

19. Beker Braian M., Cervellera Camila, De Vito Antonella and Musso Carlos G. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. ClinMed International Library : web-site. URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>

Надійшла до редакції: 03.05.2023.

УДК 519.6:504.054

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.13.949

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПРОЦЕСУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

БІЛЯЄВ М. М.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.,  
БІЛЯЄВА В. В.<sup>2</sup>, докт. техн. наук, доц.  
БЕРЛОВ О. В.<sup>3\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
КОЗАЧИНА В. А.<sup>4</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ЯКУБОВСЬКА З. М.<sup>5</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> 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](mailto:biliaiev.m@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

<sup>2</sup> Кафедра аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374 98 22, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

<sup>3\*</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, 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](mailto:berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

<sup>4</sup> 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: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup> Кафедра енергетики, Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 753-56-38, e-mail: [zinaidaya25@gmail.com](mailto:zinaidaya25@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-9893-3479

**Анотація. Постановка проблеми.** Розглядається задача визначення динаміки забруднення повітря в робочому приміщенні під час затікання в нього повітря, що містить хімічно небезпечну речовину. Особливість даної задачі полягає в тому, що на формування областей забруднення в приміщенні впливають багато факторів, особливо внутрішня геометрія (наявність технологічного обладнання в приміщенні, меблі тощо). Тому потрібно мати спеціалізовані математичні моделі, що дозволяють прогнозувати рівень хімічного забруднення повітря в приміщенні за даного типу забруднення. **Мета** – розроблення тривимірної чисельної моделі аеродинаміки повітряного потоку в приміщенні та масопереносу хімічно небезпечної речовини, що потрапляє в приміщення крізь систему вентиляції, для прогнозування ризику токсичного ураження працівників. **Методика.** Для моделювання процесу поширення хімічно небезпечної речовини в повітрі робочого приміщення використовується тривимірне рівняння конвективно-дифузійного переносу хімічно небезпечної речовини. Поле швидкості повітряного потоку в робочому приміщенні розраховується на базі моделі потенціального руху нестислої рідини. Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості використовуються дві скінченнорізницьові схеми. Для чисельного інтегрування тривимірного рівняння масопереносу домішки застосовуються метод розщеплення та скінченнорізницьові схеми. На кожному кроці розщеплення невідоме значення концентрації домішки обчислюється за явною формулою. Для проведення обчислювальних експериментів на базі розробленої чисельної моделі створено комп'ютерний код. **Наукова новизна.** Розроблено тривимірну чисельну модель для аналізу динаміки формування областей хімічного забруднення повітря в робочих приміщеннях у разі потрапляння домішки в приміщення скрізь систему вентиляції. Особливість моделі – врахування основних фізичних факторів, що впливають на формування областей забруднення та швидкість розрахунку. **Практична значущість.** Чисельна модель та комп'ютерний код, розроблений на її основі, дозволяють розв'язувати специфічні задачі, що виникають під час оцінювання ризику токсичного ураження працівників на хімічно небезпечних об'єктах. **Висновки.** Створено ефективну тривимірну чисельну модель та комп'ютерний код, що дозволяють прогнозувати рівень хімічного забруднення робочих приміщень за потрапляння токсичної речовини в приміщення крізь систему вентиляції. Наведено результати обчислювального експерименту.

**Ключові слова:** забруднення повітря в робочому приміщенні; тривимірна чисельна модель; хімічно небезпечна речовина; робоча зона

## MATHEMATICAL MODELING OF UNSTATIONARY AIR POLLUTION PROCESS

BILIAIEV M.M.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
BILIAIEVA V.V.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
BERLOV O.V.<sup>3\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
KOZACHYNA V.A.<sup>4</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
YAKUBOVSKA Z.M.<sup>5</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> 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](mailto:biliaiev.m@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

<sup>2</sup> Department of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Av., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

<sup>3\*</sup> Department of Life Safety, 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](mailto:berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

<sup>4</sup> Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup> Department of Power Engineering, Ukrainian State University of Chemical Technology, 8, Haharina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 753-56-38, e-mail: [zinaidava25@gmail.com](mailto:zinaidava25@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-9893-3479

