

УДК 519.6:331.45:504.054

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.271224.48.1110

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ДОМШКИ В РОБОЧОМУ ПРИМІЩЕННІ ПРИ СКЛАДНІЙ СХЕМІ ВЕНТИЛЯЦІЇ

БІЛЯЄВ М. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
БІЛЯЄВА В. В.², *докт. техн. наук, проф.*,
БЕРЛОВ О. В.^{3*}, *канд. техн. наук, доц.*,
КОЗАЧИНА В. А.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
КОЛЕСНИКОВ С. О.⁵, *канд. фіз.-мат. наук, доц.*

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

² Кафедра «Енергетичних систем та енергоменеджменту», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

^{3*} Кафедра охорони праці, цивільної та промислової безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 247-16-01, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁴ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁵ Кафедра природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін, ТОВ «Технічний університет «МЕТІНБЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», Південне шосе, 80, 69008, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: sergiv.kolesnykov@mipolytech.education, ORCID ID: 0000-0002-9538-8858

Анотація. *Постановка проблеми.* Розглядається розробка та практичне використання чисельної моделі для аналізу процесу забруднення повітря в робочому приміщенні при аварійному витoku токсичної речовини. *Мета роботи.* Створення чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу нестационарного процесу розповсюдження токсичної речовини в робочому приміщенні. *Методика.* Моделювання розповсюдження токсичної речовини при роботі аварійної вентиляції здійснюється на базі рівняння Лапласа для потенціалу швидкості та рівняння масопереносу, що враховує конвективний та дифузійний перенос токсичної речовини. Чисельне інтегрування моделюючих рівнянь механіки суцільного середовища здійснюється за допомогою кінцево-різницевої схеми з використанням метода маркування. *Наукова новизна.* Створена чисельна модель для прогнозування рівня забруднення повітря в робочому приміщенні внаслідок емісії токсичного газу. Модель базується на чисельному інтегруванні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища. Особливістю чисельної моделі є врахування основних фізичних факторів, що впливають на розповсюдження токсичного газу в приміщенні (наявність обладнання в приміщенні, положення отворів вентиляції, міста емісії токсичної речовини тощо) та швидкість розрахунку. *Практична значущість.* Розроблена чисельна модель може бути використана для наукового обґрунтування параметрів аварійної вентиляції для робочих приміщень, де можлива емісія токсичних речовин. *Висновки.* Для аналізу та прогнозу процесу хімічного забруднення робочого приміщення розроблена динамічна багатofакторна чисельна модель. Особливістю чисельної моделі є можливість врахувати основні фізичні фактори, що впливають на формування областей забруднення в робочих приміщеннях. Розроблена чисельна модель може бути використана для наукового обґрунтування параметрів аварійної вентиляції для швидкого зниження концентрації токсичної (або вибухонебезпечної) речовини в робочому приміщенні.

Ключові слова: аварійне забруднення повітря; робоче приміщення; чисельне моделювання; хімічно небезпечна речовина

SIMULATION OF IMPURITY SPREAD IN THE WORKING ROOM WITH A COMPLEX VENTILATION SCHEME

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BILIAIEVA V.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BERLOV O.V.^{3*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOZACHYNA V.A.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOLESNYKOV S.O.⁵, *Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 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 Department of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

^{3*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁴ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryan St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCIDID: 0000-0002-6894-5532

⁵ Department of Natural Sciences and General Engineering Disciplines, LLC "Technical University "METINVEST POLYTECHNIC"", 80, Southern Highway, Zaporizhzhia, 69008, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: sergiy.kolesnykov@mipolytech.education, ORCID ID: 0000-0002-9538-8858

Abstract. Problem statement. The development and practical use of a numerical model for the analysis of the process of air pollution in the workplace during an emergency leak of a toxic substance is considered. **The purpose of the article.** Creation of numerical models of aerodynamics and mass transfer of the non-stationary process of the spread of a toxic substance in the workplace. **Methodology.** Modeling of the spread of a toxic substance during the operation of emergency ventilation is carried out on the basis of the Laplace equation for the velocity potential and the mass transfer equation, which takes into account the convective and diffusive transport of the toxic substance. Numerical integration of the modeling equations of the mechanics of a solid medium is carried out using finite-difference schemes using the labeling method. **Scientific novelty.** A numerical model was created for forecasting the level of air pollution in the working room due to the emission of toxic gas. The model is based on the numerical integration of the fundamental equations of solid medium mechanics. A feature of the numerical model is the consideration of the main physical factors that affect the spread of toxic gas in the room (the presence of equipment in the room, the position of the ventilation holes, the cities of emission of the toxic substance, etc.) and the speed of calculation. **Practical significance.** The developed numerical model can be used for the scientific substantiation of emergency ventilation parameters for workplaces where the emission of toxic substances is possible. **Conclusions.** A dynamic multifactorial numerical model was developed to analyze and forecast the process of chemical contamination of the workplace. A feature of the numerical model is the possibility to take into account the main physical factors affecting the formation of pollution areas in the workplace. The developed numerical model can be used for scientific substantiation of emergency ventilation parameters for rapid reduction of the concentration of toxic (or explosive) substance in the working room.

