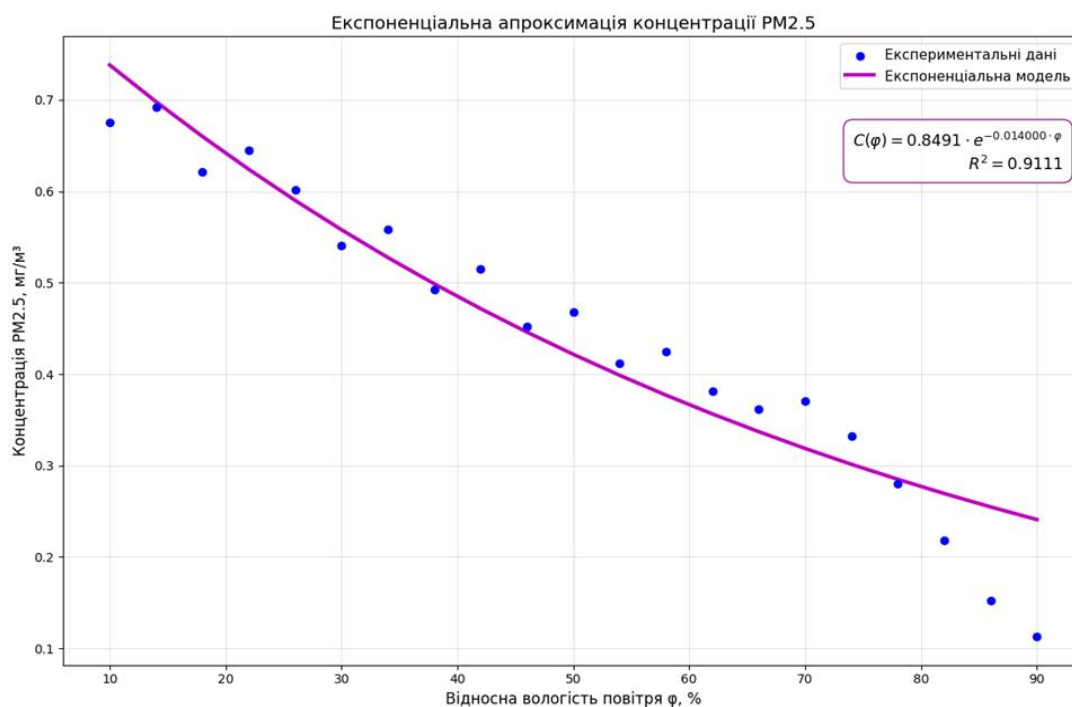


Рис. 1. Залежність концентрації пилу  $PM_{2,5}$  від відносної вологості у приміщенні

Прийняті області варіювання параметрів при проведенні експерименту наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Области варіювання параметрів при проведенні експерименту

| Фактори                                          | Позначення | Область досліду |
|--------------------------------------------------|------------|-----------------|
| Температура, °C                                  | $T$        | 12–30           |
| Відносна вологість повітря, %                    | $\varphi$  | 10–90           |
| Концентрації пилу $PM_{2,5}$ , мг/м <sup>3</sup> | $C$        | 0,15–0,85       |

Математична обробка отриманих даних дозволила встановити спільний вплив температури, вологості та концентрації пилу повітря у приміщенні на коефіцієнт пилопоглинання. Як спосіб отримання поліноміальної моделі застосовано трифакторне рототабельне планування другого порядку. Функцією відгуку є коефіцієнт пилопоглинання. Фактори у кодованому вигляді й інтервали їх варіювання наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Матриця планування експерименту

| $T$ , в.о. | $\varphi$ , в.о. | $C$ , в.о. | $T$ , °C | $\varphi$ , % | $C$ , мг/м <sup>3</sup> | $K$ , в.о. |
|------------|------------------|------------|----------|---------------|-------------------------|------------|
| -1         | -1               | -1         | 14       | 30            | 0,25                    | 0,42       |
| +1         | -1               | -1         | 22       | 30            | 0,25                    | 0,35       |
| -1         | +1               | -1         | 14       | 70            | 0,25                    | 0,68       |
| +1         | +1               | -1         | 22       | 70            | 0,25                    | 0,59       |
| -1         | -1               | +1         | 14       | 30            | 0,75                    | 0,14       |
| +1         | -1               | +1         | 22       | 30            | 0,75                    | 0,08       |
| -1         | +1               | +1         | 14       | 70            | 0,75                    | 0,51       |
| +1         | +1               | +1         | 22       | 70            | 0,75                    | 0,44       |
| -1,682     | 0                | 0          | 12       | 50            | 0,50                    | 0,56       |
| +1,682     | 0                | 0          | 30       | 50            | 0,50                    | 0,38       |
| 0          | -1,682           | 0          | 18       | 10            | 0,50                    | 0,12       |
| 0          | +1,682           | 0          | 18       | 90            | 0,50                    | 0,64       |
| 0          | 0                | -1,682     | 18       | 50            | 0,15                    | 0,73       |
| 0          | 0                | +1,682     | 18       | 50            | 0,85                    | 0,18       |
| 0          | 0                | 0          | 18       | 50            | 0,50                    | 0,49       |

