

УДК 519.6:519.8:628.83

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.42.1208

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ АЕРОІОНІВ В РОБОЧОМУ ПРИМІЩЕННІ : РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ

БІЛЯЄВ М. М.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
БІЛЯЄВА О. М.², *студ.*

^{1*} Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Факультет прикладної математики, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Науки, 72, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: vikabelyaeva604.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1859-8531

Анотація. Постановка проблеми. Розглядається процес іонізації повітря в робочому приміщенні. Ставиться задача визначення оптимального місця розташування іонізатору в робочій зоні. **Мета роботи.** Розробка CFD моделі на базі спряженого рівняння для обґрунтування оптимального міста розташування іонізатора в приміщенні. **Методика.** Для рішення спряженого рівняння використовуються дві кінцево-різницьові схеми. Перша чисельна модель побудована на базі змінно-трикутної схеми розщеплення. Друга чисельна модель базується на рішенні рівняння масопереносу відносно припущення невідомої функції. Рішення задачі аеродинаміки здійснюються шляхом чисельного інтегрування рівняння Лапласу для потенціалу швидкості. Розроблені чисельні моделі аеродинаміки враховують положення отворів системи вентиляції, наявність перешкод (наприклад, меблі) в робочому приміщенні, кратність повітрообміну. Для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості використовується ідея встановлення рішення за часом. Чисельне інтегрування здійснюється на базі метода розщеплення. Використовуються дві кінцево-різницьові схеми розщеплення. На кожному кроці розщеплення розрахунок потенціалу швидкості визначається на базі явної формули. **Наукова новизна.** Розроблена CFD модель для рішення задачі оптимізації – визначення оптимального місця розташування іонізатора в робочому приміщенні. Модель базується на чисельному інтегруванні спряженого рівняння масопереносу та рівняння аеродинаміки. Розроблена модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на розповсюдження аероіонів в робочому приміщенні (наявність меблі в приміщенні, розташування положення отворів вентиляції тощо). **Практична значущість.** Побудована CFD модель дає можливість лише за один розрахунок визначити місце оптимального розташування іонізатора, яке забезпечує потрібну концентрацію аероіонів в робочій зоні. **Висновки.** Для прогнозу аероіонного режиму в робочому приміщенні та вибору оптимального місця розташування іонізатора розроблена CFD модель. Особливістю CFD моделі є можливість врахування основних фізичних факторів, що впливають на формування концентраційних полів аероіонів в робочих приміщеннях. Запропонована CFD модель може бути використана для наукового обґрунтування місць розташування іонізаторів в приміщеннях.

Ключові слова: іонізація повітря; робоча зона; мікроклімат; іонізатор; аеродинаміка приміщень; CFD моделювання

MATHEMATICAL MODELING OF ION DISPERSION IN ROOM : OPTIMIZATION PROBLEM SOLVING

BILIAIEV M.M.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BILIAIEVA O.M.², *Stud.*

^{1*} Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and technologies, ESI “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport”, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Faculty of Applied Mathematics, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Nauka Ave., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: vikabelyaeva604.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1859-8531

Abstract. Problem statement. The process of ionization of air in the work area is visible. The task is to determine the optimal location for distributing the ionizer in the work area. **The purpose of the article.** Development of a CFD model based on a conjugated line to determine the optimal location for ionizer placement in the premises. **Methodology.** Two finite-difference schemes are used to solve the conjugate equation. The first numerical model is built on the basis

of an alternating triangular splitting scheme. The second numerical model is based on the solution of the mass transfer equation with respect to the increment of the unknown function. The aerodynamic problem is solved by numerically integrating the Laplace equation for the velocity potential. The developed numerical aerodynamic models take into account the position of the ventilation system openings, the presence of obstacles (for example, furniture) in the working room, and the multiplicity of air exchange. For numerical integration of the equation for the velocity potential, the idea of establishing a solution over time is used. Numerical integration is carried out on the basis of the splitting method. Two finite-difference splitting schemes are used. At each step of the splitting, the calculation of the velocity potential is determined on the basis of an explicit formula. **Scientific novelty.** The CFD model has been expanded to solve the optimization problem – determining the optimal location for ionizer placement in the working area. The model is based on the numerical integration of the conjugate equation of mass transfer and the equation of aerodynamics. The model has been broken down into the main physical factors that influence the distribution of aeroions in the work area (the presence of furniture in the area, the position of the ventilation openings, etc.). **Practical significance.** The CFD model makes it possible to determine in just one step the place for optimal expansion of the ionizer, which will ensure the required concentration of aeroions in the working area. **Conclusions.** A CFD model has been developed to predict the air ion regime in a working room and select the optimal location of the ionizer. A feature of the CFD model is the ability to take into account the main physical factors that influence the formation of air ion concentration fields in working rooms. The proposed CFD model can be used to scientifically substantiate the locations of ionizers in rooms.