Keywords: emergency air pollution; working room; numerical modeling; chemically dangerous substance

Постановка проблеми. Проблема забруднення повітря в робочих приміщеннях є особливо актуальною. В коло практичних задач даного класу входять задачі, що пов'язані з емісією токсичних речовин при екстремальних ситуаціях. При таких ситуаціях можливе дуже швидке ураження персоналу на робочих місцях [1; 5]. Це пов'язано з тим, що при екстремальних ситуаціях в приміщеннях дуже швидко з'являються області інтенсивного хімічного забруднення (рис. 1).

Тому вкрай важливо обґрунтовано визначати параметри аварійної вентиляції, враховуючи те, що в робочих приміщеннях можливо утворення застійних областей. Таке прогнозування можна виконувати на базі математичних моделей [1; 6–8]. Але, зараз в теперішній час існує дефіцит таких моделей, що обумовлює актуальність розробки математичних моделей для рішення задач даного класу.



Рис. 1. Викид в робочому приміщенні
(<https://mexoiloffshore.com.mx/fugas.html>)

Мета статті. Розробка чисельної моделі для прогнозування аварійного забруднення повітря в робочому приміщенні.

Методика. Розрахунок динаміки хімічного забруднення повітря в робочому приміщенні при аварійному викиді хлору базується на чисельному інтегруванні рівнянь аеродинаміки та масопереносу.

Моделюючим рівнянням аеродинаміки є наступне рівняння [2]:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x^2} + \frac{\partial P^2}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Для моделюючого рівняння (1) ставляться відповідні граничні умови:

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

гранична умова Неймана $\frac{\partial P}{\partial x} = U$, де U –

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 (обладнання) виконуватиметься умова непроникнення.

Якщо відомі поля потенціалу швидкості, то для визначення компонент вектора швидкості повітряного потоку використовуються такі залежності [2]:

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

Чисельне інтегрування моделюючого рівняння (1), а також для чисельного інтегрування інших диференціальних рівнянь моделі вентиляції та масопереносу, використовується прямокутна різницева сітка. Для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості використовується його запис у еволюційному вигляді [4]:

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

де t – фіктивний час, при $t \rightarrow \infty$ розв'язок рівняння (2) наближається до розв'язку рівняння Лапласа (1).

На наступному кроці виконується геометричне розщеплення рівняння (2) наступним чином [4]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (3)$$

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

Для розрахунку значення потенціалу швидкості P на базі одновимірного рівняння (3) використовується така залежність:

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

Для розрахунку значення потенціалу швидкості P на базі одновимірного рівняння (4) застосовується залежність:

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

Розрахунок здійснюється поки не буде виконана умова:

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

де ε – мале число; n – номер ітерації.

Процес розповсюдження небезпечної речовини, що потрапляє в повітря робочого приміщення при аварійній емісії моделюється на базі рівняння масопереносу [1–3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \end{aligned} \quad (5)$$

де C – концентрація хімічно небезпечної речовини; u, v – компоненти вектору швидкості повітряного потоку в робочому приміщенні; w_s – швидкість гравітаційного осадження речовини; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; q_i – інтенсивність емісії хімічно

небезпечної домішки; $\delta(x-x_i)(y-y_i)$ – дельта-функція Дірака; (x_i, y_i) – координати розташування джерела емісії хімічно небезпечної домішки в робочому приміщенні; t – час.

Для чисельного інтегрування рівняння (5) робляться такі перетворення :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u C}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \\ \frac{\partial v C}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \\ u^+ &= (u + |u|)/2, u^- = (u - |u|)/2, \\ v^+ &= (v + |v|)/2, v^- = (v - |v|)/2 \\ \frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}. \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}. \\ \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) &\approx \beta_{\mu_x} \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \beta_{\mu_x} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) &\approx \beta_{\mu_y} \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \beta_{\mu_y} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = \\ &= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}. \end{aligned}$$

Тоді, можна записати аналог рівняння (1) в різницевому вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + \\ + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + \\ + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}. \end{aligned} \quad (6)$$

Параметр δ_{ij} дорівнює 1, якщо в різницевій комірці є джерело забруднення, та 0, якщо в комірці немає джерела забруднення.