При обробці результатів розрахунків експерименту шляхом виключення статистично незначущих ефектів за критерієм Стюдента було отримано рівняння регресії другого порядку, адекватність якого підтверджена за критерієм Фішера.

Остаточно регресійна модель залежності коефіцієнта пилопоглинання дрібнодисперсної фракції  $PM_{2,5}$  у кодованих значеннях має вигляд:

$$k_{ds} = 0,49 - 0,045T + 0,145\varphi - 0,152C - 0,022T^2 - 0,038\varphi^2 - 0,015C^2 + 0,012T\varphi - 0,025\varphi C, \quad (3)$$

де  $T$  – температура повітря в приміщенні, °C;  $\varphi$  – відносна вологість повітря, %;  $C$  – масова концентрація пилу  $PM_{2,5}$  мг/м<sup>3</sup>.

Перевірка статистичної значущості параметрів здійснювалася за допомогою стандартизованої

Парето-карти. Адекватність моделі перевірена за коефіцієнтом детермінації  $R^2=0,942$  що свідчить про високу якісну характеристику зв'язку коефіцієнтів системи та можливість її використання для предиктивного керування автоматизованими комплексами підтримки комфортних умов праці.

Для визначення ступеня та характеру впливу досліджуваних чинників на цільову функцію відгуку (коефіцієнт пилопоглинання  $k_{ds}$ ) у програмному комплексі «STATGRAPHICS Plus» було виконано процедуру стандартизації ефектів. Оцінка статистичної значущості лінійних, квадратичних і парних взаємодій отриманого поліноміального рівняння регресії здійснювалася за допомогою стандартизованої карти Парето (критерій Стюдента, рівень значущості  $\alpha=0,05$ ).

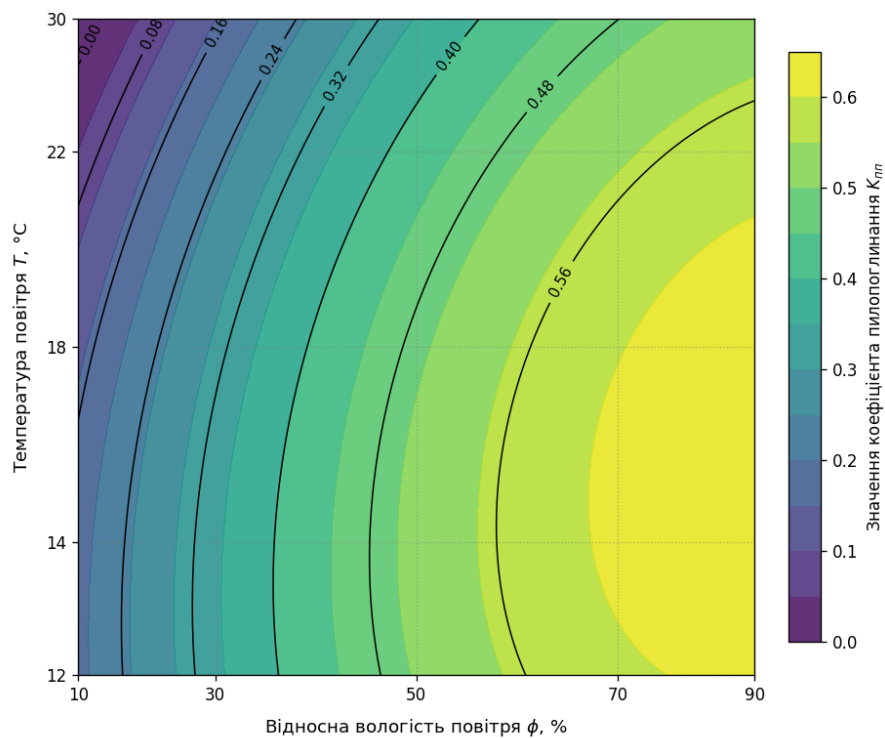
Аналіз отриманого розподілу свідчить, що домінуючий внесок у формування величини коефіцієнта пилопоглинання має відносна вологість повітря, яка має додатне значення стандартизованого ефекту. Це підтверджує раніше висунуту гіпотезу про те, що інтенсифікація процесів вологої седиментації та мінімізація вторинного зависання пилу за рахунок запобігання сухій деструкції мікрозв'язків відіграють ключову роль у дезактивації пилової хмари фракції  $PM_{2,5}$ .

