

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 502.3:613.648.4

Т. І. РУСАКОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпровський національний університет імені О. Гончара, вул. Казакова, 18, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, ел. пошта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

МЕТОД ПРОГНОЗУ ПАРАМЕТРІВ АЕРОІОННОГО РЕЖИМУ В РОБОЧИХ ЗОНАХ НА ВІДКРИТІЙ МІСЦЕВОСТІ

Мета. Наукова робота має на меті розробку нового методу прогнозу аероіонного режиму в робочих зонах на промислових майданчиках із урахуванням іонізуючих джерел і навколишніх перешкод. **Методика.** Для знаходження концентрації позитивних аероіонів, пилу й негативних аероіонів використано 3D-рівняння масопереносу, що враховує швидкість рекомбінації іонів, які мають різну полярність, і швидкість рекомбінації іонів із частинками пилу. Чисельне розв'язання ґрунтується на інтегруванні рівнянь масопереносу за допомогою кінцево-різницевого методу, що виявляється стійким для будь-якого кроку за часом. Для визначення компонентів вектора швидкості повітряного потоку використано тривимірну модель потенційної течії, де моделювальним рівнянням виступає рівняння Лапласа для потенціалу швидкості. **Результати.** Розроблено математичний метод чисельного розрахунку концентрації позитивних, негативних аероіонів і пилу. Особливістю методу є можливість прогнозу аероіонного режиму з урахуванням практично всіх фізичних факторів, що суттєво впливають на формування концентраційних полів аероіонів у робочих зонах на промислових майданчиках. Метод не прив'язаний до конкретного промислового майданчика, що дозволяє оцінити значення концентрації аероіонів як локально, так і в усій розрахунковій зоні. **Наукова новизна.** Розроблено метод прогнозу аероіонного режиму в робочих зонах, який базується на тривимірному моделюванні розповсюдження негативних, позитивних аероіонів і пилу під дією вітру й дифузії, що дозволяє отримувати результати в кожній точці простору або в конкретному поперечному перерізі. **Практична значимість.** Запропонований метод прогнозу було використано для розв'язання задачі з оцінки аероіонного режиму в робочих зонах на відкритій місцевості промислового майданчика Дніпровського олійно-екстракційного заводу за наявності джерел емісії: позитивних аероіонів під час роботи автотранспорту й дихання працівників; пилу під час руху працівників та автотранспорту; негативних аероіонів іонізатора, встановленого в робочій зоні. Виявлено закономірності зміни концентрації аероіонів різної полярності й пилу на висоті 1,7 м, що відповідає розташуванню органів дихання працівників. Кількісні результати є необхідними для оцінки допустимих умов праці на робочих місцях промислових майданчиків підприємств і під час створення нових робочих місць і реінжинірингу наявних.

Ключові слова: іонізація повітря; джерела емісії іонів; чисельний метод; промисловий майданчик; концентрація аероіонів

Вступ

Забезпечення іонізації повітряного середовища в робочій зоні є одним із найважливіших чинників підтримання доброго самопочуття й високої працездатності персоналу. Установлено, що значне зниження вмісту заряджених частинок (іонів) у повітрі впливає на появу в праців-

ників підвищеної хворобливості, скарг на втому, депресію, нудоту, безсоння, дратівливість, респіраторні порушення й ін. У той же час перебування людей в умовах із помірно підвищеною іонізацією атмосфери, за переважання кількості негативних іонів, навпаки, має сприятливий вплив на організм. Процес іонізації повітря полягає в перетворенні нейтральних атомів і моле-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

кул повітряного середовища в електрично заряджені частинки (іони). Іони в повітрі (аероіони) можуть утворюватися внаслідок природної і штучної іонізації.

Природна іонізація відбувається в результаті впливу на повітряне середовище космічної й сонячної радіації та іонізувального випромінювання (частинок), що виникають під час розпаду довгоіснуючих радіонуклідів земної кори (калій–40, уран–238, торій–232 й ін.). Природна іонізація повітряного середовища відбувається повсюдно й постійна в часі. Штучна іонізація виникає під дією іонізувальних факторів, які супроводжують деякі технологічні процеси (рентгенівські й ультрафіолетові випромінювання, термометія, фотоефект тощо), а також у наслідок дії спеціальних пристроїв – іонізаторів. Ступінь іонізації повітря залежить від співвідношення процесів іонізації й деіонізації. Остання обумовлена рекомбінацією двох іонів різних полярностей, адсорбцією легких іонів на незаряджених ядрах, конденсацією, нейтралізацією легких і важких іонів зарядами протилежного знаку й ін.

Оцінку ступеня іонізації середовища здійснюють порівнянням вимірних значень із нормативними величинами. Для нормалізації іонного режиму повітряного середовища широко застосовують штучні іонізатори (високовольтні, індукційні, радіаційні та ін.) й ефективну, правильно організовану вентиляцію приміщень, оскільки зовнішнє чисте повітря містить у 2–5 разів більше іонів, ніж повітря закритих приміщень (50–100 іонів/см³).