Зауважимо, що в даному запису використовується така залежність:

$$q_{ij} = q_i / \Delta x / \Delta y,$$

де q_i – інтенсивність джерела викиду забруднювача.

Далі здійснюється розщеплення рівняння (6) наступним чином [4]:

– крок 1 ($k = 1/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + \\ + M_{yy}^+ C^n + M_{xx}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (7)$$

– крок 2 ($k = n + 1/2$; $c = n + 1/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^c + \\ + M_{yy}^- C^k + M_{xx}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (8)$$

– крок 3 ($k = n + 3/4$; $c = n + 1/2$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^c + M_{yy}^+ C^k + \\ + M_{yy}^- C^k + M_{xx}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (9)$$

– крок 4 ($k = n + 1$; $c = n + 3/4$):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^c + \\ + M_{yy}^- C^c + M_{xx}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l. \end{aligned} \quad (10)$$

Особливістю розглянутої схеми розщеплення є те, що на кожному розрахунковому кроці, концентрація хімічно небезпечної речовини визначається за явною формулою.

На наступному етапі була здійснена програмна реалізація побудованих чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу.

Результати. На базі розроблених чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу був проведений обчислювальний експеримент. Схема розрахункової області показана на рисунку 2. В робочому приміщенні розглядалася аварійна емісія хлору в двох

містах. Аварійна емісія здійснювалася на протязі 1,5 с, а далі викид припиняється. В робочому приміщенні повітря потрапляє через отвір, що розташований на полу, вихід повітря з робочого приміщення здійснюється через отвір на стелі та через отвір на правій стінці приміщення. Це показано умовно «стрілками» на рисунку 2.

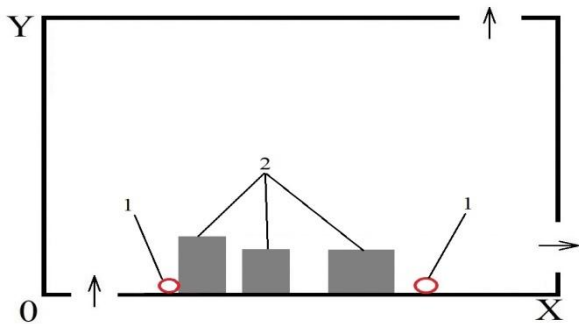


Рис. 2. Розрахункова схема: 1 – місце аварійного витока хлору; 2 – устаткування

Інтенсивність емісії хлору дорівнює 1г/с , $w_s = 0,01\text{ м/с}$, розміри розрахункової області $10 \times 5\text{ м}$. Кратність повітрообміну дорівнює 7. При проведенні розрахунків для визначення величини коефіцієнтів дифузії використовувалися залежності:

$$\mu_x = 0,1 \cdot u; \mu_y = 0,1 \cdot v.$$

Результати рішення задачі показані в двох виглядах: матриці розподілу концентрації хлору в робочому приміщенні (рис. 3–6) та у вигляді ізоліній концентрації хлору (рис. 7–10). Матриці дають можливість швидко отримати «кількісну» оцінку рівня хімічного забруднення повітря в робочому приміщенні, або в деякій області приміщення, та зміну цього рівня з часом. Результати моделювання, що показані у вигляді ізоліній (рис. 6–8) дають можливість швидко визначити форму зони хімічного забруднення та вплив обладнання на «деформацію» зони забруднення.

На рисунках-матрицях показано поле концентрації хлору в безрозмірному вигляді. Кожне число на рисунку показує значення концентрації у відсотках від C_{max} (максимальна концентрація). Максимальна

концентрація хлору змінюється з часом у робочому приміщенні.

На рисунках 2–10 показано, як змінюється форма області забруднення в робочому приміщенні для різних моментів часу після аварії. На рисунках 2–6 показано поле концентрації хлору в безрозмірному вигляді. Кожне число на рисунку показує значення концентрації у відсотках від максимального її значення на даний момент часу.