Другим за значущістю фактором є вхідна масова концентрація пилу, яка має негативний знак ефекту, що свідчить про поступове насичення ємності самоочищення повітряного об'єму при критичних рівнях запилення. Температурний чинник і квадратичний ефект вологості ( $\varphi^2$ ) також визнані статистично значущими, оскільки їх абсолютні значення перевищують критичну межу Стюдента ( $t_{крит}=2,57$ ), тоді як ефекти потрібної взаємодії ( $T\cdot\varphi\cdot C$ ) та квадратичний ефект концентрації ( $C^2$ ) виявилися нижчими за поріг значущості та були виключені при оптимізації моделі.

Для детального вивчення взаємного впливу термодинамічних параметрів і концентрації на пилопоглинальне кумулятивне поле зафіксовано один із факторів на базовому (нульовому) рівні та побудовано двовимірні поверхні відгуку та їхні ізолінії (лінії рівного рівня).

На рис. 2 представлена поверхня відгуку та лінії рівня залежності коефіцієнта пилопоглинання  $k_{ds}$  від температури та відносної вологості повітря при фіксованій середній концентрації пилу  $PM_{2,5}$  ( $C=0,50$  мг/м<sup>3</sup>).

Аналіз геометричного профілю поверхні (рис. 2) показує чітко виражений нелінійний екстремальний характер взаємодії. Максимальна ефективність утримання й осадження дрібнодисперсного аерозолі ( $k_{ds}\geq 0,60$ ) досягається у зоні низьких температур (12–16 °C) та високої відносної вологості ( $\varphi=75$ –90 %). Фізично це пояснюється зниженням кінетичної енергії термічної конвекції повітряних мас й одночасним досягненням максимальної стабільності водних мікрозв'язків між частинками пилу та поверхнею підлоги.

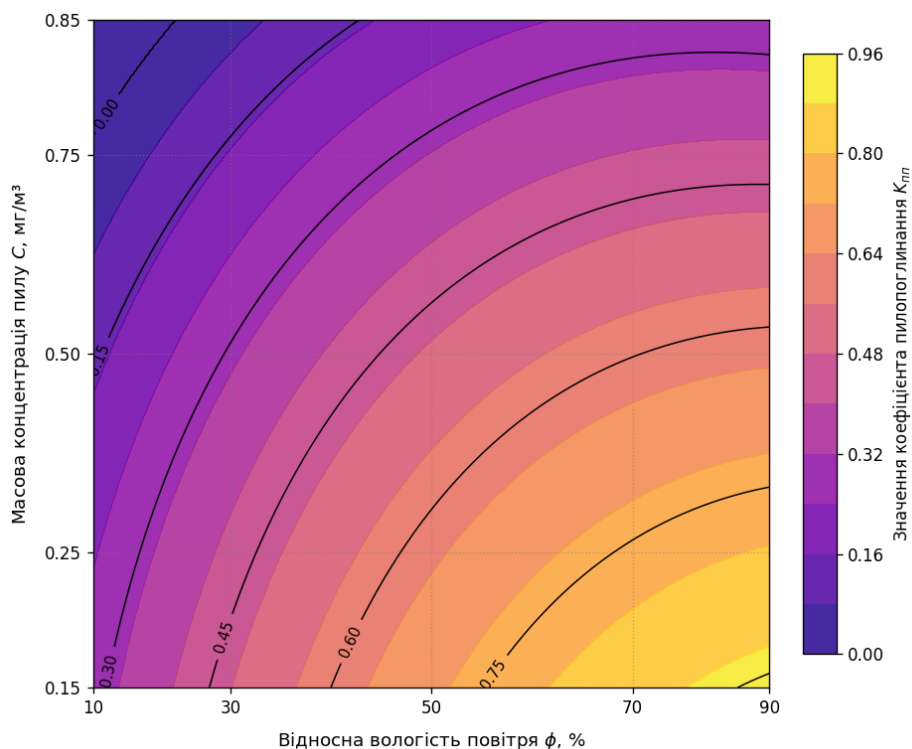


**Рис. 2.** Залежності температури та відносної вологості повітря при фіксованій середній концентрації пилу  $PM_{2.5}$  ( $C=0.50$   $mg/m^3$ )

Зі зростанням температури понад  $24^\circ C$  та зниженням вологості нижче  $30\%$  спостерігається стрімке падіння коефіцієнта пилопоглинання до критичного мінімуму ( $k_{ds} \leq 0.15$ ). Зазначена область характеризується як зона сухої деструкції, де повне випаровування води призводить до руйнування капілярних сил адгезії, внаслідок чого зважений пил

$PM_{2.5}$  під дією слабких механічних збурень (конвективних потоків або руху персоналу) інтенсивно ресуспендується (зависає), практично не піддаючись природному осадженню.