Багато робіт вітчизняних авторів присвячено дослідженню аероіонного режиму. Моделювання аероіонного режиму в робочих зонах за умов штучної іонізації наведено в роботі [1]. Проблема оцінки й взаємозв'язку аерозольного забруднення й аероіонного складу повітря в робочій зоні розглянута в роботах [8–9]. Моделюванню аероіонного режиму в приміщеннях у разі штучної іонізації з використанням засобів чисельного моделювання присвячені роботи [2, 11]. Запропонована програмно-інформаційна система оптимізації мікроклімату в приміщеннях [6]. Виконано дослідження шляхів удосконалення аероіонного режиму робочого середовища [7]. Розглянуто вплив

мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад повітря робочих приміщень і проведено прогнозування динаміки аероіонного складу повітря в роботах [4–5]. Методи визначення концентрації аероіонів і вмісту пилу подано в роботі [3]. Нормалізація аероіонного складу повітря в офісних приміщеннях розглянута в роботі [15]. Велика кількість закордонних робіт присвячена дослідженню процесів іонізації для поліпшення самопочуття людини [12–14, 16].

Мета

Метою цього дослідження є розробка нового методу прогнозу аероіонного режиму в робочих зонах на промислових майданчиках з урахуванням іонізувальних джерел та навколишніх перешкод (споруд).

Методика

Відомо, що на формування концентраційного поля аероіонів впливає комплекс фізичних факторів: потік повітря, дифузія, вплив електричного поля та ін. Крім цього, відбувається як взаємодія іонів різної полярності, так і взаємодія іонів із частинками пилу. Для врахування цих процесів під час моделювання розсіювання аероіонів використовують 3D-рівняння масопереносу, яке записують для кожної компоненти (позитивних аероіонів, пилу, негативних аероіонів). Моделювальні рівняння мають вигляд:

– для описання процесу розсіювання позитивних іонів:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{\partial u A_p}{\partial x} + \frac{\partial v A_p}{\partial y} + \frac{\partial w A_p}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial A_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial A_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial A_p}{\partial z} \right) - \\ - \alpha A_p A_n - \beta A_p A_d + \\ + \sum_{p_i=1}^n Q_{p_i}(t) \delta(x - x_{p_i}) \delta(y - y_{p_i}) \delta(z - z_{p_i}); \quad (1) \end{aligned}$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– для моделювання перенесення пилу:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial u A_d}{\partial x} + \frac{\partial v A_d}{\partial y} + \frac{\partial w A_d}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial A_d}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial A_d}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial A_d}{\partial z} \right) + \\ + \sum_{d_i=1}^n Q_{d_i}(t) \delta(x-x_{d_i}) \delta(y-y_{d_i}) \delta(z-z_{d_i}); \quad (2) \end{aligned}$$

– для описання процесу розсіювання негативних іонів:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_n}{\partial t} + \frac{\partial (u + bE) A_n}{\partial x} + \frac{\partial (v + bE) A_n}{\partial y} + \\ + \frac{\partial (w + bE) A_n}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial A_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial A_n}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial A_n}{\partial z} \right) - \alpha A_n A_p - \beta A_n A_d + \\ + \sum_{n_i=1}^n Q_{n_i}(t) \delta(x-x_{n_i}) \delta(y-y_{n_i}) \delta(z-z_{n_i}). \quad (3) \end{aligned}$$

Позначення фізичних параметрів у цих рівняннях наступні:

A_p , A_n , A_d – концентрація позитивних, негативних аероіонів і частинок пилу відповідно; u , v , w – компоненти вектора швидкості руху повітряного потоку; μ_x , μ_y , μ_z – коефіцієнти дифузії; t – час; α – швидкість рекомбінації іонів, що мають різну полярність; β – швидкість рекомбінації іонів із частинками пилу; $Q_{A_{p_i}}(t)$ – інтенсивність емісії позитивних іонів у відповідних точках із координатами x_{n_i} , y_{n_i} , z_{n_i} ; $\delta(x-x_{n_i})\delta(y-y_{n_i})\delta(z-z_{n_i})$ – дельта-функція Дірака; b – коефіцієнт мобільності іонів; E – напруженість електричного поля.

На межі входження повітряного потоку в розрахункову зону ставимо початкову умову:

$$A_p \Big|_{\text{вх}} = A_{p_0}, \quad (4)$$

де A_{p_0} – початкове значення концентрації аероіонів.

На межі виходу повітряного потоку з розрахункової зони ставимо «м'яку» граничну умову: $\frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} = 0$, де \vec{n} – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої поверхні.

Для чисельної реалізації такої граничної умови запишемо:

$$A_p(i+1, j) = A_p(i, j), \quad (5)$$

де $A_p(i+1, j)$ – значення іонів в останній граничній комірці; $A_p(i, j)$ – значення іонів у передостанній різницевій комірці.

На поверхні землі та на всіх твердих поверхнях ставимо граничну умову непротікання:

$$\frac{\partial A_p}{\partial \vec{n}} = 0. \quad (6)$$

Ця умова фізично означає, що потік іонів на цих границях дорівнює нулю.

