

УДК 519.6:504.3.054

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.21.908

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ МЕТОДОМ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

БІЛЯЄВ М. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
БЕРЛОВ О. В.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
КОЗАЧИНА В. А.³, *канд. техн. наук, доц.*,
НОЧВАЙ В. І.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
РУСАКОВА Т. І.⁵, *докт. техн. наук, проф.*

¹ Кафедра гідравліки та водопостачання, 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, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

^{2*} 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, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

³ Кафедра гідравліки та водопостачання, 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, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁴ Центр інновацій, Київський академічний університет, бул. Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна, тел. +38 (095) 010-45-94, e-mail: nochvai@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0288-8675

⁵ Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 18, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 394-52-14, e-mail: rusakovati1977@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5526-3578

Анотація. *Постановка проблеми.* Розглядається задача оцінювання рівня хімічного забруднення атмосферного повітря при виникненні екстремальної ситуації, що приводить до розливу гептилу на території промислового об'єкту. Здійснено аналіз формування зон забруднення як на промислових майданчиках, так і в сельбищній зоні, що розташована поблизу промислового об'єкту. Для рішення такої задачі потрібно створення багатофакторних математичних моделей, які дозволяють оперативно визначати області забруднення, що формуються під час екстремальної ситуації. **Мета роботи:** створити комп'ютерну модель для оперативного аналізу областей забруднення, що формуються під час аварійної емісії в атмосферу хімічно небезпечних речовин. **Методика.** Комп'ютерну модель створено на базі чисельної моделі, що є різницевим аналогом багатофакторного кінематичного рівняння масопереносу домішки в атмосферному повітрі. Рівняння масопереносу враховує тривимірне поле швидкості вітру, атмосферну дифузію, інтенсивність викиду хімічно-небезпечної речовини в повітря. Для чисельного інтегрування тривимірного рівняння масопереносу використовується чотирикорова кінцево-різницева схема розщеплення. Визначення концентрації хімічно-небезпечної речовини на кожному кроці розщеплення реалізується за явною формулою. Для розрахунку інтенсивності емісії хімічно-небезпечної речовини від зони аварійного розливу використовується емпірична залежність. **Наукова новизна.** Розроблено чисельну модель та здійснено її програмну реалізацію для оперативного аналізу формування областей аварійного забруднення в атмосфері. Модель враховує комплекс факторів, що впливають на процес поширення домішки в атмосфері. **Практична значущість.** Розроблено програму для розрахунку динаміки забруднення атмосферного повітря на базі запропонованої чисельної моделі. Це дозволяє методом обчислювального експерименту аналізувати наслідки аварійних розливів на території хімічно-небезпечних об'єктів. **Висновки.** Створено ефективний інструмент для оперативного аналізу рівня забруднення атмосферного повітря внаслідок емісії хімічно небезпечних речовин. Представлені результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: аварійне забруднення атмосфери; гептил; чисельне моделювання; аварійний розлив

ANALYSIS OF THE ATMOSPHERIC AIR POLLUTION DYNAMICS USING THE METHOD OF NUMERICAL SIMULATION

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BERLOV O.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOZACHYNA V.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
NOCHVAI V.I.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
RUSAKOVA T.I.⁵, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

¹ Department of Hydraulics and Water Supply, 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, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

^{2*} 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, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

³ Department of Hydraulics and Water Supply, 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, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁴ Innovation Center Kyiv Academic University, 36, Academician Vernadsky Boul., Kyiv, 03142, Ukraine, tel. +38 (095) 010-45-94, e-mail: nochvai@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0288-8675

⁵ Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (066) 394-52-14, e-mail: rusakovati1977@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5526-3578