На рис. 3 наведено ізолінії взаємодії відносної вологості та концентрації пилу при нормативній базовій температурі середовища ( $T=18^\circ C$ ).



**Рис. 3.** Залежності відносної вологості та концентрації пилу при нормативній базовій температурі середовища ( $T=18^\circ C$ )

Характер ізоліній на рис. 3 підтверджує, що навіть за умов високого первинного запилення робочої зони ( $C \geq 0,70$  мг/м<sup>3</sup>), штучне підвищення відносної вологості повітря до рівня 65–80 % дозволяє утримувати коефіцієнт пилопоглинання на стабільно високому рівні ( $k_{ds}=0,45–0,50$ ). Це свідчить про високу компенсаторну здатність вологісного фактора та вказує на доцільність інтеграції отриманої поліноміальної моделі в алгоритми предиктивного автоматизованого керування аспіраційними та зволожувальними інженерними системами промислових приміщень.

Отже, сукупність результатів підтвердила нелінійність функції відгуку та переважання вологісного фактора. Модель відокремлює область підвищеної стабілізації пилової фази від області сухої деструкції та забезпечує кількісну основу для подальшої інтерпретації механізмів, оцінювання практичної придатності та визначення обмежень застосування.

#### 4. Обговорення результатів дослідження синтезу трифакторної регресійної моделі пилопоглинання у повітряному середовищі виробничих приміщень

Отримані результати підтверджують основну гіпотезу дослідження: коефіцієнт пилопоглинання є нелінійною функцією спільного впливу температури, відносної вологості та початкової концентрації РМ<sub>2,5</sub>. Значення  $R^2=0,942$  свідчить, що у межах прийнятого факторного простору модель пояснює переважну частину варіації  $k_{ds}$ . Принципово важливо, що статистично значущі коефіцієнти мають фізично несуперечливі знаки й інтерпретацію. Це надає підстави розглядати рівняння не лише як формальну апроксимацію, а як спрощене інженерне представлення динамічного балансу між гігроскопічним ростом, коагуляцією, адгезійним закріпленням, седиментацією та ресуспензією частинок.

Встановлене експоненційне зменшення  $C$  зі зростанням  $\varphi$  ( $R^2=0,911$ ) узгоджується з результатами [10], які показали залежність ресуспензії від вологості та властивостей системи «частинка–поверхня», а також із дослідженням [11], де вологість впливала на осадження та коагуляцію аерозольних частинок. Дані [12] і огляд [13] додатково підтверджують, що швидкість осадження істотно залежить від поверхні та пристінного повітряного потоку. На відміну від зазначених праць, у яких окремі механізми аналізуються переважно автономно, запропонована модель інтегрує їхній результуючий прояв у показнику  $k_{ds}$  і пов'язує його із трьома керованими параметрами.

Переважаючий вплив відносної вологості пояснюється її одночасним впливом на кілька ланок аерозольної динаміки. Адсорбція водяної пари збільшує ефективний діаметр і масу гігроскопічних частинок, що підвищує швидкість гравітаційного осадження. Формування капілярних містків збільшує силу зчеплення з поверхнею та зменшує ймовірність повторного відриву. Водночас значущість

квадратичного члена  $\varphi^2$  свідчить про насичення цього ефекту: після певного рівня подальше зволоження забезпечує менший приріст  $k_{ds}$ . Саме нелінійність пояснює перевагу поліноміальної моделі другого порядку над лінійною та дозволяє визначати не просто напрям зміни, а й область раціонального керування.

Температурний ефект формується через зміну в'язкості повітря, інтенсивності природної конвекції, швидкості випаровування адсорбованої вологи та стійкості капілярних зв'язків. За помірно низьких температур послаблюється конвективне перемішування та зберігається волога у контактній зоні, що сприяє осадженню та фіксації частинок. Підвищення температури прискорює висушування поверхневої пилової фази та створює умови для відриву частинок. Тому температура не є ізольованим монотонним регулятором: її вплив реалізується через взаємодію з вологістю та станом поверхневих відкладень, що підтверджується кривою одержаної поверхні відгуку.