Під час використання моделювальних рівнянь (1) – (3) компоненти швидкості $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$ повинні задовольняти рівнянню неперервності:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

Для виконання такої умови потрібно розв'язати аеродинамічну задачу з визначення поля швидкості. Для визначення компонентів вектора швидкості повітряного потоку використовуємо тривимірну модель потенційної течії, у якій моделювальним рівнянням виступає рівняння Лапласа для потенціалу швидкості:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (8)$$

де P – потенціал швидкості.

Компоненти вектора швидкості повітряного середовища пов'язані з потенціалом швидкості наступними співвідношеннями:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (9)$$

Для рівняння Лапласа ставимо наступні граничні умови:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

– на твердих межах ставимо умову непротікання $\frac{\partial P}{\partial \vec{n}} = 0$;

– на межі виходу потоку з розрахункової зони ставимо граничну умову Діріхле $P = const$;

– на межі входження повітряного потоку в розрахункову зону ставимо граничну умову $\frac{\partial P}{\partial \vec{n}} = V$, де V – відома швидкість втікання.

Під час моделювання процесу розповсюдження аероіонів необхідно враховувати вплив електричного поля на цей процес. Оскільки аероіони мають заряд, то вони генерують електричне поле E . Для моделювання електричного поля використовуємо наступне рівняння [2, 12]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{q_e}{\epsilon_0}, \quad (10)$$

де ϵ_0 – діелектрична проникність; q_e – об'ємна щільність заряду.

Від рівняння (10) можна перейти до скалярного потенціалу, якщо врахувати таку залежність:

$$E_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z}. \quad (11)$$

Тоді отримаємо рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{q_e}{\epsilon_0}, \quad (12)$$

де $q_e = -e \cdot A_p(x, y, z)$, $A_p(x, y, z)$ – концентрація позитивних аероіонів; ϕ – скалярний потенціал; e – елементарний заряд. На базі цього рівняння здійснюємо моделювання електричного поля.

Як граничну використовуємо умову електричної ізоляції:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} = 0,$$

де \vec{n} – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої поверхні.

Для чисельного інтегрування рівнянь масопереносу використовуємо різницеву схему, що базується на геометричному й фізичному розщепленні моделювальних рівнянь (1) – (3). На кож-

ному з чотирьох дробових кроків враховуємо лише один напрямок переносу збурень, на п'ятому кроці розщеплення враховуємо зміну величини концентрації аероіонів за рахунок дії джерела емісії. Розрахунок виконуємо на прямокутній різницевої сітці. Концентрацію величин A_p , A_n , A_d визначаємо в центрах різницевих комірок, тоді як компоненти вектора швидкості повітряного середовища задаємо на межах різницевих комірок [2, 11–12].

Результати

Для оцінки аероіонного режиму в робочих зонах на базі розробленого методу необхідно задавати інтенсивність емісії аероіонів від конкретних джерел. Як уже було зазначено, одним із таких джерел є сам працівник, який видихає позитивні аероіони. Для отримання науково обґрунтованої інформації щодо величини такої емісії проведено фізичний експеримент.

До експерименту було залучено 4 групи людей різного віку по 16 чоловік у кожній. Вихідні дані вимірювань: площа рота $S = 9,5 \text{ см}^2$; швидкість повітряного потоку під час видихання складала в середньому $V = 0,4 \text{ м/с}$; витрата $Q = V \cdot S \cdot \rho \text{ м}^3/\text{с}$; інтенсивність емісії позитивних аероіонів під час видихання $I = V \cdot S \cdot C$ іонів/с, де C – концентрація позитивних аероіонів під час видихання. Результати вимірювання середньої концентрації позитивних аероіонів під час видихання людини для кожної вікової групи наведено в табл. 1.

Експеримент із вимірювання концентрації аероіонів під час видихання людини проведений за допомогою приладу КТ-401 AIRION TESTER.

Таблиця 1

Значення концентрації позитивних аероіонів під час видихання людини

Вік людини, роки	Концентрація позитивних аероіонів, іонів/см ³
8–9	166–176
18–19	232–349
40	277–329
78	210–256

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Дані, отримані внаслідок проведеного фізичного експерименту, використані для проведення обчислювальних експериментів. Під час їх проведення враховано, що джерело емісії позитивних аероіонів у разі видихання людини було періодичної дії: видихання впродовж 1 с в кількості Q , потім вдихання (емісія відсутня) і через 2 с знову видихання з тією ж емісією. Тобто джерело емісії періодичної дії $Q(t)$ відоме.

Було проведено верифікацію розробленого методу прогнозу, для цього розв'язано тестову задачу з розрахунку викиду позитивних аероіонів із вихлопними газами автотранспорту.

Під час проведення фізичного експерименту здійснено вимірювання концентрації позитивних аероіонів на різній відстані від вихідного отвору вихлопної труби автомобіля «Daewoo Matiz» за допомогою приладу KT-401 AIRION TESTER. Швидкість вітру й газового потоку на виході з вихлопної труби виміряно за допомогою анемометра PM 6252 B Digital Anemometer. Швидкість вітрового потоку складала $V_{\text{в}} = 1,2\text{--}1,4$ м/с, а швидкість газового потоку $V_{\text{г}} = 1,7\text{--}1,9$ м/с (від автомобіля), діаметр отвору вихлопної труби $d = 32$ мм.

