

УДК 504.5:614.842

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.281221.14.810

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ПРИ ЕКСТРЕМАЛЬНІЙ СИТУАЦІЇ НА ХЛОРОПЕРЕЛИВНІЙ СТАНЦІЇ

БЛЯЄВ М. М.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,

БЕРЛОВ О. В.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,

ГУБІН О. І.^{3*}, канд. техн. наук, доц.,

ГУНЬКО О. Ю.⁴, канд. техн. наук, доц.,

МАШИХІНА П. Б.⁵, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра гідравліки та водопостачання, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпро, 49010, 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. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

^{3*} Кафедра аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5165-2226

⁴ Кафедра гідравліки та водопостачання, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпро, 49010, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9257-763X

⁵ Кафедра гідравліки та водопостачання, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпро, 49010, Україна, тел. +38(056) 273-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3057-9204

Анотація. *Постановка проблеми.* Розглядається задача прогнозування динаміки формування зон хімічного забруднення внаслідок аварійного викиду хлору на хлоропереливній станції. Поблизу цієї хлоропереливної станції розташовується крупне селище, тому у випадку виникнення екстремальної ситуації з'являється ризик токсичного ураження людей. З цієї точки зору розробка ефективних багатовимірних математичних моделей, що дозволяють виконати прогноз формування зон хімічного зараження має значну актуальність. *Мета роботи.* Розробка чисельної багатопараметричної моделі та комп'ютерної програми для прогнозування динаміки забруднення атмосферного повітря внаслідок аварійного витоку хлору на хлоропереливній станції. *Методика.* Для математичного моделювання процесу розповсюдження хімічно небезпечної речовини використовується тривимірне рівняння масопереносу (рівняння Г. І. Марчука). Дане моделююче рівняння враховує різний напрям вітру, зміну з висотою вертикального коефіцієнту атмосферної дифузії, інтенсивність викиду хімічно небезпечної речовини, місце розташування джерела емісії. Для чисельного інтегрування тривимірного рівняння масопереносу використовуються кінцево-різницеві схеми розщеплення. Попередньо, для моделюючого рівняння масопереносу здійснюється фізичне його розщеплення: розглядаються роздільно рівняння переносу за рахунок швидкості та за рахунок дифузії. Також окремий крок – зміна концентрації хімічно небезпечної речовини за рахунок дії джерела забруднення. Далі будується різницева схема розщеплення. На кожному кроці розщеплення значення концентрації хімічно небезпечної речовини визначається за явної схемою. *Наукова новизна.* Запропонована чисельна модель, що дозволяє розрахувати динаміку аварійного забруднення атмосферного повітря внаслідок викиду хімічно небезпечної речовини. Математична модель враховує фізичні фактори, що істотно впливають на процес розповсюдження хімічно небезпечної речовини в атмосфері. *Практична значущість.* На базі розробленої моделі створений код, що дозволяє оперативно розраховувати процес аварійного забруднення атмосфери. Математична модель може бути використана при розробці плану ліквідації аварійної ситуації. *Висновки.* Розроблена математична модель та комп'ютерний код, що реалізує її, дозволяють досліджувати динаміку розповсюдження хімічно небезпечної речовини в атмосферному повітрі. Розроблена комп'ютерна програма може бути реалізована на комп'ютерах малої та середньої потужності. Представлені результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: хімічне забруднення атмосфери; хлор; чисельне моделювання; аварійний викид

NUMERICAL SIMULATION OF ATMOSPHERIC POLLUTION DURING AN EXTREME SITUATION AT A CHLORINE OVERFLOW STATION

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BERLOV O.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
GUBIN O.I.^{3*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
GUNKO O.Yu.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
MASHYKHINA P.B.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Hydraulics and Water Supply, Dniprovskiy National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 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, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

^{3*} Department of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water_supply_treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5165-2226

⁴ Department of Hydraulics and Water Supply, Dniprovskiy National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: water_supply_treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9257-763X

⁵ Department of Hydraulics and Water Supply, Dniprovskiy National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana St., 2, Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: water_supply_treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3057-9204