Abstract. Problem statement. The task of assessing the level of atmospheric air chemical pollution in the case of an extreme situation resulting in a heptyl spill on the territory of industrial facility is considered. An analysis of the pollution zones formation both at industrial sites and in the residential area located near the industrial facility is conducted. To solve such a problem, it is necessary to develop multifactor mathematical models that allow for the rapid determination of the pollution areas formed in an extreme situation. **The purpose of the article.** To develop a computer model for operational analysis of pollution areas formed during the emergency emission of chemically hazardous substances into the atmosphere. **Methodology.** The computer model was developed on the basis of a numerical model, which is a differential analogue of the multifactor kinematic equation for impurities mass transfer in atmospheric air. The mass transfer equation takes into account the three-dimensional field of wind speed, atmospheric diffusion, and the intensity of the chemically dangerous substance release into the air. A four-step finite-difference splitting scheme is used for numerical integration of the three-dimensional mass transfer equation. Determination of the chemically dangerous substance concentration at each cleavage step is implemented according to an explicit formula. An empirical dependence is used to calculate the emission intensity of a chemically hazardous substance from the emergency spill zone. **Scientific novelty.** A numerical model was developed and its software implementation was conducted for the operational analysis of the formation of accidental pollution areas in the atmosphere. The model takes into account a complex of factors affecting the process of impurity propagation in the atmosphere. **Practical value.** A program was developed for calculating the dynamics of atmospheric air pollution based on the proposed numerical model. This makes it possible to analyze the consequences of emergency spills on the territory of chemically hazardous objects by the method of a computational experiment. **Conclusions.** An effective tool for operational analysis of the atmospheric air pollution level due to the emission of chemically hazardous substances is created. The results of the computational experiment are presented.

Keywords: *emergency atmospheric pollution; heptyl; numerical modeling; emergency spill*

Постановка проблеми. На території України існує значна кількість підприємств, що використовують або зберігають на своїй території хімічно-небезпечні речовини в значних об'ємах (аміак, хлор, гептил тощо). Екстремальні ситуації на території таких об'єктів можуть привести до викиду, розливу цих речовин, що створює значну загрозу як робітникам на підприємстві, так і мешканцям прилеглих сельбищних зон [4; 6]. Тому, дуже важливою задачею є оцінювання масштабу такого забруднення з метою вирішення двох важливих задач – аналіз областей забруднення з точки зору рівня безпеки та використання подібних даних для розробки стратегії захисту людей від токсичного ураження.

Аналіз останніх досліджень. Основою для визначення зон хімічного забруднення в Україні є методика ОНД-86 [2]. Методика надає можливість швидко розрахувати області забруднення, але використовує

низку параметрів, що не мають фізичного сенсу. Тому на даний час враховується, що така методика не відповідає сучасним вимогам, щодо математичних моделей, які розробляються для аналізу зон хімічного зараження при аварійних ситуаціях. Більш «потужними» математичними моделями є аналітичні моделі та моделі Гаусса [1; 3; 7; 10; 12]. Дані моделі враховують основні фізичні фактори, що впливають на формування областей забруднення. Але дані моделі не дозволяють враховувати зміну швидкості повітря з висотою та цей вплив на формування областей забруднення. Сучасним напрямом є розробка чисельних моделей, що мають дуже широкий діапазон використання та які дозволяють отримати зони хімічного забруднення практично для будь-яких аварійних ситуацій [4; 6; 11; 13].

Мета статті. Створення тривимірної математичної моделі та комп'ютерного коду для оцінювання областей хімічного

забруднення атмосфери, що формуються при аварійних розливах.

Опис об'єкту. Розглядається аварійний розлив гептилу на заводі «Південмаш». У 2016 році на тимчасове зберігання Міноборони передало «Південмашу» 95 тон гептилу, у тому числі 37 тон – некондиційного. Строк експлуатації резервуарів, де зберігається гептил, вичерпано. За відсутності коштів умови зберігання погіршуються і вже не можуть надійно забезпечувати необхідний рівень безпеки працівників підприємства та громадян міста. Тому виникає важлива задача прогнозування наслідків можливого аварійного розливу цієї небезпечної речовини на території підприємства.