Методика проведення експерименту полягала в наступному: на висоті 320 мм від поверхні землі на різній відстані від отвору вихлопної труби виміряно концентрацію позитивних аероіонів. Для отримання даних про інтенсивність емісії проведено розрахунок за співвідношенням $Q = V_{\text{г}} \cdot S \cdot C$, де $V_{\text{г}}$ – швидкість газового потоку у вихідному перерізі вихлопної труби, S – площа вихідного перерізу отвору вихлопної труби, C – концентрація позитивних аероіонів у вихідному перерізі. Безпосередньо під час проведення експерименту параметри $V_{\text{г}}$ та C виміряно на відстані 0,5 см від вихідного перерізу отвору вихлопної труби. Отримані дані були використані як вхідна інформація для чисельного розрахунку на базі розробленого методу. За його допомогою також були розраховані значення концентрації домішок у тих точках, у яких проведені вимірювання. У табл. 2 наведено результати експериментальних вимірювань і проведеного чисельного розрахунку за допомогою розробленого методу.

Аналіз даних показує адекватність методу чисельного розрахунку. Відповідне відхилення пояснюється турбулізацією потоку, що викликано впливом корпусу автомобіля на аеродинаміку течії.

Таблиця 2

Концентрація позитивних аероіонів на різних відстанях від джерела емісії

Відстань від вихлопної труби автомобіля, см	Концентрація позитивних аероіонів, іонів/см ³ (експеримент)	Концентрація аероіонів, іонів/см ³ (розрахунок)
5	1 400–1 443	1 425
10	1 080–1 097	1 092
20	650–738	721
30	420–546	465
40	143–158	152
50	67–76	72
60	43–57	52
70	12–19	10

Джерелом емісії позитивних аероіонів на вулиці виступають у першу чергу люди, автомобілі. Під час проведення розрахунків було враховано комплекс чинників, які раніше в наукових публікаціях не брали до уваги: емісія аероіонів від автомобілів; емісія аероіонів від людей; вплив різних перешкод на вулиці; вплив нерівномірного поля швидкості вітру; вплив нерівномірного поля атмосферної дифузії; моделювання розсіювання аероіонів у тривимірній постановці (3D-моделювання).

Врахування перелічених факторів вкрай ускладнює вирішення задач даного класу.

Рішення задачі ґрунтується на трьох етапах:

1. Моделювання утворення поля концентрації позитивних, негативних аероіонів та пилу під дією вітру і атмосферної дифузії.

2. Моделювання переносу аероіонів під дією електричного поля.

3. Зміна поля концентрації аероіонів, пилу внаслідок їх взаємодії.

Розроблений метод прогнозу було використано для розв'язання задачі по оцінці рівня забруднення робочих зон на відкритій місцевості при наявності джерела емісії: позитивних аероіонів – викиди автотранспорту та людини; пилу –

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

рух автотранспорту; джерела негативних аероіонів – іонізатора, встановленого в робочій зоні, та екрана (паркана), що змінює аеродинаміку руху аероіонів і пилу.

За об'єкт дослідження було обрано Дніпровський олійноекстракційний завод, а саме територію з вантажними терезами (рис. 1), куди заїжджають вантажні автомобілі з насінням. Ця територія є джерелом пилу, позитивних аероіонів, а працівники, які відповідають за розвантаження автомобілів, постійно перебувають під впливом цих негативних факторів.



Рис. 1. Вид моделювальної зони (Google Earth Image, 2019) Дніпровський олійноекстракційний завод:
1 – вантажні терези

Схема розрахункової зони представлена на рис. 2.

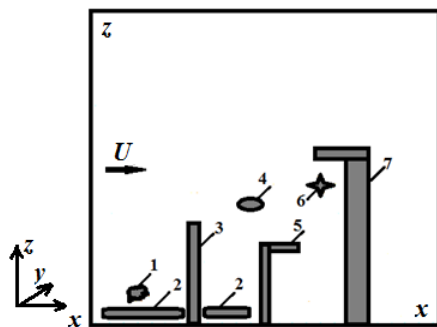


Рис. 2. Схема розрахункової зони:
1 – джерело емісії (автомобіль); 2 – джерело емісії (пил);
3 – екран; 4 – джерело позитивних аероіонів; 5 – робоча зона працівника; 6 – джерело негативних аероіонів (іонізатор); 7 – тимчасова споруда

Нижче наведено результати обчислювального експерименту з розрахунку поля концентрації позитивних, негативних аероіонів і пилу в робочій зоні промислового майданчика (рис. 3, 5, 7). Швидкість повітряного потоку задана 5 м/с, розміри розрахункової зони скла-

дали 8x4 м, інтенсивність джерел емісії аероіонів – 1 000 іонів/см³. На рис. 4, 6, 8 представлено відсотковий розподіл концентрації негативних, позитивних аероіонів і пилу в робочій зоні на висоті 1,7 м.