Abstract. Problem statement. The problem of forecasting the dynamics of the formation of zones of chemical pollution due to accidental emissions of chlorine at the chlorine overflow station is considered. There is a large village near this chlorine overflow station, so in case of an emergency there is a risk of toxic damage to people. From this point of view, the development of effective multidimensional mathematical models to predict the formation of zones of chemical contamination is of great relevance. **The purpose of the article.** Development of a numerical multi-parameter model and computer program for forecasting the dynamics of air pollution due to accidental leakage of chlorine at the chlorine station. **Methodology.** For mathematical modeling of the propagation of a chemically hazardous substance, a three-dimensional equation of mass transfer is used (the equation of G.I. Marchuk). This modeling equation takes into account different wind directions, changes in the vertical coefficient of atmospheric diffusion with height, the intensity of the release of a chemically hazardous substance, and the location of the emission source. For the numerical integration of the three-dimensional mass transfer equation, finite-difference splitting schemes are used. First, for the modeling equation of mass transfer, its physical splitting is carried out: the equations of transfer due to velocity and due to diffusion are considered separately. Also, a separate step is to change the concentration of a chemically hazardous substance due to the action of a pollution source. Next, a difference splitting scheme is constructed. At each step of the splitting, the value of the concentration of a chemically hazardous substance is determined according to an explicit scheme. **Scientific novelty.** A numerical model is proposed to calculate the dynamics of accidental air pollution due to the release of chemically hazardous substances. The mathematical model takes into account the physical factors that significantly affect the process of distribution of chemically hazardous substances in the atmosphere. **Practical significance.** Based on the developed model, a code is created that allows you to quickly calculate the process of accidental air pollution. The mathematical model can be used in developing an emergency response plan. **Conclusions.** The developed mathematical model and the computer code that implements it allow us to study the dynamics of the spread of chemically hazardous substances in the air. The developed computer program can be implemented on low and medium power computers. The results of a computational experiment are presented.

Keywords: *chemical pollution of the atmosphere; chlorine; numerical simulation, emergency emission*

Постановка проблеми. Екстремальні ситуації, що приводять до викиду хімічно небезпечних речовин створюють загрозу життєдіяльності [1; 3; 5; 10; 12]. Для розробки надійної системи захисту працівників на промислових або інших об'єктах, де використовуються або розмішуються хімічно небезпечні речовини важливо оцінити реальний ризик хімічного

ураження людей у разі виникнення аварійних або інших небезпечних ситуацій (рис. 1). Якщо оцінка ризику ураження виконана «неякісно», то це може привести до створення неефективної системи захисту працівників, що, у підсумку, може привести до катастрофічних наслідків. Тому, дуже важливо здійснити адекватне оцінювання ризику токсичного ураження. Для рішення

цієї задачі потрібно здійснити адекватне прогнозування процесу забруднення атмосферного повітря при викиді хімічно небезпечних речовин на об'єкті у випадку виникнення екстремальної ситуації.

Таким чином, визначення можливих зон хімічного забруднення у разі виникнення екстремальної ситуації на хімічно небезпечному об'єкті є «основою» для оцінювання ризику ураження та розробки комплексу заходів, що спрямовані на забезпечення надійної системи захисту працівників.

Тому була розроблена математична модель для здійснення прогнозування якості атмосферного повітря біля відомих джерел емісії забруднюючих речовин, що базується на використанні багатofакторної математичної моделі переносу домішки в повітряному середовищі.



Рис. 1. Аварія на хімічно небезпечному об'єкті (<https://www.rbc.ua/rus/news/irake-utechki-hlora-postradali-desyatki-lyudey-152715106.html>)

Аналіз останніх досліджень. В Україні для прогнозування зон хімічного зараження при екстремальних ситуаціях на хімічно небезпечних об'єктах та транспорті дуже поширено використовується нормативна методика, що базується на емпіричних моделях. Ця методика дозволяє дуже швидко визначати розміри зон зараження в залежності від стану атмосфери, інтенсивності викиду небезпечної речовини. Але дана методика не враховує декілька важливих параметрів, наприклад, різну швидкість вітру, що може бути в регіоні. Тобто, на базі даної методики неможливо оцінити зони зараження для різних метеоситуацій. Інший підхід для рішення

задачі по оцінюванню зон хімічного зараження – це використання моделі Гауса [6; 9; 11] або аналітичних моделей [1; 2; 4]. Ці моделі дуже часто застосовується в США, країнах Євросоюзу, Україні. Аналітичні моделі, модель Гауса зручні для проведення прикладних розрахунків, але не враховують, наприклад, зміну швидкості повітря з висотою. Найбільш ефективними є чисельні моделі, що дозволяють врахувати значну кількість факторів, що впливають на інтенсивність та розміри зон хімічного зараження [3; 5; 8]. Тому створення таких моделей є важливою задачею. Використання чисельних моделей дозволяє дослідити вплив різних фізичних параметрів на формування зон хімічного зараження.