Keywords: ionization of the air; work zone; microclimate; ionizer; aerodynamics; CFD modeling

Постановка проблеми. Прогнозування мікроклімату в робочих приміщеннях відноситься до актуальних прикладних задач в області охорони праці [1–5]. Відомо, що іонізація повітря є одним з важливих способів поліпшення стану мікросередовища у робочих зонах. Так житлові комплекси класу «люкс» за кордоном вже надають квартири з вбудованими іонізаторами повітря, тому що наявність таких пристроїв тепер також обов'язково як і наявність системи водопостачання та каналізації у квартирі.

Для створення певного аероіонного режиму у робочих зонах використовують іонізатори повітря. Однак вибір розташування іонізатора повітря в робочому приміщенні – нетривіальне завдання. Це пов'язано з тим, що, по-перше, необхідно забезпечити необхідну (оптимальну) концентрацію іонів на робочому місці, а з іншого боку – на процес формування концентраційних полів іонів у приміщенні впливає велика кількість факторів (повітрообмін, положення отворів вентиляції, наявність меблів у приміщенні тощо). Таким чином, з'являється завдання оптимізації – вибір раціонального розташування іонізатора в робочому приміщенні за умови, що концентрація іонів у робочій зоні має обмеження за величиною.

Як приклад такого завдання, на рисунку 1 показана робоча зона, де розташовані стіл

і стілець, і розглядаються 3 можливих варіанти місця розташування іонізатора в робочому приміщенні:

- варіант № 1 – іонізатор на стелі;
- варіант № 2 – на полиці (бічна стінка приміщення);
- варіант № 3 – на шафі;
- варіант № 4 – не одне місце не підходить для розміщення іонізатора обраного типу.

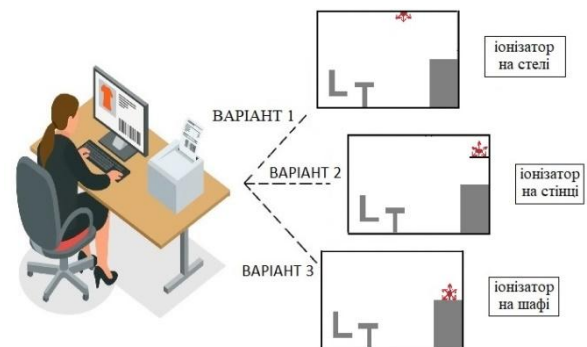


Рис. 1. Вибір місця розташування іонізатору

Потрібно визначити в якому місці розташування іонізатора буде забезпечена необхідна концентрація іонів у робочій зоні і, не виключено (варіант № 4), що такого місця в приміщенні «не буде» для моделі іонізатора, що розглядається.

Таким чином, місце розміщення іонізатора у робочому приміщенні – невідоме і потрібно визначити область його розміщення, за умови забезпечення у робочій зоні (органи дихання працівника)

такої концентрації негативних аероіонів, яка відповідає діапазону рекомендованих значень. Розв'язання задачі щодо визначення концентрації іонів при заданому положенні іонізатора присвячено роботи в [2–12]. Особливістю методів, що використовують у цих роботах є те, що розв'язання задачі щодо визначення оптимального місця розміщення іонізатора, базується на вирішенні «прямого» завдання, а саме – здійснюється розрахунок концентраційного поля іонів у приміщенні для різних варіантів розташування пристрою. Тобто, проводиться серія розрахунків шляхом «перебору» варіантів різного розташування приладу. У випадку, що розглядається (рис. 1) – потрібно три рази здійснити розрахунок концентраційного поля аероіонів для трьох обраних місць можливого розташування пристрою (рис. 1). Далі, аналізуючи концентраційні поля іонів в робочій зоні для кожного розглянутого варіанту розташування іонізатору визначається його положення (або відсутність такого положення пристрою) в робочому приміщенні. В даній роботі розглядається інший підхід для рішення задачі по обґрунтуванню місця розташування іонізатору в робочому приміщенні – це розрахунок на базі спряженого рівняння переносу. При такому підході потрібно зробити лише *один* розрахунок, а не серію розрахунків, для визначення оптимального місця розташування іонізатору.