**Abstract. Problem statement.** The task of determining the dynamics of air pollution in the working room when air containing a chemically hazardous substance flows into it is considered. The peculiarity of this problem is that the formation of pollution areas in the room is influenced by many factors, especially the internal geometry (the presence of technological equipment in the room, furniture, etc.). Therefore, it is necessary to have specialized mathematical models that allow predicting the level of chemical air pollution in the room for a given type of pollution. **The purpose of the article.** Development of a three-dimensional numerical model for indoor air flow aerodynamics and mass transfer of a chemically hazardous substance entering the room through the ventilation system to predict the risk of toxic damage to workers. **Methodology.** A three-dimensional equation of convective-diffusion transport for a chemically hazardous substance is used to model the process of a chemically hazardous substance spread in the working room air. The air flow velocity field in the working room is calculated on the basis of the model for the incompressible fluid potential motion. For the numerical integration of the Laplace equation for the velocity potential, two finite-difference schemes are used. The splitting method and finite-difference schemes are used for the numerical integration of the three-dimensional mass transfer equation of the impurity. At each splitting step, the determination of the unknown concentration of the impurity is carried out according to an explicit formula. A computer code was created to conduct computational experiments based on the developed numerical model. **Scientific novelty.** A three-dimensional numerical model has been developed to analyse the dynamics of the formation of chemical air pollution areas in workplaces when impurities enter the premises through the ventilation system. A feature of the model is the consideration of the main physical factors affecting the formation of pollution areas and the calculation speed. **Practical value.** The numerical model and the computer code developed on its basis allow solving specific problems that arise when assessing the risk of toxic damage to workers at chemically hazardous facilities. **Conclusions.** An effective three-dimensional numerical model and computer code have been created, which allow predicting the level of chemical contamination of working premises when a toxic substance enters the premises through the ventilation system. The results of the computational experiment are presented.

**Keywords:** air pollution in the workplace; three-dimensional numerical model; chemically dangerous substance; work area

### Постановка проблеми

Прогнозування забруднення повітря під час аварійних викидів – важлива проблема в галузі охорони праці, екологічної безпеки [1; 5; 6]. У рамках цієї проблеми можна виділити два класи задач. Перший клас – це прогнозування забруднення повітря на промислових майданчиках у разі

екстремальних ситуацій [6]. Другий – прогнозування забруднення повітря в робочих приміщеннях [1; 2; 7–10].

Теоретичний інструмент розв'язання задач першого класу – використання моделі Гаусса та чисельних моделей [4; 5]. Для аналізу процесів забруднення повітря всередині приміщень найбільш

розповсюдженням використання чисельних моделей [1; 10]. В рамках проблеми аварійного забруднення повітря на промислових підприємствах існує проблема прогнозування забруднення повітря в приміщеннях у разі затікання хімічно небезпечної речовини в них через систему вентиляції.

Для розв'язання цієї важливої задачі потрібно мати ефективні математичні моделі з метою визначення ризику токсичного ураження працівників, які перебувають у робочих приміщеннях будинків, біля яких стався викид хімічно небезпечних речовин.

**Мета статті** – розроблення тривимірної чисельної моделі для аналізу процесу забруднення повітря в робочому приміщенні у разі затікання в нього атмосферного повітря, що містить хімічно небезпечну речовину.

**Методика.** Для прогнозування динаміки забруднення повітря в робочому приміщенні за аварійного викиду хімічно небезпечної речовини використовують фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища. Так, поле швидкості повітряного потоку визначається шляхом чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості:

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

де  $P$  – потенціал швидкості.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку визначаються так:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}; \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (2)$$

Динаміка зміни концентрації домішки моделюється на базі наступного рівняння масопереносу домішки:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_g)C}{\partial z} + \sigma C = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ & \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \delta(z-z_i) \end{aligned} \quad (3)$$

Крайові умови для рівняння (1) та рівняння (3) розглянуті в [1; 2].

**Чисельна модель.** Розв'язок моделювальних рівнянь (1), (3) можливо отримати лише чисельним шляхом. Для цього застосовується метод скінченних різниць. Чисельне інтегрування здійснюється на прямокутній різницевій сітці.

Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу (3) здійснюється таке його розщеплення [2; 5]:

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

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (w-w_g)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C = \quad (4)$$

$$= \sum Q_i(t) \delta(x-x_i(t)) \delta(y-y_i(t)) \delta(z-z_i(t)).$$

Для побудови чисельної моделі тут і далі буде використовуватися позначка  $w = w - w_g$ .