Методика. Для прогнозування динаміки забруднення атмосферного повітря у випадку екстремальної ситуації, що приводить до розливу хімічно небезпечних речовин, буде використовуватися рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки, що виражає закон збереження маси для хімічно небезпечної речовини, що потрапила в атмосферу [3; 9]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ & + Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) \cdot \delta(z - z_i), \end{aligned} \quad (1)$$

де C – масова концентрація домішки в атмосфері; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти турбулентної дифузії; $u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)$ – компоненти вектору швидкості повітряного потоку; Q – кількість домішки, що потрапляє в атмосферу з часом; $\delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) \cdot \delta(z - z_i)$ – позначка дельта-функції Дірака; x_i, y_i, z_i – координати точкового джерела викиду домішки; t – час.

Рівняння (1) доповнюється такими граничними умовами [9]:

1. $C = 0$ – границя, де потік «входить» в область дослідження.

$$2. \left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = 0,$$

на границі «виходу» потоку.

3. поверхня $z = 0$ – є твердою; на цій границі реалізується умова непротікання. Умова $C = 0$ реалізується на площині $z = H$, де H – висота розрахункової області.

Оскільки рівняння (1) включає час як параметр, ставиться така початкова умова: $C = 0$ для $t = 0$.

Вплив атмосферної дифузії на поширення домішки виражається за допомогою коефіцієнтів μ_x, μ_y, μ_z . Значення цих коефіцієнтів розраховується таким чином [2; 3]:

$$\mu_x \approx \mu_y,$$

$$\mu_y = k_0 \cdot u,$$

$$\mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m,$$

де $k_0 = 0,1 \div 1$ м; $k_1 = 0,1 \div 0,2$ м²/с, $m \approx 1$ – параметр.

Зміна швидкості вітру з висотою у розраховується за формулою:

$$u = u_1 \cdot \left(y / y_1 \right)^n,$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті y_1 , $n = 0,16$.

Таким чином, для прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря при екстремальній ситуації, що приводить до викиду хімічно-небезпечних речовин в атмосферу, потрібно розв'язати рівняння (1) з відповідними краєвими умовами та параметрами, що відповідають стану атмосфери.

Методика рішення. Чисельне інтегрування рівняння (1) здійснюється за допомогою методу фізичного розщеплення та використання кінцево-різницевої схем. Має місце наступне рівняння [9]:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^+ \overset{1}{C}) + \frac{1}{4} \sigma \overset{1}{C} = \\ & = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\mu}_{1x} \frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\mu}_{1y} \frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\mu}_{1z} \frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial z}) \right); \\ & \frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^- \overset{2}{C}) + \frac{1}{4} \sigma \overset{2}{C} = \\ & = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\mu}_{2x} \frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\mu}_{2y} \frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\mu}_{2z} \frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial z}) \right); \\ & \frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^- \overset{3}{C}) + \frac{1}{4} \sigma \overset{3}{C} = \\ & = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\mu}_{2x} \frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\mu}_{2y} \frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\mu}_{2z} \frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial z}) \right) \\ & \frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^+ \overset{4}{C}) + \frac{1}{4} \sigma \overset{4}{C} = \\ & = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\mu}_{1x} \frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\mu}_{1y} \frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\mu}_{1z} \frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial z}) \right); \\ & \frac{\partial \overset{5}{C}}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \delta(z-z_i). \end{aligned} \right. \quad (2)$$

В системі рівнянь (2) використовуються позначення:

$$\begin{aligned} \vec{V}^+ &= \{u^+, v^+, w^+\}, \quad \vec{V}^- = \{u^-, v^-, w^-\}, \\ u^+ &= \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}, \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \\ v^- &= \frac{v - |v|}{2}, \quad w^+ = \frac{w + |w|}{2}, \quad w^- = \frac{w - |w|}{2}, \\ \bar{\mu}_{1x} &= \frac{\mu}{1 + \frac{u^+ \Delta x}{\mu}}, \quad \bar{\mu}_{1y} = \frac{\mu}{1 + \frac{v^+ \Delta y}{\mu}}, \\ \bar{\mu}_{1z} &= \frac{\mu}{1 + \frac{w^+ \Delta z}{\mu}}, \quad \bar{\mu}_{2x} = \frac{\mu}{1 - \frac{u^- \Delta x}{\mu}}, \\ \bar{\mu}_{2y} &= \frac{\mu}{1 - \frac{v^- \Delta y}{\mu}}, \quad \bar{\mu}_{2z} = \frac{\mu}{1 - \frac{w^- \Delta z}{\mu}}. \end{aligned}$$