Рис. 3. Область забруднення в робочому приміщенні $t = 0,24\text{ с}$, $C_{\text{max}} = 0,61\text{ г/м}^3$

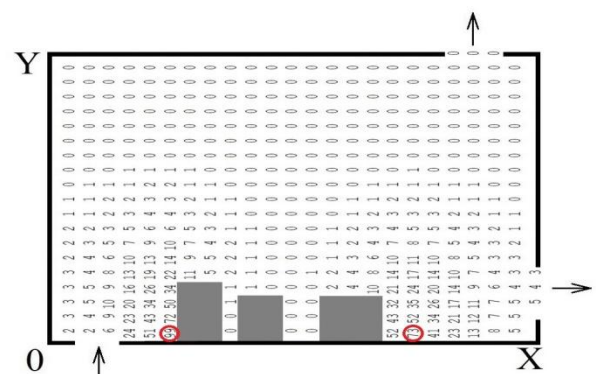


Рис. 4. Область забруднення в робочому приміщенні, $t = 0,71\text{ с}$, $C_{\text{max}} = 0,87\text{ г/м}^3$

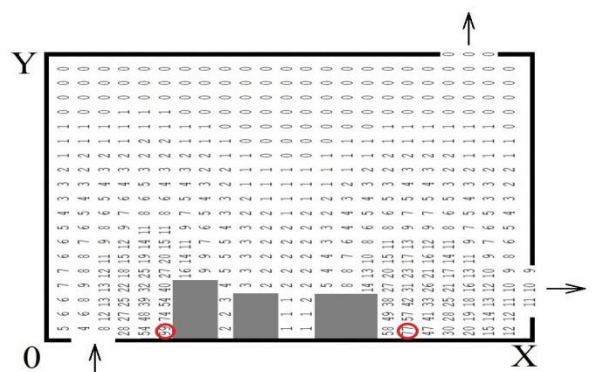


Рис. 5. Область забруднення в робочому приміщенні $t = 1,19\text{ с}$, $C_{\text{max}} = 0,98\text{ г/м}^3$

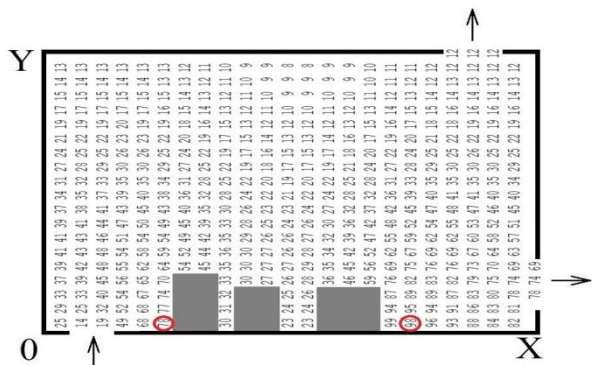


Рис. 6. Область забруднення в робочому приміщенні $t = 2,15$ с, $C_{max} = 0,28$ г/м³