Мета статті. Розробка 3D чисельної моделі для експрес прогнозування динаміки забруднення атмосферного повітря при аварійному викиду хімічно небезпечної речовини.

Опис об'єкту. Розглядається прогнозування забруднення атмосферного повітря при виникненні екстремальної ситуації на Аульській хлоропереливній станції (рис. 2). Дана станція була побудована в 1965 р. На цій станції знаходяться ємкості хлору в кількості порядку 300 т. Даний об'єкт відноситься до об'єктів 1-го класу безпеки.



Рис. 2. Аульська хлоропереливна станція (<https://kmsk.dp.ua/news/novosti/aulskuyu-hloroperelivnyuyu-stanciyu-vystavyat-na-torgi>)

При виникненні екстремальної ситуації на станції можливе інтенсивне хімічне забруднення атмосферного повітря та виникає ризик токсичного ураження людей.

Методика. Формування зони хімічного зараження в атмосфері, при аварійному витоку, залежить від багатьох факторів. Тому, при розробці математичної моделі

потрібно врахувати як можна більш таких факторів. Для опису переносу хімічно небезпечної речовини від техногенного джерела забруднення будемо використовувати рівняння масопереносу [3; 8]:

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

де C – концентрація хімічно небезпечної речовини; σ – коефіцієнт, що враховує хімічні перетворення хімічно небезпечної речовини; $u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)$ – компоненти швидкості вітру; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії; Q – інтенсивність емісії хімічно небезпечної речовини при виникненні аварійної ситуації; $\delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) \cdot \delta(z - z_i)$ – дельта-функція Дірака; x_i, y_i, z_i – координати джерела емісії хімічно небезпечної речовини; t – час.

Для рівняння (1) реалізуються наступні граничні умови [5; 8]:

1. На межі, де потік «втікає»: $C = 0$.

2. На межі, де потік вітру «виходить» з розрахункової області:

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

Початкова умова: $C = 0$ для $t = 0$.

Рівняння (1) буде основою математичної моделі для прогнозування забруднення атмосферного повітря при аварійній емісії хімічно небезпечної речовини.

Значення коефіцієнтів атмосферної турбулентної дифузії будемо визначати так

$$\mu_x \approx \mu_y, \quad \mu_y = k_0 \cdot u,$$

де $k_0 = 0,1 \div 1$ м.

Значення вертикального коефіцієнту атмосферної дифузії визначається так:

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

де $k_1 = 0,1 \div 0,2 \text{ м}^2/\text{с}$, $m \approx 1$ – безрозмірний параметр.

Параметри, що необхідні для проведення розрахунку задаються на базі існуючої інформації про об'єкт та метеоумови, що характерні для регіону.

Методика рішення. Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння (1) використовується кінцево-різницевий метод. Для проведення розрахунку використовується прямокутна різницева сітка.

Попередньо, для побудови чисельної моделі здійснимо наступне розщеплення моделюючого рівняння (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial wC}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C = \sum Q_i(t) \times$$

$$\times \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i).$$

Далі, здійснюються такі перетворення [3; 8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t},$$

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

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

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

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

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

Наступним кроком є апроксимація

похідних так [5; 7]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$- \mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} -$$

$$- \mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} -$$

$$- \mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1}$$

Далі, використовується наступна кінцево-різницева схема розщеплення для чисельного інтегрування першого рівняння з системи (2) [8]:

■ Перший крок:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k = M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n, \quad (3)$$

– Другий крок:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} = M_{xx}^+ C^n + M_{xx}^- C^{n+1}. \quad (4)$$

Кінцево-різницева схема для другого рівняння з системи (2) така:

– Перший крок:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_y^+ C^k = M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n, \quad (5)$$

– Другий крок:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_y^- C^{n+1} = M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^{n+1}. \quad (6)$$

Кінцево-різницева схема для третього рівняння з системи (2) така:

– Перший крок:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_z^+ C^k = M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n, \quad (7)$$

– Другий крок:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_z^- C^{n+1} = M_{zz}^+ C^n + M_{zz}^- C^{n+1}. \quad (8)$$

Останнє рівняння з системи (2) чисельно інтегрується так (схема Ейлера) [7]:

$$C^{n+1} = C^n - dt * \sigma C +$$

$$+ dt * \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \times$$

$$\times \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i(t)). \quad (9)$$

Для розробки комп'ютерного коду, що реалізує дану чисельну модель використовувався FORTRAN.