Далі здійснюються наступні перетворення [2]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+C}{\partial x} + \frac{\partial u^-C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+C}{\partial y} + \frac{\partial v^-C}{\partial y},$$

$$\frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial w^+C}{\partial z} + \frac{\partial w^-C}{\partial z}, \quad \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial w^+C}{\partial z} + \frac{\partial w^-C}{\partial z},$$

де

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2};$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2};$$

$$w^+ = \frac{w + |w|}{2}; \quad w^- = \frac{w - |w|}{2}.$$

На наступному етапі виконується апроксимація похідних за формулами [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}, \\ -\mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} &= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2}, \\ -\mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} &= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) &\approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2}, \\ -\mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} &= M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}, \\ -\mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} &= M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial w^+ C}{\partial z} &\approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial w^- C}{\partial z} &\approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1}. \end{aligned}$$

Далі будується наступна схема розщеплення для першого рівняння системи (4) [2]:

– крок 1:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k = M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n.$$

– крок 2:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} = M_{xx}^+ C^n + M_{xx}^- C^{n+1}.$$

Друге рівняння із системи (4) записується таким чином:

– крок 1:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_y^+ C^k = M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n,$$

– крок 2:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_y^- C^{n+1} = M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^{n+1}.$$

Третє рівняння з системи (4) має вигляд:

– крок 1:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_z^+ C^k = M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n,$$

– крок 2:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_z^- C^{n+1} = M_{zz}^+ C^n + M_{zz}^- C^{n+1}.$$

На кожному кроці розщеплення невідоме значення концентрації обчислюється за явною формулою.

Різницєва схема для чисельного інтегрування останнього рівняння з (4) має вигляд (метод Ейлера) [4]:

$$\begin{aligned} C^{n+1} &= C^n - dt * \sigma C + \\ &+ dt * \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i(t)). \end{aligned}$$

Для чисельного розв'язання рівняння Лапласа (1) використовується ідея встановлення розв'язку за часом. Для цього це рівняння записується у вигляді [4]:

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

де  $t$  – фіктивний час.

Значення потенціалу швидкості комірки розраховується за формулою (модель 1) [4]:

$$\begin{aligned} P_{ijk}^{n+1} &= P_{ijk}^n + \Delta t \frac{P_{i+1,j,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ &+ \Delta t \frac{P_{i,j+1,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ &+ \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Процес розв'язку припиняється, коли

$$\left| P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n \right| \leq \varepsilon, \quad (7)$$

де  $n$  – номер ітерації,  $\varepsilon$  – мале число.

Значення швидкості повітря (компонент) визначається на сторонах кожної комірки:

$$u_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x},$$

$$v_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y},$$

$$w_{i,j,z} = \frac{P_{i,j,z} - P_{i,j,z-1}}{\Delta z}.$$

На базі визначеного поля швидкості потоку розраховується процес поширення домішки в робочих зонах. Для контролю розрахунків також застосовується ще одна різницева схема чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості – це локально-одновимірна різницева схема Лібмана. Для побудови чисельної моделі аеродинаміки на базі методу цієї схеми здійснюється геометричне розщеплення рівняння (5) таким чином:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}. \quad (10)$$

Далі, для обчислення невідомого значення  $P$  на базі цих одновимірних рівнянь використовуються такі залежності:

– для рівняння (8):

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

– для рівняння (9):

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

– для рівняння (10):

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^n + \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j,k}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}.$$

Розрахунок на базі цих різницевоїх залежностей закінчується за виконання умови (7).

Здійснено програмну реалізацію розробленої чисельної моделі за допомогою алгоритмічної мови FORTRAN.

**Результати.** Розроблена чисельна модель використана для розв’язання наступної задачі. Розглядається робоче приміщення, що має розміри  $22 \times 12 \times 4$  м (рис. 1).

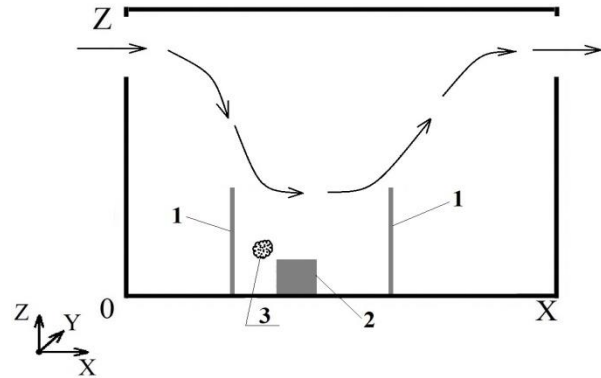


Рис. 1. Розрахункова схема: 1 – екрани; 2 – обладнання; 3 – робоча зона

У приміщення, в момент часу  $t = 0$ , починає надходити атмосферне повітря, що містить аміак, який потрапив в атмосферу внаслідок аварії на підприємстві. Всередині робочого приміщення міститься робоча зона, огорожена екранами. Ставиться задача визначити час небезпечного забруднення повітря в робочій зоні. Концентрація аміаку в повітрі, що потрапляє в робоче приміщення, прийнята 100 од. (безрозмірне значення).