Кожне рівняння системи (2) описує один напрямок переносу збурень через грані різничевої комірки. Різницевий аналог системи (2) записується таким чином [9]:

– перший крок:

$$\frac{\overset{1}{C}_{ijk}^{n+1} - \overset{1}{C}_{ijk}^n}{\Delta t} + (L_x^+ + L_y^+ + L_z^+) (\overset{1}{C}_{ijk}^{n+1} \xi + \overset{1}{C}_{ijk}^n (1 - \xi)) + \sigma \overset{1}{C}_{ijk}^{n+1/2} = \frac{1}{4} \left[(M_{xx}^+ + M_{yy}^+ + M_{zz}^+) \overset{1}{C}_{ijk}^{n+1} + (M_{xx}^- + M_{yy}^- + M_{zz}^-) \overset{1}{C}_{ijk}^n \right], \quad (3)$$

де $\xi \in [0, 1]$ – параметр

$$\overset{1}{C}_{ijk}^{n+1/2} = \frac{\overset{1}{C}_{ijk}^{n+1} + \overset{1}{C}_{ijk}^n}{2};$$

– другий крок:

$$\frac{\overset{2}{C}_{ijk}^{n+1} - \overset{2}{C}_{ijk}^n}{\Delta t} + (L_x^- + L_y^- + L_z^-) (\overset{2}{C}_{ijk}^{n+1} \xi + \overset{2}{C}_{ijk}^n (1 - \xi)) + \sigma \overset{2}{C}_{ijk}^{n+1/2} = \frac{1}{4} \left[(M_{xx}^- + M_{yy}^- + M_{zz}^-) \overset{2}{C}_{ijk}^{n+1} + (M_{xx}^+ + M_{yy}^+ + M_{zz}^+) \overset{2}{C}_{ijk}^n \right]. \quad (4)$$

– третій крок – використовується

різницеве рівняння (4);

– четвертий крок – застосовується диференційне рівняння (3);

– п'ятий крок записується як [8]:

$$\frac{\overset{5}{C}_{ijk}^{n+1} - \overset{5}{C}_{ijk}^n}{\Delta t} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i(t^{n+1/2}) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \delta(z-z_i)}{\Delta x \Delta y \Delta z}. \quad (5)$$

В дискретному виді дельта-функція Дірака «розмазується» по об'єму різничевої комірки із збереженням сумарної кількості забруднення, дельта-функція дорівнює нулю скрізь, крім комірок, де розташоване i -те джерело забруднення.

В різницевих рівняннях використовуються такі оператори:

$$L_x^+ = \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}}{2\Delta x},$$

$$L_x^- = \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta x},$$

$$L_y^+ = \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{ijk} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}}{2\Delta y},$$

$$L_y^- = \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta y},$$

$$L_z^+ = \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{ijk} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}}{2\Delta x},$$

$$L_z^- = \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta z}.$$

Якщо розглядається випарювання хімічно-небезпечної речовини від зони аварійного розливу, то для визначення кількості домішки, що випарюється, використовується емпірична формула [5]:

$$Q_w = (5,83 + 4,1V) P_H \sqrt{M},$$

де Q_w – кількість домішки, що потрапляє в атмосферу з часом, V – локальна швидкість повітря біля вільної поверхні зони розливу; P_H – тиск насиченої пари рідини; M – молекулярна маса рідини.

Здійснено програмну реалізацію розробленої чисельної моделі.