Мета статті – розробка чисельної (CFD) моделі на базі спряженого рівняння для обґрунтування оптимального місця розташування іонізатора в приміщенні.

Методика. Визначення оптимального місця розташування іонізатору в робочому приміщенні базується на рішенні спряженого рівняння (1) (Г. І. Марчук):

$$-\frac{\partial C^*}{\partial t} - \frac{\partial u C^*}{\partial x} - \frac{\partial v C^*}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C^*}{\partial y} \right) + p, \quad (1)$$

де C^* – функція, спряжена з функцією C (C – концентрація негативних іонів в повітряному середовищі), p – деяка функція.

Оберем наступний вид функції p (Г. І. Марчук):

$$p(x, y, t) = \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(t - \tau). \quad (2)$$

За такого вибору функції p значення функціоналу:

$$I = Q \int_0^T C^*(r_0, t) dt,$$

буде відповідати значенню концентрації негативних іонів у точці реципієнта ($r_0 = x_0, y_0$) (у робочій зоні).

Тоді, для вирішення задачі оптимізації необхідно:

1. чисельно вирішити пов'язане рівняння (1) з умовою (2);

2. побудувати поле (ізолінії) функціоналу I .

3. знайти розв'язання задачі (координати x_0, y_0 – місця оптимального розміщення іонізатора повітря) з умов:

$$I(x_0, y_0, t) < C_N, \quad (3)$$

де C_N – потрібна концентрація іонів у реципієнта в робочій зоні. Наприклад, це може бути рекомендована концентрація негативних іонів у робочій зоні: $3\,000 \text{ іон/см}^3 - 5\,000 \text{ іон/см}^3$.

У спряженому рівнянні (1) використано значення компонент вектора швидкості повітряного середовища u, v які визначаються шляхом вирішення задачі аеродинаміки приміщень.

Граничні умови для спряженого рівняння (1) мають вигляд (Г. І. Марчук):

$$\mu \frac{\partial C^*}{\partial n} + u_n C^* = 0 \text{ на } \Sigma \text{ при } u_n \geq 0,$$

$$C^* = 0 \text{ на } \Sigma \text{ при } u_n < 0,$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial n} = 0 \text{ на твердих поверхнях,}$$

$$C^*(x, y, T) = C^*(x, y, 0).$$

Для рішення задачі аеродинаміки повітряного потоку в приміщенні при роботі вентиляції) використовується рівняння Лапласу (2) для потенціалу швидкості:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x^2} + \frac{\partial P^2}{\partial y^2} = 0. \quad (4)$$

Для рівняння (4) ставляться такі граничні умови:

– на межі, де потік входить у розрахункову область (отвори вентиляції), для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Неймана

$\frac{\partial P}{\partial x} = V$, де V – відоме значення швидкості вітрового потоку;

– на межі, де потік виходить з розрахункової області (відповідні отвори вентиляції), для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Діріхле $P = P_0 + const$, де P_0 – деяка числова константа;

– на верхній межі, тверда непроникна стінка, ставиться умова непроникнення $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– на нижній межі, тверда непрозора стінка, ставиться умова непроникнення $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– на всіх твердих стінках (меблі, обладнання) виконується умова непроникнення.

Якщо відоме поле потенціалу швидкості, то для визначення компонент вектору швидкості повітряного потоку використовуються такі залежності:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Чисельна модель. Чисельне інтегрування рівняння (2) здійснюється за допомогою двох різницевоїх схем. Попередньо, рівняння для потенціалу швидкості (4) приводиться до вигляду (5):

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (5)$$

де η – фіктивний час.

При $\eta \rightarrow \infty$ розв'язок рівняння (5) прагнучиме «встановлення», тобто. до розв'язання рівняння Лапласа (4).