На рисунках показано динаміку формування області забруднення всередині робочого приміщення. Поле концентрації аміаку наведено в перерізі  $y = 6$  м. Значення концентрації аміаку показане в безрозмірному вигляді. Кожне число на рисунку дає значення концентрації аміаку у відсотках від максимального її значення ( $C_{max} = 100$ ).

З рисунків 2–4 можна бачити, що екрани, розташовані в робочому приміщенні, впливають на деформацію області забруднення. Область хімічного забруднення формується як перед екранами, так і в застійній зоні між ними. Аналіз полів концентрації, наведених на рисунках 2–4, показує, що область хімічного забруднення повітря всередині робочого приміщення дуже швидко зростає.

Екрани, які огорожують робочу зону, де розташоване обладнання, відіграють роль

локальної перешкоди. Але забруднені повітряні маси потрапляють у робочу зону шляхом обтікання цих перешкод та формують біля обладнання області небезпеки.

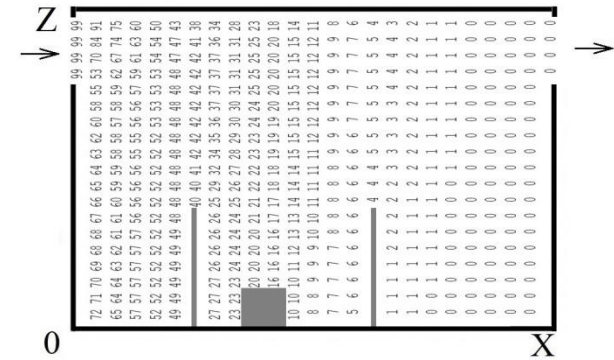


Рис. 2. Область забруднення в робочому приміщенні,  $t = 6,29$  с

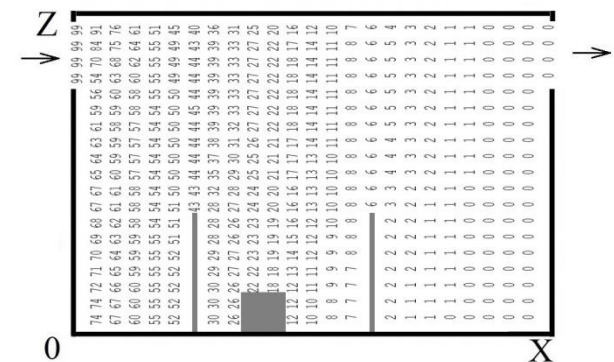


Рис. 3. Область забруднення в робочому приміщенні,  $t = 6,79$  с

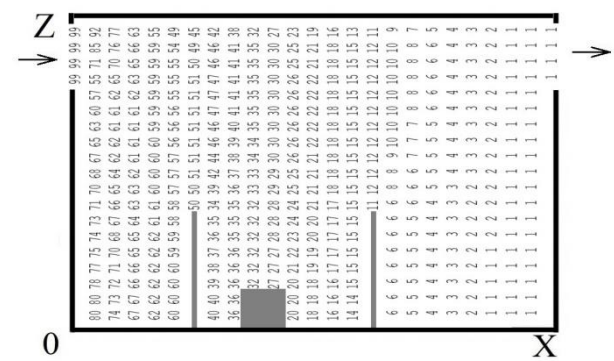


Рис. 4. Область забруднення в робочому приміщенні,  $t = 8,69$  с

У таблиці наведено прогнозне значення концентрації аміаку в робочій зоні, якщо прийняти, що в робоче приміщення потрапляє повітря, яке містить аміак із концентрацією  $150 \text{ мг/м}^3$ .

Результати прогнозу, наведені в таблиці, свідчать, що в робочій зоні швидко формується область хімічного забруднення,

вкрай небезпечна для працівників. Так, вже за 5 с після початку потрапляння забрудненого повітря в приміщення, концентрація аміаку в робочій зоні перевищить  $\text{ГДК} = 20 \text{ мг/м}^3$ .