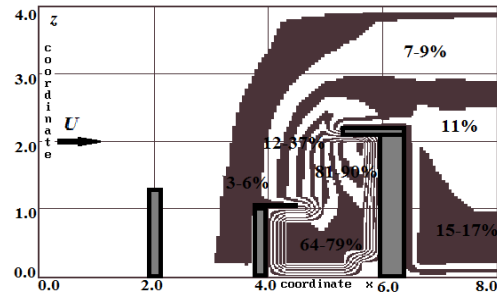


Рис. 3. Розподіл концентрації негативних аероіонів, перетин $y=4$ м

Із рис. 3 видно, що на відстані 3 м від початку розрахункової зони спостерігається відсутність негативних аероіонів, оскільки на цій ділянці немає джерела їх емісії, а на іншій ділянці видно складну картину розподілу, що викликана рухом повітряного потоку й дією атмосферної дифузії.

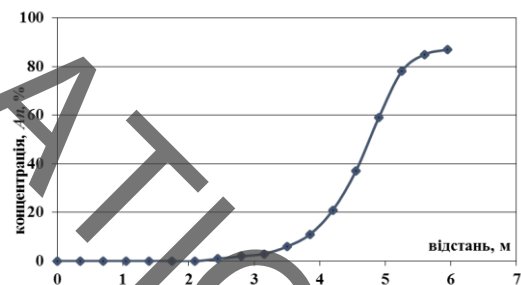


Рис. 4. Розподіл концентрації негативних аероіонів на висоті $H=1,7$ м, перетин $y=4$ м

Значення концентрації на висоті $H=1,7$ м повільно зростає під дією джерела емісії й дифузії (рис. 4).

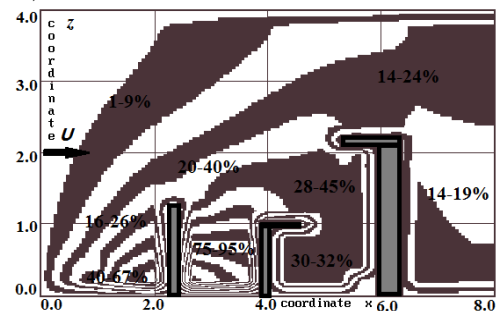


Рис. 5. Розподіл концентрації пилу, перетин $y=4$ м

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

На рис. 5 спостерігаємо, що вся досліджувана зона заповнена пилом, що пов'язано з його інтенсивним виділенням на двох ділянках: до екрана – емісія пилу від автомобілів; від екрана до розташування терезів – робоча зона працівників. Пил, який піднімає вітровий потік, і потрапляє в робочу зону працівників відкритого майданчика. Гранично допустима концентрація пилу становить $ГДК_{с.д.} = 0,15 \text{ мг/м}^3$, тому концентрація пилу в цій зоні перевищує $ГДК_{с.д.}$ на 20 %.

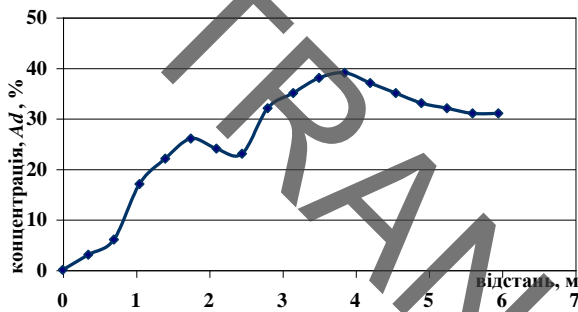


Рис. 6. Розподіл концентрації пилу на висоті $H = 1,7 \text{ м}$, перетин $y=4 \text{ м}$

Значення концентрації пилу на висоті $H = 1,7 \text{ м}$ повільно зростає під дією джерела емісії (автотранспорту), потім за рахунок дії екрана гальмується і на незначній відстані спадає, але під дією джерела емісії (працівників) знову зростає й за рахунок зміни напрямку потоку біля піддашка тимчасової споруди й за рахунок дифузії зменшується (рис. 6).

На рис. 7 представлено розподіл позитивних аероіонів.

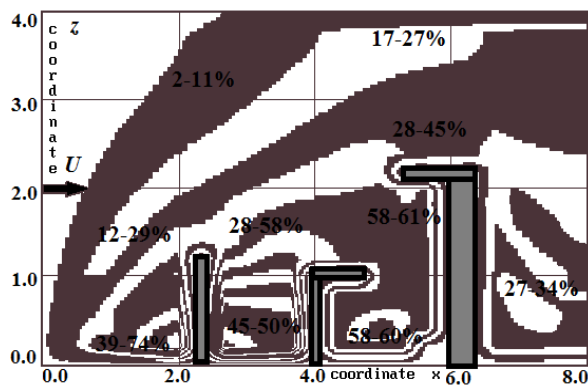


Рис. 7. Розподіл концентрації позитивних аероіонів, перетин $y=4 \text{ м}$

Як видно, у робочій зоні спостерігається динаміка росту позитивних аероіонів, що обумовлено перенесенням вітровим потоком позитивних аероіонів від автотранспорту (джерело емісії – автомобілі) та емісією позитивних аероіонів від людей, які перебувають у робочій зоні, тобто має місце взаємовплив джерел емісій аероіонів.