На наступному етапі будується локально-одномірна кінцево-різницева схема (перша чисельна модель аеродинаміки). Для цього здійснюється геометричне розщеплення рівняння (5) таким чином:

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (7)$$

Далі, значення потенціалу P у центрі різницевоїх осередків визначається за явною залежністю (для рівняння (6)):

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + V\eta \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + V\eta \frac{-P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2}.$$

Для чисельного розв'язання рівняння (7) використовується наступна залежність:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + V\eta \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + V\eta \frac{-P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}.$$

Таким чином, значення потенціалу швидкості на кожному дробовому кроці визначається за очевидною схемою. Розрахунок за цими залежностями закінчується під час виконання умови:

$$|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon, \quad (8)$$

де ε – мале число (приймається $\varepsilon = 0,001$; n – номер ітерації (кількість кроків за «часом»)).

Гранична умова непротікання на твердих стінках реалізується шляхом застосування фіктивних різницевоїх комірок.

Для проведення розрахунків потрібно знати поле потенціалу швидкості для $\eta = 0$. Наприклад, можна прийняти: $P = 0$.

Значення компонентів вектору швидкості розраховується на сторонах різницевих комірок наступним чином:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad (9)$$

$$v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}. \quad (10)$$

Також побудована друга чисельна модель аеродинаміки. Для цього використовується наступна апроксимація рівняння (5):

$$\begin{aligned} P_{i,j}^{n+1} = & P_{i,j}^n + V\eta \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \\ & + V\eta \frac{-P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \\ & + V\eta \frac{-P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} + \\ & + V\eta \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} +. \end{aligned}$$

Поле компонент вектору швидкості повітряного середовища $u(x,y)$, $v(x,y)$, визначено за залежностями (9), (10).

Дотримуючись Г. І. Марчука для чисельного розв'язання спряженого рівняння (1) необхідно запровадити нові змінні:

$$u' = -u, \quad v' = -v, \quad t' = T - t.$$

Тогда, при использовании новых переменных, сопряженное уравнение (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C^*}{\partial t'} + \frac{\partial u C^*}{\partial x} + \frac{\partial v C^*}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C^*}{\partial y} \right) + p, \end{aligned} \quad (11)$$

Далі, здійснюється розщеплення рівняння (11):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial y} \right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = p. \quad (13)$$

Для чисельного інтегрування рівнянь (12) використовується змінно-трикутна схема розщеплення (перша чисельна модель).

Принцип побудови другої схеми чисельного інтегрування першого рівняння (рівняння конвективного переносу) розглянемо на модельному рівнянні переносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + a \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (14)$$

де $a > 0$.

Представимо функцію $C(x,t)$, значення якої необхідно визначити на новому часовому кроці t^{n+1} , так (М. М. Беляєв, В. К. Хрущ):

$$C(x, t^{n+1}) = C(x, t^n) + VC(x, t),$$

де $C(x, t^n)$ – відоме значення функції C ; $VC(x, t)$ – невідоме значення приросту функції C .

Тоді, рівняння (14) можна записати так:

$$\frac{\partial VC}{\partial t} + a \frac{\partial VC}{\partial x} = -a \frac{\partial C^n}{\partial x}. \quad (15)$$

В різницевий аналог рівняння (15) має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{VC_i^{n+1} - VC_i^n}{\Delta t} + a \frac{VC_i^{n+1} - VC_i^n}{h_x} \beta = \\ = -a \frac{C_{i+1}^n - C_{i-1}^n}{2h_x}. \end{aligned} \quad (16)$$

де $\beta = 0,5$.

Невідоме значення VC знаходиться за явної формулою з (16). Далі, визначається значення функції C на часовому кроці t^{n+1} :

$$C_i^{n+1} = C_i^n + VC_i^{n+1}.$$

Таким самим шляхом побудовано чисельну модель для інтегрування двовимірного рівняння переносу (12). Для чисельного інтегрування другого рівняння з системи (12) – рівняння дифузії, використовується явна різницева схема.

Здійснена програмна реалізація побудованих чисельних моделей.

Результати. На базі розроблених чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу був проведений обчислювальний експеримент. Схема розрахункової області показана на рисунку 2. У приміщенні є робоча зона в якій розташований стілець та стіл.