Таблиця

Зміна концентрації аміаку в робочій зоні із часом

Час, с	Концентрація аміаку, $\text{мг/м}^3$
4,8	21
5,2	25
6,1	31
7,5	45
8,7	54

Зазначимо, що час розрахунку складає 10 секунд.

**Наукова новизна та практична цінність.** Наведено тривимірну чисельну модель для прогнозування хімічного забруднення повітря в робочому приміщенні у разі потрапляння хімічно небезпечної речовини в приміщення через систему вентиляції.

Розв'язання задачі базується на чисельному інтегруванні рівняння аеродинаміки та рівняння масопереносу. Особливість побудованої чисельної моделі така:

- 1) можливість урахування складної геометрії, що має місце в робочому приміщенні;
- 2) врахування найбільш суттєвих фізичних факторів, що зумовлюють формування областей хімічного забруднення;
- 3) швидкість розрахунку.

Модель може бути використана для оцінювання ризику токсичного ураження працівників усередині робочих приміщень у випадку можливих екстремальних ситуацій на підприємствах.

**Висновки.**

1. Запропоновано тривимірну чисельну модель аеродинаміки та масопереносу хімічно небезпечних речовин у робочих приміщеннях для аналізу формування областей хімічного забруднення в робочих зонах та оцінювання ризику токсичного ураження працівників.

2. Розроблена математична модель дозволяє врахувати під час обчислювального експерименту різні перешкоди, що містяться всередині робочого приміщення та впливають на

формування поля швидкості повітряного потоку і форму області забруднення.

3. Запропонована CFD модель буде корисна для розроблення Плану ліквідації аварійної ситуації, оскільки дозволяє оперативно отримати прогнозні дані.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Беляева В. В., Якубовская З. Н. Прогнозирование уровня загрязнения воздушной среды в помещениях. Днепро : 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. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Kalashnikov I. Numerical Simulation of Toxic Chemical Transport after Accidental Release at Chemical Plant. *Romanian Journal of Information Science and Technology*. 2020. Vol. 23. Pp. 3–23.
6. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool. *ALOHA Software, Quality of Life*. № 9. 2018. Pp. 38–45.
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. Savytskyi M. V., Limam K., Adegov A. V., Kudryavcev A. P. Comparaison des systèmes de chauffage radiant dans les locaux du batiment a faible hauteur. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. Вып. 68. 2013. С. 334–338.
9. Xudong Yang, Jelena Srebric, Xianting Li, Guoqing He. Performance of three air distribution systems in VOC removal from an area source. *Building and Environment*. Vol. 39. 2004. Pp. 1289–1299.
10. Yang Li. Numerical simulation and analysis for indoor air quality in different ventilation. *Health*. Vol. 4, № 12. 2012. 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]. Dnipropetrovsk : Aktsent PP Publ., 2015, 123 p. (in Russian).
2. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khurch 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 the environmental problem]. 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. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O. and Kalashnikov I. Numerical Simulation of Toxic Chemical Transport after Accidental Release at Chemical Plant. *Romanian Journal of Information Science and Technology*. 2020, vol. 23, pp. 3–23.
6. Ilic P., Ilic S. and Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software. *Quality of Life*. No. 9, 2018, pp. 38–45.
7. Min Zhang and Bin Zhao. Numerical simulation of air distribution's impact on indoor air quality. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 51, 2016, 6 p.
8. Savytskyi M.V., Limam K., Adegov A.V. and Kudryavcev A.P. Comparaison des systèmes de chauffage radiant dans les locaux du batiment a faible hauteur. *Stroitelstvo. Materialovedeniye. Mashinostroyeniye. Seriya: Sozdaniye vysokotekhnologicheskikh ekokompleksov v Ukraine na osnove kontseptsii sbalansirovannogo (ustoychivogo) razvitiya* [Construction. Materials Science. Engineering. Series: Creation of high-tech eco-complexes in Ukraine based on the concept of balanced (sustainable) development]. Vol. 68, 2013, pp. 334–338.
9. Xudong Yang, Srebric Jelena, Xianting Li and Guoqing He. Performance of three air distribution systems in VOC removal from an area source. *Building and Environment*. Vol. 39, 2004, pp. 1289–1299.
10. Yang Li. Numerical simulation and analysis for indoor air quality in different ventilation. *Health*. Vol. 4, no. 12, 2012, pp. 1352–1361.

Надійшла до редакції: 12.05.2023.