Результати. На базі розробленої чисельної моделі здійснено розрахунок зон аварійного забруднення атмосфери у випадку розливу гептилу на території заводу «Південмаш». Розглядалися модельні задачі: аварійний розлив гептилу біля промислової будівлі (рис.1). В першому сценарії, швидкість вітру складала $u_1 = 8 \text{ м/с}$, напрям вітру – східно-південний.



Рис. 1. Область дослідження: 1 – будівля, біля якої мав місце аварійний розлив

Розміри розрахункової області: $L_x = 1 \text{ км}$, $L_y = 0,6 \text{ км}$. Зони хімічного забруднення показані далі на рисунках 2–4 (рівень $z = 5 \text{ м}$) для різних моментів часу.



Рис. 2. Зона хімічного забруднення, $t = 3,8 \text{ с}$
 1 – $C = 56 \text{ мг/м}^3$; 2 – $C = 34 \text{ мг/м}^3$; 3 – $C = 17 \text{ мг/м}^3$



Рис. 3. Зона хімічного забруднення, $t = 58 \text{ с}$
 1 – $C = 51 \text{ мг/м}^3$; 2 – $C = 29 \text{ мг/м}^3$; 3 – $C = 15 \text{ мг/м}^3$



Рис. 4. Зона хімічного забруднення, $t = 97 \text{ с}$
 1 – $C = 47 \text{ мг/м}^3$; 2 – $C = 21 \text{ мг/м}^3$; 3 – $C = 12 \text{ мг/м}^3$

В другому сценарії, швидкість вітру складала $u_1 = 4 \text{ м/с}$, напрям вітру – південно-північний. В даному сценарії аналізувалася динаміка формування областей забруднення в селбищній зоні, яка розташовується біля промислового об'єкту.

Розміри розрахункової області: $L_x = 8 \text{ км}$, $L_y = 4,5 \text{ км}$. Зони хімічного забруднення показані далі на рисунках 5–8 (рівень $z = 5 \text{ м}$) для різних моментів часу.

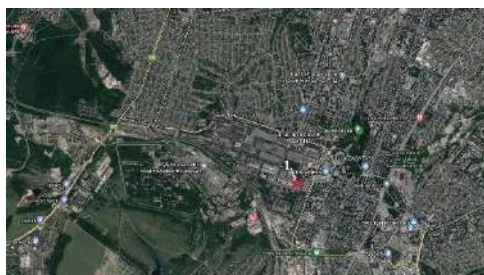


Рис. 5. Область дослідження: 1 – будівля, біля якої розглядається аварійний розлив



Рис. 6. Зона хімічного забруднення, $t = 321$ с
1 – $C = 32$ мг/м³; 2 – $C = 18$ мг/м³; 3 – $C = 10$ мг/м³



Рис. 7. Зона хімічного забруднення, $t = 854$ с
1 – $C = 29$ мг/м³; 2 – $C = 16$ мг/м³; 3 – $C = 9$ мг/м³



Рис. 8. Зона хімічного забруднення, $t = 995$ с:
1 – $C = 24$ мг/м³; 2 – $C = 13$ мг/м³; 3 – $C = 6$ мг/м³

На рисунках 2–4 та 6–8 продемонстровано, яким чином розвивається область хімічного забруднення у випадку аварійного розливу небезпечної речовини. Чітко можна побачити, яким чином область забруднення «накриває» значну частину сельбищної зони та промислового майданчику, що створює очевидну загрозу токсичного ураження людей.

Відзначимо, що час розрахунку складає 5с.

Наукова новизна та практична цінність. Запропонована ефективна чисельна модель та комп'ютерна програма, що дозволяє визначати динаміку формування областей хімічного забруднення атмосфери під час аварійного розливу хімічно-небезпечних речовин. Чисельна модель враховує основні фізичні фактори, що обумовлюють поширення забруднюючих речовин в атмосфері. Ця модель може бути використана під час розроблення плану ліквідації аварійної ситуації на хімічно-небезпечному об'єкті.

Висновки.

1. За допомогою розробленої математичної моделі та створеного коду здійснено прогнозування процесу забруднення атмосфери у випадку аварійного розливу гептилу на території промислового об'єкту.