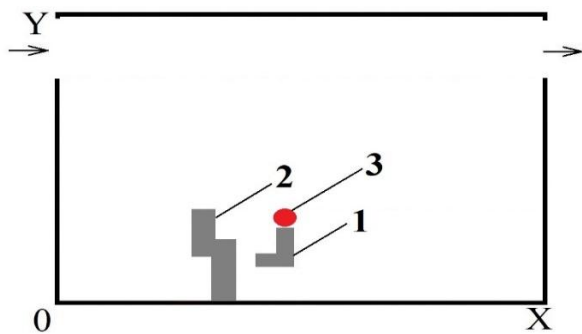


Рис. 2. Схема робочого приміщення: 1 – стілець; 2 – стіл з обладнанням; 3 – положення голови працівника

Математичне моделювання проведено за таких параметрів: розміри розрахункової області 15м*6м; коефіцієнти турбулентної дифузії приймаються $\mu_x = ku$, $\mu_y = kv$ ($k = 0,2$); кратність повітрообміну дорівнює 3; для іонізації повітря планується використання іонізатора, який має інтенсивність $25 \cdot 10^8$ негативних іонів за секунду.

На рисунку 3 показано розподіл швидкості повітряного потоку у робочій зоні на висоті 0,15 м над головою співробітника.

Дані на рисунку 3 показують, що у робочій зоні швидкість повітряного потоку не перевищує значення нормативної величини 0,2 м/с.

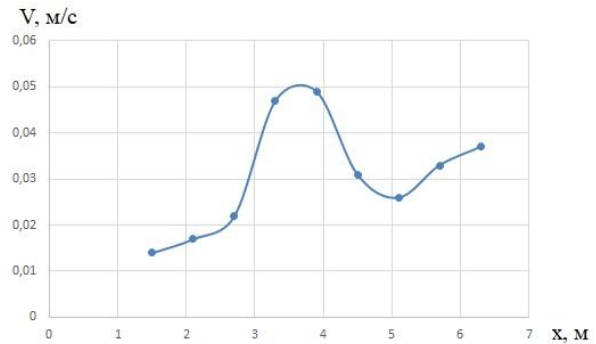


Рис. 3. Розподіл швидкості повітряного потоку в робочій зоні на висоті 0,15 м над головою співробітника

Далі, на матриці (рис. 4) показано значення функціоналу в робочому приміщенні. Кожне число рисунку (матриці) є безрозмірне значення функціоналу. Цей функціонал, в рамках задачі, що розглядається, – відповідає безрозмірному значенню концентрації негативних іонів у реципієнта (позиція 3, рис. 2). Фізичний зміст кожного значення функціоналу такий – якщо помістити іонізатор у цю точку, то працівник перебуватиме в області з такою концентрацією негативних іонів. Значення функціоналу (концентрації) наведено у відсотках від величини максимальної концентрації аероіонів у розрахунковій області – $C_{\max}$. Виведення на друк чисел здійснено за форматом «ціле число», тобто без дробової частини.

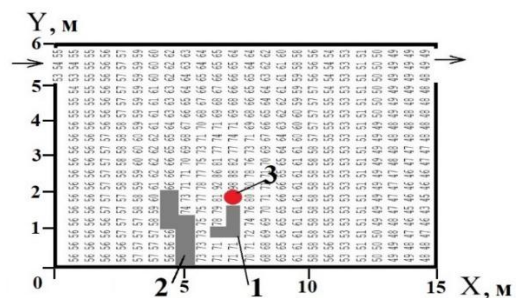


Рис. 4. Матриця значень функціоналу для вибору місця розташування іонізатора ($C_{\max} = 7574$ часток/см³):

1 – стілець; 2 – стіл із обладнанням;
3 – становище голови співробітника

Таким чином, якщо для розглянутої задачі $C_{\max} = 7574$ часток/см³ (позиція «99» на рисунках), то розміщення іонізатора в точці, де значення функціоналу буде рівним, наприклад, «66», створить концентрацію

негативних іонів у реципієнта $C = 0,66 \cdot 7574 = 4998$ часток/см³. Очевидно, що таке значення концентрації негативних іонів відповідає оптимальному режиму іонізації для працівника. З іншого боку, якщо розмістити іонізатор у точках, де значення функціоналу буде «72» і вище, то значення концентрації негативних іонів у реципієнта буде більшим 5 500 часток/см³, тобто більше бажаного діапазону.