Результати. Розроблена чисельна модель та створений на її базі комп'ютерний код були використані для прогнозування зон хімічного забруднення при витоку хлору на Аульській хлоропереливній станції (рис. 3). Моделювання здійснено для різного напрямку та швидкості повітря.

На рисунку 3 показано область дослідження.

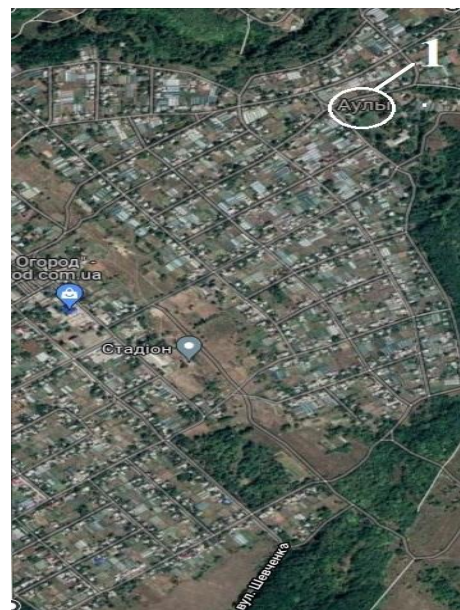


Рис. 3. Область дослідження:
1 – хлоропереливна станція

Розміри розрахункової області: $L_x = 1,1$ км, $L_y = 2,1$ км. Зони хімічного забруднення показані далі на рисунках (рівень $z = 3$ м). На рисунках 4, 5 показані зони хімічного зараження для різних моментів часу, напрям вітру східно-південний, швидкість вітру на висоті 10 м дорівнює $V = 4,8$ м/с.



Рис. 4. Зона хімічного забруднення, $V = 4,8$ м/с, $t = 130$ с: 1 – джерело емісії; 2 – $C = 15$ мг/м³; 3 – $C = 29$ мг/м³; 4 – $C = 46$ мг/м³



Рис. 5. Зона хімічного забруднення, $V = 4,8$ м/с, $t = 243$ с: 1 – джерело емісії; 2 – $C = 16$ мг/м³; 3 – $C = 28$ мг/м³; 4 – $C = 47$ мг/м³

На рисунках 6, 7 показані зони хімічного зараження для різних моментів часу,

швидкість вітру на висоті 10 м $V = 6,8$ м/с та іншого напрямку вітру.

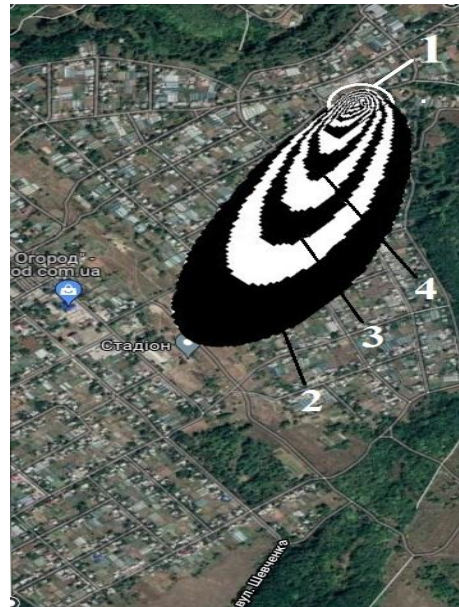


Рис. 6. Зона хімічного забруднення, $V = 6,8$ м/с, $t = 143$ с: 1 – джерело емісії; 2 – $C = 17$ мг/м³; 3 – $C = 28$ мг/м³; 4 – $C = 45$ мг/м³

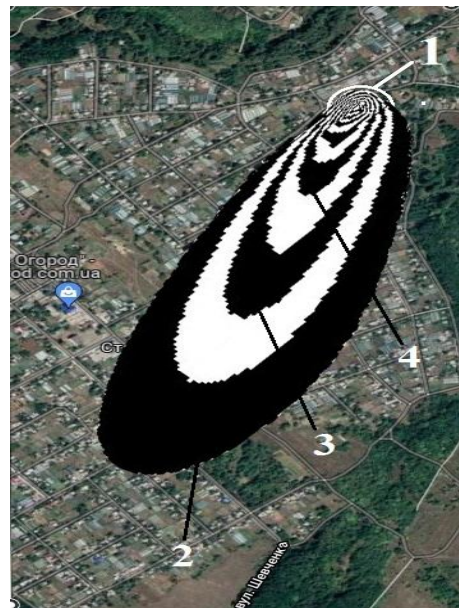


Рис. 7. Зона хімічного забруднення, $V = 6,8$ м/с, $t = 255$ с: 1 – джерело емісії; 2 – $C = 14$ мг/м³; 3 – $C = 27$ мг/м³; 4 – $C = 44$ мг/м³