Як і значення концентрації пилу, концентрація позитивних аероіонів на висоті $H = 1,7 \text{ м}$ повільно зростає під дією джерела емісії позитивних аероіонів (автотранспорту), потім за рахунок дії гальмується екраном і на незначній відстані спадає, але під дією джерела емісії (працівників) знову зростає і від зміни напрямку потоку біля піддашка тимчасової споруди й за рахунок дифузії зменшується (рис. 8).

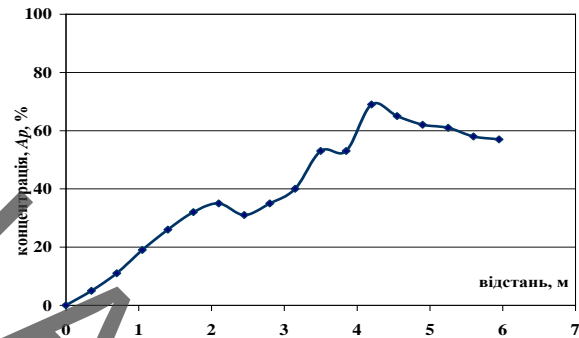


Рис. 8. Розподіл концентрації позитивних аероіонів на висоті $H = 1,7 \text{ м}$, перетин $y=4 \text{ м}$

Оптимальний рівень позитивних аероіонів складає $1\,500\text{--}3\,000 \text{ іонів/см}^3$, максимально допустимий рівень – $50\,000 \text{ іонів/см}^3$, у робочій зоні спостерігається перевищення допустимого рівня на 10 %.

Наукова новизна і практична значимість

1. Розроблено метод прогнозу аероіонного режиму в робочих зонах, який базується на тривимірному моделюванні розповсюдження негативних, позитивних іероіонів і пилу під дією вітру й дифузії.

2. Особливістю запропонованого методу є можливість прогнозу аероіонного режиму з урахуванням практично всіх фізичних факторів, що суттєво впливають на формування концентраційних полів аероіонів у робочих зонах на промислових майданчиках.

3. Запропонований метод прогнозу було використано для розв'язання задачі з оцінки аероіонного режиму в робочих зонах на відкритій місцевості промислового майданчика за наявності джерел емісії: позитивних аероіонів – викиди автотранспорту й видихуване повітря людей; пилу – рух працівників та автотранспорту; джерела негативних аероіонів – іонізатора, встановленого в робочій зоні, й екрана, що змінює аеродинаміку руху аероіонів і пилу.

4. Установлено закономірності зміни концентрації аероіонів і пилу на висоті 1,7 м, що відповідає розташуванню органів дихання працівників.

5. Розроблений математичний метод прогнозу можна застосовувати для оцінювання концентрації аероіонів різної полярності й пилу.

6. Метод реалізовано у вигляді прикладної програми для розрахунку аероіонного режиму в робочих зонах на відкритій місцевості промислових майданчиків.

Висновки

У результаті проведених досліджень отримано наступні результати:

– запропоновано математичний метод чисельного розрахунку концентрації позитивних, негативних аероіонів і пилу;

– метод не прив'язаний до конкретного промислового майданчика і дозволяє оцінити значення концентрації аероіонів як локально, так і в усій розрахунковій зоні;

– фізичний експеримент показує адекватність методу чисельного розрахунку;

– результати розрахунків корисні для забезпечення допустимих умов праці на робочих місцях промислових майданчиків, під час створення нових робочих місць і реінжинірингу наявних.

Перспективою розвитку цього напрямку є вдосконалення створеного методу для оцінки параметрів самопочуття працівників на відкритій місцевості промислових майданчиків за встановленого аероіонного режиму.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беликов, А. С. Некоторые аспекты оптимизации исследования условий труда по микроклимату в промышленной индустрии / А. С. Беликов, С. Ю. Рагимов, В. Д. Акиншин // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування : зб. наук. пр. / ДВНЗ «Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури». – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 52, ч. 2. – С. 3–9.
2. Беляев, Н. Н. Моделирование аэроионного режима в рабочих зонах в условиях искусственной ионизации воздуха / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 39–47. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2016/60947>
3. Водяник, А. О. Методи визначення концентрацій аероіонів та вмісту пилу у повітрі виробничих приміщень // А. О. Водяник, Т. В. Віднічук // Містобудування та територіальне планування : наук.-тех. зб. – Київ, 2013. – Вип. 50. – С. 77–81.
4. Глива, В. А. Дослідження впливу мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад повітря робочих приміщень / В. А. Глива // Проблеми охорони праці в Україні : зб. наук. пр. – Київ, 2011. – Вип. 20. – С. 58–65.
5. Запорожець, О. І. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях / О. І. Запорожець, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісник Національного авіаційного університету. – 2011. – Т. 47, № 2. – С. 120–124. doi: <http://dx.doi.org/10.18372/2306-1472.47.24>
6. Строкань, О. В. Програмно-інформаційна система оптимізації мікроклімату у виробничому приміщенні / О. В. Строкань // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків, 2014. – № 48 (1090). – С. 91–96.
7. Толкунов, І. О. Дослідження шляхів удосконалення аероіонного режиму робочого середовища приміщень спеціального призначення / І. О. Толкунов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 1 (18). – С. 197–201.
8. Черный, К. А. Методологический подход к применению коронных аэроионизаторов при проведении коррекции аэроионного состава воздуха помещений / К. А. Черный // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 6 (32). – С. 48–53.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