Для більшої ясності, нижче, на рисунку 5 показано значення шуканого функціоналу, на певній висоті над головою працівника. Точці «0» відповідає ліва стінка робочого приміщення.

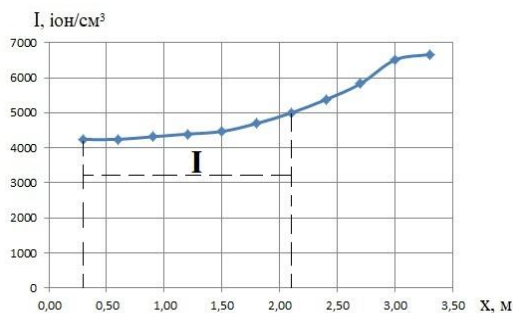


Рис. 5. Значення функціоналу (концентрація іонів) на висоті 0,56 м над головою працівника:

I – область рекомендованого розміщення іонізатора

Аналіз рисунку 5 показує, що якщо обрати рівень, що відповідає висоті 0,56 м над головою працівника, то іонізатор можна розташовувати у будь-якій точці цього рівня до позначки $x = 2$ м від лівої стінки робочого приміщення.

Таким чином, застосування розроблених моделей дозволило за один розрахунок визначити зони раціонального розміщення

іонізатора у приміщенні. Відзначимо, що година розрахунку склала 3 с.

Наукова новизна та практична цінність. Розроблена CFD модель для рішення задачі оптимізації – визначення оптимального місця розташування іонізатора в робочому приміщенні.

Модель базується на чисельному інтегруванні спряженого рівняння масопереносу та рівняння аеродинаміки.

Розроблена модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на розповсюдження аероіонів в робочому приміщенні (наявність меблів в приміщенні, розташування положення отворів вентиляції тощо).

Побудована CFD модель дає можливість лише за один розрахунок визначити місця оптимального розташування іонізатора, яке забезпечує необхідну концентрацію аероіонів в робочій зоні.

Висновки

1. Для прогнозу аероіонного режиму в робочому приміщенні та вибору оптимального місця розташування іонізатора розроблена CFD модель.

2. Особливістю CFD моделі є можливість врахування основних фізичних факторів, що впливають на формування концентраційних полів аероіонів в робочих приміщеннях.

3. Запропонована CFD модель може бути використана для наукового обґрунтування місць розташування іонізаторів в приміщеннях.

4. Подальший розвиток цього напрямку – розробка тривимірної CFD моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Беляева В. В., Якубовская З. Н. Прогнозирование уровня загрязнения воздушной среды в помещениях. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 123 с.
2. Глива В. А., Бурдейна Н. Б., Зозуля С. В. Дослідження динаміки аероіонного складу повітря на робочому місці користувача персонального комп'ютера з урахуванням електромагнітних чинників. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2022. № 2. С. 99–101. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.099>
3. Глива В. А. Дослідження впливу мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад повітря робочих приміщень. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2011. Вип. 20. С. 58–65.
4. Запорожець О. І., Глива В. А., Сидоров О. В. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2011. № 2. С. 120–124.
5. Сукач С. В., Сидоров О. В. Методологічні засади підвищення якості контролю аероіонного складу повітря виробничого середовища. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. № 32. С. 127–133.
6. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.

7. Bolibrukh B., Glyva V., Kasatkina N., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Bogatov O., Petrunok T., Aznaurian I., Zozulya S. Monitoring and management ion concentrations in the air of industrial and public premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 1 (10 (115)). Pp. 24–30. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253110>
8. Fletcher L. A., Noakes C. J., Sleigh P. A., Beggs C. B., Shepherd S. J. Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*. 2008. Vol. 17, № 2. Pp. 173–182.
9. Fletcher L. A., Gaunt L. F., Beggs C. B., Shepherd S. J., Sleigh P. A., Noakes C. J., Kerr K. G. Bactericidal action of positive and negative ions in air. *BMC Microbiology*. 2007. Vol. 7:32.
10. Noakes C. J., Sleigh P. A., Beggs C. B. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms. *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms*. Roomvent 2007, 13–15 June 2007, Helsinki.
11. Noakes C. J., Beggs C. B., Sleigh P. A. Modelling the performance of upper room ultraviolet germicidal irradiation devices in ventilated rooms : comparison of analytical and CFD methods. *Indoor and Built Environment*. 2004. Vol. 13, № 6. Pp. 477–507.
12. Noakes C. J., Sleigh P. A., Fletcher L. A., Beggs C. B. Use of CFD modelling to optimise the design of upper-room UVGI disinfection systems for ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*. 2006. Vol. 15, № 4. Pp. 347–356.