Негативний ефект початкової концентрації інтерпретується як прояв обмеженої асиміляційної ємності повітряного об'єму та поверхонь осадження. Зі збільшенням пилового навантаження зростає абсолютна кількість частинок, що залишається у зваженому стані, а накопичений на підлозі й обладнанні пил утворює вторинне джерело. Дослідження [5, 8, 9] показали, що ходіння й інша механічна активність можуть істотно збільшувати внутрішню концентрацію частинок. Це пояснює, чому  $k_{ds}$  не може вважатися сталою властивістю пилу: він є характеристикою конкретної системи «аерозоль–повітря–поверхня–режим збурення».

Локалізація області  $T=12–16$  °C і  $\varphi=75–90$  % як зони максимального  $k_{ds}$  має фізичний зміст, оскільки відповідає поєднанню зниженої термічної конвекції, гігроскопічного укрупнення та стабілізації капілярних контактів. Протилежна область  $T \geq 24$  °C і  $\varphi \leq 30$  %, визначена як зона сухої деструкції, характеризується послабленням адгезійних сил і підвищенням імовірності ресуспензії. Виявлення цієї зони є ключовим результатом: воно перетворює якісне уявлення про небезпеку сухого мікроклімату на кількісну межу, яку можна використати як попереджувальний індикатор у системі керування.

Запропоноване рішення вирішує проблему реактивного контролю завдяки переходу від реєстрації вже сформованого перевищення РМ<sub>2,5</sub> до прогнозування зміни пилопоглинальної здатності. Це забезпечується трьома властивостями моделі: використанням синхронізованого вектора стану ( $T, \varphi, C$ ), урахуванням нелінійних і парних ефектів і виділенням області сухої деструкції. Завдяки цьому керовальна система може реагувати не лише на фактичну концентрацію, а й на наближення мікроклімату до режиму, в якому природне вилучення частинок слабшає, а ризик вторинного зависання зростає.

Основною сферою застосування результатів є автоматизовані системи Smart HVAC, локальна аспірація, кероване зволоження, виробничий

моніторинг IAQ та ризик-орієнтоване управління охороною праці. На вході алгоритму мають використовуватися синхронізовані вимірювання  $PM_{2,5}$ ,  $T$  і  $\varphi$ ; на виході – прогноз  $k_{ds}$  і сигнал про наближення до несприятливої області. Керувальні дії можуть включати зміну продуктивності аспірації, кратності загальнообмінної вентиляції, інтенсивності локального зволоження та режиму безпилового прибирання. Потенційно очікуваними ефектами є зменшення амплітуди та тривалості піків  $PM_{2,5}$ , скорочення часово зваженої інгалаційної експозиції працівників, раціональніше використання вентиляційного обладнання та зниження ймовірності формування вторинних пилових хмар.

Умовою практичного застосування є попередня локальна ідентифікація моделі для конкретного типу пилу, технологічного процесу, вентиляційної схеми та поверхонь приміщення. Інтервал  $\varphi=75\text{--}90\%$ , у якому розраховано максимальні значення  $k_{ds}$ , не варто безпосередньо трактувати як рекомендований режим постійної експлуатації. Надмірна вологість може спричинити конденсацію, корозію, деградацію матеріалів і погіршення теплового комфорту. Практично доцільно визначати мінімально достатній рівень  $\varphi$ , який забезпечує необхідне зниження  $PM_{2,5}$  за обмежень щодо точки роси, санітарних норм, енергоспоживання та технічного стану обладнання.

Важливою умовою є також метрологічна коректність вхідних даних. Гігроскопічний ріст змінює інтенсивність світлорозсіювання, тому оптичний сенсор може реєструвати зміну сигналу навіть без пропорційної зміни сухої маси пилу. Дослідження [16, 18] й огляд [17] підтверджують необхідність калібрування, введення температурно-вологісних поправок і контролю дрейфу. Отже, безперервний оптичний канал доцільно періодично звіряти з референтним методом, а невизначеність  $C$ ,  $T$  і  $\varphi$  враховувати під час формування прогностичного інтервалу  $k_{ds}$ .

Перевагами запропонованого підходу є фізична інтерпретованість факторів, можливість оперативного обчислення та безпосередня придатність до алгоритмізації. Рототабельний план забезпечує оцінювання кривини та взаємодій за меншої кількості комбінацій, ніж повний багаторівневий експеримент. Порівняно із суто емпіричним пороговим керуванням модель формує причинно обґрунтовану прогностичну ознаку. Порівняно з тривимірним CFD-моделюванням вона потребує значно менше обчислювальних ресурсів і може працювати у реальному часі, хоча не відтворює просторову неоднорідність повітряного потоку.