9. Черный, К. А. Современное представление о природе аэроионов и их классификация / К. А. Черный // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 7 (127). – С. 15–20.
10. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
11. Biliaiev, M. M. Complex of numerical models for computation of air ion concentration in premises / M. M. Biliaiev, S. G. Tsygankova // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 16–24. doi: <http://dx.doi.org/10.15802/stp2016/67281>
12. Efficiency of ionizers in removing airborne particles in indoor environments / B. Pushpawela, R. Jayaratne, A. Nguy, L. Morawska // Journal of Electrostatics. – 2017. – Vol. 90. – P. 79–84. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2017.10.002>
13. Low-resistance dual-purpose air filter releasing negative ions and effectively capturing PM2.5 / X. Zhao, Y. Li, T. Hua, P. Jiang, X. Yin, J. Yu, B. Ding // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 13. – P. 12054–12063. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.7b00351>
14. Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow / P. Zhou, Y. Yang, C. Huang, A. C. K. Lai // Building and Environment. – 2018. – Vol. 127. – P. 204–210. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.006>
15. Sidorov, A. V. (2014). The technique of small air ions concentration measurement at the PC operator working place / A. V. Sidorov // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 1. – С. 36–41.
16. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach / A. Jurelionis, L. Gagytė, T. Prasauskas [et al.] // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 86. – P. 305–313. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.014>

Т. И. РУСАКОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Дніпровський національний університет імені О. Гончара, ул. Казакова, 18, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, ел. пошта rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

МЕТОД ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В РАБОЧИХ ЗОНАХ НА ОТКРЫТОЙ МЕСТНОСТИ

Цель. Научная работа посвящена разработке нового метода прогноза аэроионного режима в рабочих зонах на промышленных площадках с учетом ионизирующих источников и окружающих препятствий.

Методика. Для нахождения концентрации положительных аэроионов, пыли и отрицательных аэроионов использованы 3D-уравнения массопереноса, учитывающие скорость рекомбинации ионов, имеющих разную полярность, и скорость рекомбинации ионов с частицами пыли. Численное решение основывается на интегрировании уравнений массопереноса с помощью конечно-разностного метода, который оказывается устойчивым для любого шага по времени. Для определения компонент вектора скорости воздушного потока использована трехмерная модель потенциального течения, где моделирующим уравнением выступает уравнение Лапласа для потенциала скорости. **Результаты.** Разработан математический метод численного расчета концентрации положительных, отрицательных аэроионов и пыли. Особенностью метода является возможность прогноза аэроионного режима с учетом практически всех физических факторов, существенно влияющих на формирование концентрационных полей аэроионов в рабочих зонах на промышленных площадках. Метод не привязан к конкретной промышленной площадке, что позволяет оценить значение концентрации аэроионов как локально, так и во всей расчетной области. **Научная новизна.** Разработан метод прогноза аэроионного режима в рабочих зонах, основанный на трехмерном моделировании распространения отрицательных, положительных аэроионов и пыли под действием ветра и диффузии, что позволяет получать результаты в каждой точке пространства или в конкретном поперечном сечении. **Практическая значимость.** Предложенный метод прогноза был использован для решения задачи по оценке аэроионного режима в рабочих зонах на открытой местности промышленной площадки Дніпровського маслоэкстракционного завода при наличии источников эмиссии: положительных аэроионов во время работы автотранспорта и дыхания работников; пыли во время движения работников и автотранспорта; отрицательных аэроионов ионизатора, установленного в рабочей зоне. Выявлены закономерности изменения концентрации аэроионов различной полярности и пыли на высоте 1,7 м, что соответствует расположению органов дыхания работников. Количественные результаты необходимы при оценке допустимых

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: <https://doi.org/10.15802/stp2019/170273>

© Т. И. Русакова, 2019

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

условий труда на рабочих местах промышленных площадок предприятий и при создании новых рабочих мест и реинжиниринге существующих.

Ключевые слова: ионизация воздуха; источники эмиссии ионов; численный метод; промышленная площадка; концентрация аэроионов

T. I. RUSAKOVA^{1*}

^{1*}Dep. «Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Kazakov St., 18, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 82 05, e-mail rusakovati1977@gmail.com, OCID 0000-0001-5526-3578