REFERENCES

1. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V. and Yakubovska Z.N. *Prognozirovaniye urovnya zagryazneniya vozdushnoy sredy v pomeshcheniyakh : monografiya* [Predicting the level of indoor air pollution : monograph]. Dnipropetrovsk : “Aktsept PP”, 2015. (in Russian).
2. Glyva V.A., Burdejna N.B. and Zozulya S.V. *Doslidzhennya dynamiky aeroionnogo skladu povitrya na robochomu misci korystuvacha personalnogo kompyutera z uraxuvannyam elektromagnitnykh chynnykiv* [Research on the dynamics of the aeroionic composition of air at the workplace of a personal computer user, taking into account electromagnetic factors]. *Systemy upravlinnya navigaciyi ta zvyazku* [Navigation and Communication Control Systems]. 2022, vol. 2, pp. 99–101. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.099> (in Ukrainian).
3. Glyva V.A. *Doslidzhennya vplyvu mikroklimatichnykh parametriv povitroobminu na aeroionnyj sklad povitrya robochyx prymishhen* [Research on the influence of microclimatic parameters of air exchange on the aeroionic composition of air in working spaces]. *Problemy oxorony praci v Ukrayini* [Occupational Safety Problems in Ukraine]. 2011, vol. 20, pp. 58–65. (in Ukrainian).
4. Zaporozhecz O.I., Glyva V.A. and Sydorov O.V. *Pryncypy modelyuvannya dynamiky aeroionnogo skladu povitrya u prymishhennyax* [Principles of modeling the dynamics of the aeroionic composition of indoor air]. *Visnyk Nacionalnogo aviacijnogo universytetu* [Bulletin of the National Aviation University]. 2011, no. 2, pp. 120–124. (in Ukrainian).
5. Sukach S.V. and Sydorov O.V. *Metodologichni zasady pidvyshhennya yakosti kontrolyu aeroionnogo skladu povitrya vyrobnychogo seredovyshha* [Methodological principles for improving the quality of control of the aeroionic composition of air in the production environment]. *Problemy oxorony praci v Ukrayini* [Occupational Safety Problems in Ukraine]. 2016, no. 32, pp. 127–133. (in Ukrainian).
6. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayuschey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka, 1997, 368 p. (in Russian).
7. Bolibrukh B., Glyva V., Kasatkina N., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Bogatov O., Petrunok T., Aznaurian I. and Zozulya S. Monitoring and management ion concentrations in the air of industrial and public premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022, no. 1(10(115)), pp. 24–30. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253110>
8. Fletcher L.A., Noakes C.J., Sleigh P.A., Beggs C.B. and Shepherd S.J. Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*. 2008, vol. 17, no. 2, pp. 173–182.
9. Fletcher L.A., Gaunt L.F., Beggs C.B., Shepherd S.J., Sleigh P.A., Noakes C.J. and Kerr K.G. Bactericidal action of positive and negative ions in air. *BMC Microbiology*. 2007, vol. 7:32.
10. Noakes C.J., Sleigh P.A. and Beggs C.B. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms. *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent*, 13–15 June 2007, Helsinki.
11. Noakes C.J., Beggs C.B. and Sleigh P.A. Modelling the performance of upper room ultraviolet germicidal irradiation devices in ventilated rooms: comparison of analytical and CFD methods. *Indoor and Built Environment*. 2004, vol. 13, no. 6, pp. 477–507.
12. Noakes C.J., Sleigh P.A., Fletcher L.A. and Beggs C.B. Use of CFD modelling to optimise the design of upper-room UVGI disinfection systems for ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*. 2006, vol. 15, no. 4, pp. 347–356.

Надійшла до редакції: 11.10.2025.