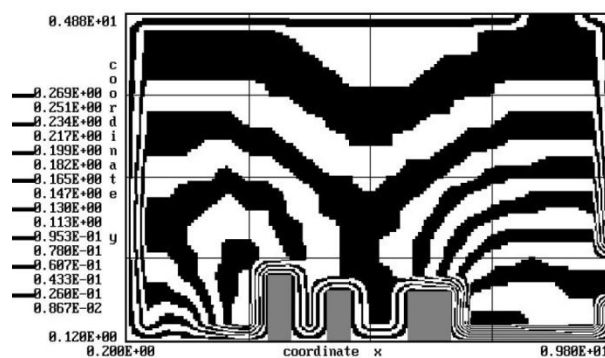


Рис. 10. Ізолінії концентрації домішки в робочому приміщенні $t = 2,39$ с

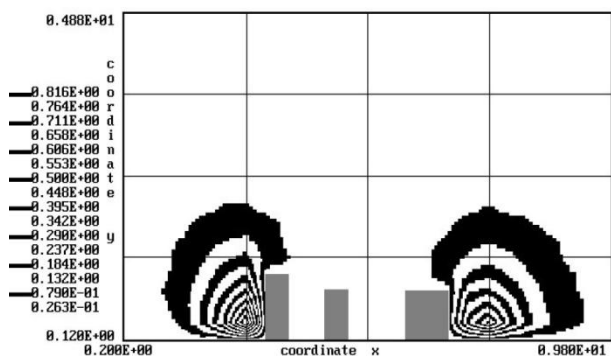


Рис. 7. Ізолінії концентрації домішки в робочому приміщенні $t = 0,49$ с



Рис. 8. Ізолінії концентрації домішки в робочому приміщенні $t = 1,09$ с

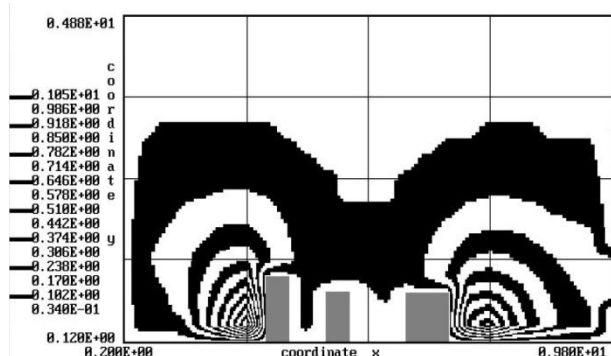


Рис. 9. Ізолінії концентрації домішки в робочому приміщенні $t = 1,49$ с

Як можна бачити з рисунків, спочатку, в приміщенні формуються дві області забруднення, які збільшуються в розмірах, з часом. До моменту часу $t = 1,49$ с ці області «об'єднуються» в одну велику область. Тобто, можна константувати, що при аварійному витoku усе приміщення буде наповнено токсичним газом. Концентрація токсичного газу буде значно перевищувати ГДК.

На рисунку 11 показана зміна максимальної концентрації хлору в приміщенні для різних моментів часу.

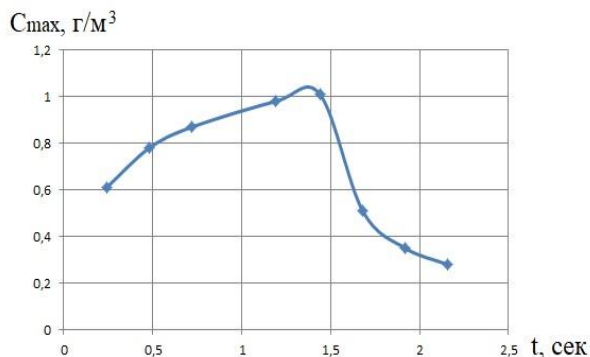


Рис. 11. Зміна максимальної концентрації хлору в приміщенні

Як можна бачити з рисунка 11, з часом має місце падіння концентрації хлору, що пов'язано з припиненням витoku хімічно небезпечної речовини. Різде зменшення концентрації хлору, майже втричі за 1,5 с після припинення дії джерела забруднення. Це обумовлено дією аварійної вентиляції. Час розрахунку складає 5 с.

Наукова новизна та практична цінність. Створена чисельна модель для прогнозування рівня забруднення повітря в

робочому приміщенні внаслідок емісії токсичного газу.

Модель базується на чисельному інтегруванні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища. Особливістю чисельної моделі є врахування основних фізичних факторів, що впливають на розповсюдження токсичного газу в приміщенні (наявність обладнання в приміщенні, положення отворів вентиляції, міста емісії токсичної речовини тощо) та швидкість розрахунку.

Висновки

1. Для аналізу та прогнозу процесу хімічного забруднення робочого

приміщення розроблена динамічна багатофакторна чисельна модель.

2. Особливістю чисельної моделі є можливість враховувати основні фізичні фактори, що впливають на формування областей забруднення в робочих приміщеннях.

3. Розроблена чисельна модель може бути використана для наукового обґрунтування параметрів аварійної вентиляції для швидкого зниження концентрації токсичної (або вибухонебезпечної) речовини в робочому приміщенні.

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. 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.
3. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
5. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. Москва : Химия, 1980. 288 с.
6. Huang Shuguang Experimental and numerical study on personalized ventilation coupled with displacement ventilation. *Thesis, National University of Singapore*. 2011. 140 p.
7. Min Zhang, Bin Zhao. Numerical simulation of air distribution's impact on indoor air quality. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 51. 2016. 6 p.
8. Yang Li. Numerical simulation and analysis for indoor air quality in different ventilation. *Health*. 2012. Vol. 4, № 12. Pp. 1352–1361.

REFERENCES

1. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V. and Yakubovska Z.N. *Prognozirovaniye urovnya zagryazneniya vozdushnoy sredy v pomeshcheniyakh* [Predicting the level of indoor air pollution]. Dnepropetrovsk : "Aktsept PP", 2015, 123 p. (in Russian).
2. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
3. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in environmental problems]. Moscow : Nauka Publ., 1982, 320 p. (in Russian).
4. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow : Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).
5. Elterman V.M. *Ventilyacziya khimicheskikh proizvodstv* [Ventilation of chemical production facilities]. Moscow : Khimiya publ., 1980, 288 p. (in Russian).
6. Huang Shuguang. Experimental and numerical study on personalized ventilation coupled with displacement ventilation. Thesis, National University of Singapore. 2011, 140 p.
7. Min Zhang and Bin Zhao. Numerical simulation of air distribution's impact on indoor air quality. *Chemical Engineering Transactions*. 2016, vol. 51, 6 p.
8. Yang Li. Numerical simulation and analysis for indoor air quality in different ventilation. *Health*. 2012, vol. 4, no. 12, pp. 1352–1361.

Надійшла до редакції: 11.10.2024.