METHOD FOR PREDICTING PARAMETERS OF THE AEROIONAL REGIME IN OPEN TERRAIN GROUND AREAS

Purpose. The scientific work is devoted to the development of a new method for forecasting aerionic regime in working areas at industrial sites, taking into account ionizing sources and surrounding obstacles. **Methodology.** To find the concentration of positive aeroions, dust and negative aeroions, we use 3D mass transfer equations that take into account the rate of recombination of ions having different polarity and the rate of recombination of ions with dust particles. The numerical solution is based on the integration of the mass transfer equations using the finite-difference method, which turns out to be stable for any step in time. To determine the components of the air velocity vector, a three-dimensional model of the potential flow is used, where the Laplace equations for the velocity potential are the modeling equations. **Findings.** The mathematical method of numerical calculation of the concentration of positive, negative aeroions and dust has been developed. A feature of the method is the possibility of predicting the aerionic regime, taking into account all physical factors that significantly affect the formation of concentration zones of aeroions in working areas at industrial sites. The method is not tied to a particular industrial site, it allows us to estimate the value of the concentration of aeroions both locally and in the entire calculated region. **Originality.** A method for prediction of aerion mode in working areas is developed based on 3D modeling of the propagation of negative, positive aeroions and dust under the influence of wind and diffusion, which allows to obtain results at each point of space or in a specific cross-section. **Practical value.** The proposed method of forecasting was used to solve the problem of estimating aerion mode in industrial zones in the open area of the industrial site of the Dnipro oil extraction plant in the presence of emission sources: positive aeroions during the operation of vehicles and respiration of workers; dust during the movement of workers and vehicles; negative aeroions of the ionizer installed in the working zone. The regularities of changes in the concentration of aeroions of various polarity and dust at a height of 1.7 m are determined, which corresponds to the position of the respiratory organs of workers. Quantitative results are needed in assessing the permissible working conditions in the workplaces of industrial sites of enterprises when creating new jobs and reengineering existing ones.

Keywords: ionization of air; sources of ion emission; numerical method; industrial site; concentration of aeroions

REFERENCES

1. Belikov, A. S., Ragimov, S. Y., & Akinshin, V. D. (2010). Some aspects of the optimization of the study of working conditions on the microclimate in the industrial industry. *Construction, material science, mechanical engineering*, 52, 3-9. (in Russian)
2. Biliaiev, M. M., & Tsygankova, S. G. (2016). Modeling of the aeroionic mode in working zones in the conditions of artificial ionization of air. *Science and Transport Progress*, 1(61), 39-47. doi: <http://doi.org/10.15802/stp2016/60947> (in Russian)
3. Vodianyuk, A. O., & Vidnichuk, T. V. (2013). Metody vyznachennia kontsentratsii aeroioniv ta vmistu pyly u povitri vyrobnychkykh prymishchen. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 50, 77-81. (in Ukrainian)
4. Hlyva, V. A. (2011). Doslidzhennia vplyvu mikroklimatychnykh parametriv povitroobminu na aeroionnyi sklad povitria robochyykh prymishchen. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini*, 20, 58-65. (in Ukrainian)
5. Zaporozhets, O. I., Hlyva, V. A., & Sidorov, O. V. (2011). The Principles of Modeling of Dynamics of Ionic Composition of Indoor Air. *Proceedings of the National Aviation University*, 47(2), 120-124. doi: <http://dx.doi.org/10.18372/2306-1472.47.24> (in Ukrainian)
6. Sidorov, A. V. (2014). The technique of small air ions concentration measurement at the PC operator working place. *Engineering industry and life safety*, 1, 36-41. (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

7. Stokan, O. V. (2014). Prohramno-informatsiina systema optymizatsii mikroklimatu u vyrobnychomu pry-mishchenni. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New solutions in modern technologies*, 48(1090), 91-96. (in Ukrainian)
8. Tolkunov, I. O. (2015). Study Ways to Improve the Air Ion Mode in the Work Environment Facilities for Spe-cial Purposes. *Science and technology of the air force of Ukraine*, 1(18), 197-201. (in Ukrainian)
9. Chernyy, K. A. (2012). Metodologicheskiiy podkhod k primeneniyu koronnykh aeroionizatorov pri provedenii korrektsii aeroionnogo sostava vozdukhа pomeshcheniy. *Magazine of Civil Engineering*, 6(32), 48-53. (in Russian)
10. Chernyy, K. A. (2011). The up-to-date knowledge on the air ions nature and their classification. *Bezopasnost' Zhiznedatel'nosti*, 7(127), 15-20. (in Russian)
11. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
12. Biliaiev, M. M., & Tsygankova, S. G. (2016). Complex of numerical models for computation of air ion con-centration in premises. *Science and Transport Progress*, 2(62), 16-24. doi: <http://dx.doi.org/10.15802/stp2016/67281> (in English)
13. Pushpawela, B., Javaratne, R., Nguy, A., & Morawska, L. (2107). Efficiency of ionizers in removing airborne particles in indoor environments. *Journal of Electrostatics*, 90, 79-84. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2017.10.002> (in English)
14. Zhao, X., Li, Y., Hua, T., Jiang, P., Yin, X., Yu, J., & Ding, B. (2017). Low-Resistance Dual-Purpose Air Filter Releasing Negative Ions and Effectively Capturing PM2.5. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(13), 12054-12063. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.7b00351> (in English)
15. Zhou, P., Yang, Y., Huang, G., & Lai, A. C. K. (2018). Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow. *Building and Environment*, 127, 204-210. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.006> (in English)
16. Jurelionis, A., Gagytė, L., Prasauskas, T., Čiužas, D., Krugly, E., Šeduikytė, L., & Martuzevičius, D. (2015). The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach. *Energy and Buildings*, 86, 305-313. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.014> (in English)

Надійшла до редколегії: 16.01.2019

Прийнята до друку: 15.05.2019