До обмежень проведеного дослідження належать невеликий обсяг вихідного масиву, використання узагальнених вторинних лабораторних даних, відсутність незалежної зовнішньої вибірки та явних предикторів повітрообміну, швидкості потоку, шорсткості поверхні, хімічного складу пилу й активності працівників. Припущення про квазі-однорідність не дозволяє описати локальні зони біля джерел, припливних струменів або робочих місць. Значення  $R^2$  характеризує відповідність у межах

навчального масиву, але саме по собі не може гарантувати прогностичної точності поза дослідженими діапазонами. Недоліком є також можливе змішування реальної зміни сухої концентрації з вологісною чутливістю оптичного вимірювання.

Подальший розвиток дослідження має передбачати натурну валідацію на незалежних виробничих об'єктах; повторні серії у центральних точках плану; стратифікацію за складом і дисперсністю пилу; введення швидкості повітря, кратності вентиляції, поверхневого пилового навантаження й інтенсивності руху працівників як додаткових факторів; оцінювання розширеної невизначеності; аналіз залишків на нормальність, гомоскедастичність і автокореляцію; перехресну перевірку та порівняння з моделлю «grey-box», узагальненими адитивними та CFD-моделями [19, 20]. Завершальним етапом доцільно зробити замкнений виробничий експеримент, у якому керування вентиляцією та зволоженням здійснюється за прогностичним  $k_{ds}$ , а ефективність оцінюється за зменшенням експозиції  $PM_{2,5}$  та стабільністю нормативних параметрів мікроклімату.

## 5. Висновки

У представленому дослідженні виконано теоретико-експериментальне узагальнення та математичне моделювання спільних термодинамічних і седиментаційних процесів у повітряному середовищі приміщень. Отримані результати дозволили сформулювати такі основні висновки:

1. Математично обґрунтовано та вперше синтезовано цілісну трифакторну регресійну модель другого порядку, яка комплексно описує нелінійну залежність інтегрального коефіцієнта пилопоглинання дрібнодисперсної фракції  $PM_{2,5}$  від сумісного впливу базових термодинамічних параметрів мікроклімату (температури і відносної вологості) та запилення повітряного середовища промислових приміщень. Високе значення коефіцієнта детермінації моделі ( $R^2=0,942$ ) підтверджує її статистичну адекватність за критерієм Фішера та гарантує високу точність предиктивного аналізу кумулятивних властивостей повітряного об'єму.

2. Експериментально виявлено та графічно інтерпретовано істотно екстремальний характер взаємодії досліджуваних чинників, що дозволило чітко розмежувати просторові зони стабілізації та деструкції пилової хмари. Шляхом топографічного аналізу двовимірних ізоліній відгуку локалізовано область максимальної ефективності природного осадження аерозолі ( $k_{ds}\geq 0,60$ ) в інтервалі температур ( $12\text{--}16\text{ }^\circ\text{C}$ ) та високої відносної вологості ( $\varphi=75\text{--}90\%$ ), а також математично доведено існування «зони сухої деструкції» ( $T\geq 24\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi\leq 30\%$ ), де нівелювання капілярних сил адгезії через дефіцит вологи призводить до інтенсивного вторинного ресуспендування (зависання) частинок  $PM_{2,5}$  під дією конвективних потоків.

3. Доведено високу компенсаторну здатність вологісного чинника, яка дозволяє нівелювати

негативний вплив критичного первинного запилення робочої зони ( $C \geq 0,70$  мг/м<sup>3</sup>) і стабілізувати коефіцієнт пилопоглинання на рівні 0,45–0,50 за рахунок штучного локального збільшення відносної вологості повітря до 65–80%. Одержана закономірність разом із розробленою математичною моделлю становить алгоритмічний базис для побудови предиктивних систем автоматизованого керування комплексами промислової аспірації та зволоження повітря, забезпечуючи досягнення нормативної якості внутрішнього повітря (IAQ).

#### Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі

фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

#### Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

#### Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

#### Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Spengler, J.D., McCarthy, J.F. and Samet, J.M. (2000), *Indoor Air Quality Handbook*, 1st ed., McGraw-Hill, 1488 p., available at: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780074455494>
2. Петренко І. С., Ченчева О. О., Лашко Є. Є., Чеберячко Ю. І., Чеберячко С. І., Білоусова К. П. Дослідження впливу пилового навантаження та оцінка ризику на здоров'я працівників. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2024. Т. 40, № 1–2. С. 112–120. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.40-1-2.2024.52-56>
3. (2018), *Housing and health guidelines*. World Health Organization. Retrieved July 14, 2026, available at: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/be014865-921a-482c-89e4-9191c7476e13/content>
4. Ченчева О. О., Бурдейна Н. Б., Лашко Є. Є., Шевченко В. Г., Петренко І. С. Вплив пилоутворення при механічному обробленні карбон-карбонових композитів на ризик виникнення професійних захворювань. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2022. Т. 38, № 3–4. С. 25–33. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.38-3-4.2022.25-33>
5. Ferro, A. R., Kopperud, R. J., and Hildemann, L. M. (2004), "Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter", *Environmental Science & Technology*, vol. 38, no. 6, pp. 1759–1764, doi: <https://doi.org/10.1021/es0263893>
6. Запорожець О. І., Сукач С. В., Галаган О. Г., Козловська Т. Ф. Визначення параметрів оптимальної комфортності у робочій зоні приміщення за показниками повітряного середовища. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2017. № 102. С. 17–21, URL: [https://visnikkrmu.kdu.edu.ua/statti/2017\\_1\\_17-21\\_1-2017.pdf](https://visnikkrmu.kdu.edu.ua/statti/2017_1_17-21_1-2017.pdf)
7. Nazaroff, W. W. (2004), "Indoor particle dynamics", *Indoor Air*, vol. 14, pp. 175–183, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00286.x>
8. Tian, Y., Sul, K., Qian, J., Mondal, S., and Ferro, A. R. (2014), "A comparative study of walking-induced dust resuspension using a consistent test mechanism", *Indoor air*, vol. 24, pp. 592–603, doi: <https://doi.org/10.1111/ina.12107>
9. Rosati, J. A., Thornburg, J., and Rodes, C. (2008), "Resuspension of particulate matter from carpet due to human activity", *Aerosol Science and Technology*, vol. 42, pp. 472–482, doi: <https://doi.org/10.1080/02786820802187069>
10. Kim, Y., Wellum, G., Mello, K., Strawhecker, K. E., Thoms, R., Giaya, A., and Wysloulzil, B. E. (2016), "Effects of relative humidity and particle and surface properties on particle resuspension rates", *Aerosol Science and Technology*, vol. 50, pp. 339–352, doi: <https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1152350>
11. Wang, Y., Chen, L., Chen, R., Tian, G., Li, D., Chen, C., Ge, X., and Ge, G. (2017), "Effect of relative humidity on the deposition and coagulation of aerosolized SiO<sub>2</sub> nanoparticles", *Atmospheric Research*, vol. 194, pp. 100–108, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.030>
12. El Hamdani, S., Limam, K., Abadie, M. O., and Bendou, A. (2008), "Deposition of fine particles on building internal surfaces", *Atmospheric Environment*, vol. 42, pp. 8893–8901, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.005>
13. Costa, D., Malet, J., and Gehin, E. (2022), "Dry aerosol particle deposition on indoor surfaces: Review of direct measurement techniques", *Aerosol Science and Technology*, vol. 56, pp. 261–280, doi: <https://doi.org/10.1080/02786826.2021.2013431>
14. Kim, M., and Park, J. (2024), "Study on size distribution and characteristics of particulate matter suspension in indoor space depending on relative humidity", *Particle And Aerosol Research*, vol. 20, no. 2, pp. 25–33, doi: <https://doi.org/10.11629/jpaar.2024.20.2.025>
15. Duarte, R. M. B. O., Gomes, J. F. P., Querol, X., Cattaneo, A., Bergmans, B., Saraga, D., Maggos, T., Di Gilio, A., Villanueva, F., and Mihucz, V. G. (2022), "Particulate matter indoors: A strategy to sample and monitor size-selective fractions", *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 57, pp. 675–704, doi: <https://doi.org/10.1080/05704928.2022.2088554>
16. Bousiotis, D., Alconcel, L.-N. S., Beddows, D. C. S., Harrison, R. M., and Pope, F. D. (2023), "Monitoring and apportioning sources of indoor air quality using low-cost particulate matter sensors", *Environment International*, vol. 174, 107907, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107907>
17. Lowther, S. D., Jones, K. C., Wang, X., Whyatt, J. D., Wild, O., and Booker, D. (2019), "Particulate matter measurement indoors: A review of metrics, sensors, needs, and applications", *Environmental Science & Technology*, vol. 53, pp. 11644–11656, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03425>
18. Lunderberg, D. M., Liang, Y., Singer, B. C., Apte, J. S., Nazaroff, W. W., and Goldstein, A. H. (2023), "Assessing residential PM<sub>2.5</sub> concentrations and infiltration factors with high spatiotemporal resolution using crowdsourced sensors", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 120, no. 50, e2308832120, doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2308832120>