2. Результати розрахунку показали, що запропонована математична модель дозволяє на базі стандартної вхідної інформації отримати дані, що до визначення розмірів та інтенсивності областей хімічного забруднення, які формуються в атмосфері з часом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Басманов А. Е., Говаленков С. С. Оценка концентрации опасных химических веществ в воздухе при непрерывной активности источника. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2010. Вип. 12. С. 21–27.
2. Берлянд М. Е. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 273 с.
3. Бруязкий Е. В. *Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов*. Киев: Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.
4. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Калашніков І. В. Математичне моделювання затікання токсичного газу у приміщення при аварії на промисловому майданчику. *Математичне моделювання*. 2018. № 2 (39). С. 95–101.

5. Мацак В. Г., Хоцянов Л. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве. Москва : Медгиз, 1959. 231 с.
6. Пшинько А. Н., Беляев Н. Н., Машихина П. Б. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях. Днепропетровск : Нова ідеологія, 2011. 166 с.
7. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Москва : Мир, 1980. 412 с.
8. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
9. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
10. Anthony Michael Barret. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense : Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectivness : dissertation. Pittsburg, Pennsylvania, USA, 2009. 123 p.
11. Biliaiev M. "Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. 2012. Pp. 87–91.
12. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software. *Quality of Life*. Vol. 9. 2018. Pp. 38–45.
13. Lacomme J.-M., Truchot D., Duplantier S. Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 2017. Pp. 1–5.

REFERENCES

1. Basmanov A.Ye. and Govalenkov S.S. *Otsenka kontsentratsii opasnykh khimicheskikh veshchestv v vozdukh pri nepreryvnoy aktivnosti istochnika* [Estimation of the concentration of hazardous chemicals in the air with continuous source activity]. *Problemi nadzvichaynykh situatsiy* [Problems of Emergency Situations]. 2010, vol. 12, pp. 21–27. (in Russian).
2. Berlyand M.Ye. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Forecasting and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad : Gidrometeoizdat Publ., 1985, 273 p. (in Russian).
3. Bruyaczkyj Ye.V. *Teoriya atmosfernoj diffuzii radioaktivnykh vubrosov* [Theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Kyiv : Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine, 2000, 443 p. (in Russian).
4. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V. and Kalashnikov I.V. *Matematychni modelyuvannya zatikannya toksychnoho hazu u prymishchennya pry avariyyi na promyslovomu maydanchyku* [Mathematical modeling of toxic gas leakage into the premises during an accident on an industrial site]. *Matematychni modelyuvannya* [Mathematical Modeling]. 2018, vol. 2 (39), pp. 95–101. (in Ukrainian).
5. Matsak V.G. and Khotsyanov L.G. *Gigienicheskoe znachenie skorosti isparennya i davleniya para toksicheskikh veshchestv, primenyayemykh v proizvodstve* [Hygienic significance of the evaporation rate and vapor pressure of toxic substances used in production]. Moscow : Medgiz Publ., 1959, 231 p. (in Russian).
6. Pshinko A.N., Belyayev N.N. and Mashihina P.B. *Modelirovanie zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennykh avariyyah : monografiya* [Modeling of atmospheric pollution during technogenic accidents : monograph]. Dnipropetrovsk : Nova Ideologiya Publ., 2011, 166 p. (in Russian).
7. Roache P.J. *Vychislitel'naia gidrodinamika* [Computational Fluid Dynamics]. Moscow : Mir Publ., 1980, 412 p. (in Russian).
8. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow : Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).
9. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
10. Anthony Michael Barret. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense : Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectivness : dissertation. Pittsburg, Pennsylvania, USA, 2009, 123 p.
11. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. 2012, pp. 87–91.
12. Ilic P., Ilic S. and Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software. *Quality of Life*. Vol. 9, 2018, pp. 38–45.
13. Lacomme J.M., Truchot D. and Duplantier S. Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 2017, pp. 1–5.

Надійшла до редакції: 20.11.2022.