19. González-Martín, J., Kraakman, N. J. R., Pérez, C., Lebrero, R., and Muñoz, R. (2021), "A state-of-the-art review on indoor air pollution and strategies for indoor air pollution control", *Chemosphere*, vol. 262, 128376, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128376>
20. Zhang, L., Ou, C., Magana-Arachchi, D., Vithanage, M., Vanka, K. S., Palanisami, T., Masakorala, K., Wijesekara, H., Yan, Y., Bolan, N., and Kirkham, M. B. (2021), "Indoor particulate matter in urban households: Sources, pathways, characteristics, health effects, and exposure mitigation", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 21, 11055, doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph182111055>

Received (Надійшла) 29.06.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.09.2026

Publication date (Дата публікації) 25.09.2026

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Сукач Сергій Володимирович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна;  
**Serhii Sukach** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Civil and Labour Safety, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine;  
 e-mail: [sergvs69@ukr.net](mailto:sergvs69@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-6834-0197>;  
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202153691>.

**Лашко Євгеній Євгенович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна;  
**Yevhenii Lashko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Civil and Labour Safety, Geodesy and Land Management, Kremenchuk M. Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine;  
 e-mail: [evgeny.lashko.lj@gmail.com](mailto:evgeny.lashko.lj@gmail.com); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0001-9691-4648>;  
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203623830>.

**Ченчева Ольга Олександрівна** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна;  
**Olha Chencheva** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Civil and Labour Safety, Geodesy and Land Management, Kremenchuk M. Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine;  
 e-mail: [chenchevaolga@gmail.com](mailto:chenchevaolga@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-5691-7884>;  
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203619235>.

**Резнік Дмитро Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна;  
**Dmytro Rieznik** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Civil and Labour Safety, Geodesy and Land Management, Kremenchuk M. Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine;  
 e-mail: [2411dimarezniak@gmail.com](mailto:2411dimarezniak@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-1258-6136>;  
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58493079400>.

**Петренко Іван Сергійович** – доктор філософії, асистент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна;  
**Ivan Petrenko** – Ph.D., Assistant of Department of Civil and Labour Safety, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine;  
 e-mail: [ivanpetrenko95@outlook.com](mailto:ivanpetrenko95@outlook.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-9846-3737>;  
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58096873600>.

**Synthesis of a three-factor regression model of dust suppression in the air environment of industrial premises**

Serhii Sukach, Yevhenii Lashko, Olha Chencheva, Dmytro Rieznik, Ivan Petrenko

**Abstract. Background.** Ensuring the regulatory quality of air in industrial premises is an important condition for industrial, technogenic, and occupational safety, since fine dust can remain suspended for a long time, become resuspended from surfaces, and form an increased inhalation load on workers. **Subject of the study:** the processes of dust suppression, sedimentation, and resuspension of fine particles in the indoor air environment under variable microclimate parameters. **Objective:** to develop a scientifically substantiated three-factor regression model of the dust suppression coefficient, taking into account temperature, relative humidity, and mass concentration of dust for predictive control of indoor air quality. **Research tasks.** To systematize the physical mechanisms of fine-particle deposition and resuspension; establish the analytical relationship between PM<sub>2.5</sub> concentration and relative humidity; synthesize and statistically validate a second-order polynomial model; identify dust-cloud stabilization and dry-destruction regions; and substantiate practical model applications. **Methods.** Theoretical analysis, synthesis of experimental data, nonlinear least squares, three-factor rotatable second-order design, regression and analysis of variance, Student's t-test for coefficients, Fisher's F-test for model adequacy, and response-surface and contour analysis. **Results.** The paper summarizes modern concepts regarding the influence of humidity, temperature, particle adhesion, hygroscopic growth, and human mechanical activity on the formation of aerosol load. Based on an experimental dataset, an exponential dependence of concentration on relative air humidity was constructed, and a second-order polynomial three-factor model for the dust suppression coefficient was synthesized. According to the results of mathematical modeling, the dominant role of relative humidity was established, the zones of dust cloud stabilization and the zone of dry destruction were determined, in which the intensity of secondary particle suspension increases. **Conclusions.** The proposed model, with a coefficient of determination of 94 %, can be used as an algorithmic basis for Smart HVAC, aspiration, and humidification systems in industrial premises, as well as for assessing the risks of fine dust exposure to personnel.

**Keywords:** indoor air quality; dust suppression; resuspension; relative humidity; temperature; microclimate; regression model; Smart HVAC.