З наведених рисунків можна бачити, що побудована чисельна модель дозволяє чітко «відслідкувати» вплив зміни напрямку та швидкості вітру на формування зон хімічного зараження, що дозволяє використовувати дану модель для аналізу рівня забруднення атмосферного повітря при різних метеоумовах.

Відзначимо, що час розрахунку складає 7 с.

Наукова новизна та практична цінність. Наведена чисельна модель та комп'ютерна програма для оцінювання зон хімічного забруднення при аварійному витоку хлору. Для використання чисельної моделі на практиці знадобляться вхідні дані, що є типовими для задач даного класу. Чисельна модель дає можливість оперативно визначати динаміку забруднення атмосферного повітря, що дає можливість протягом робочого дня провести серію

розрахунків для аналізу наслідків можливих екстремальних ситуацій.

Висновки. 1. На основі побудованої математичної моделі виконано оцінювання рівня забруднення атмосферного повітря при аварійному витоку хлору.

2. Результати обчислювального експерименту показують, що побудована математична модель дає можливість оперативно аналізувати наслідки можливих аварійних викидів на хімічно небезпечних об'єктах.

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. Пляцук Л. Д., Бойко В. В. Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. *Вісник КНУ ім. Михайла Остроградського*. 2010. Вип. 6. С. 1–4.
3. 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*. Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2018. № 2 (39). С. 95–101.
4. Прохач Э. Е., Попов Н. П. Метод расчета параметров рассеяния пара пролитой на грунт жидкости. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2009. Вип. 10. С. 133–139.
5. Пшинько А. Н., Беляев Н. Н., Машихина П. Б. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях. Днепропетровск: Нова ідеологія, 2011. 166 с.
6. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Москва: Мир, 1980. 412 с.
7. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1983. 616 с.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Lacombe 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.E. and Govalenkov S.S. *Otsenka kontsentratsii opasnykh khimicheskikh veshchestv v vozdukh pri nepreryvnoy aktivnosti istochnika* [Assessment of the concentration of hazardous chemicals in the air with continuous activity of the source]. *Problemi nadzvichaynykh situatsiy* [Problems of superficial situations]. Vol. 12, 2010, pp. 21–27. (in Russian).
2. Plyaczuk L.D. and Bojko V.V. *Analiz metodiv matematychnoho modelyuvannya rozpovsyudzhennya zabrudnyuyuchykh rehovyn v atmosferi* [Analysis of methods of mathematical modeling of pollutant distribution in the atmosphere]. *Visnyk KNU im. Mykhayla Ostrohrads'koho* [Bulletin of the Mykhailo Ostrogradsky Kyiv National University]. Vol. 6, 2010, pp. 1–4. (in Ukraine).
3. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V. and Kalashnikov I.V. *Matematychno modelyuvannya zatikannya toksychnoho hazu u prymyshchennya pry avariyi na promyslovomu maydanchyku* [Mathematical modeling of toxic gas leakage into the premises during an accident on an industrial site]. *Matematychno modelyuvannya* [Mathematical modeling]. Vol. 2 (39), 2018, pp. 95–101. (in Ukraine).
4. Prohach Eh.E. and Popov N.P. *Metod rascheta parametrov rasseyaniya para prolytoy na hrunt zhydkosty* [Method for calculating the parameters of vapor scattering of a liquid spilled onto the ground]. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy* [Problems of emergencies]. Vol. 10, 2009, pp. 133–139. (in Russian).

5. Pshinko A.N., Belyayev N.N. and Mashihina P.B. *Modelirovanie zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennykh aviariyakh: monografiya* [Modeling of atmospheric pollution during technogenic accidents: monograph]. Dnipropetrovsk: Nova Ideologiya Publ., 2011, 166 p. (in Russian).
6. Roache P.J. *Vychislitel'naya gidrodinamika* [Computational Fluid Dynamics]. Moscow: Mir Publ., 1980, 446 p. (in Russian).
7. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow: Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).
8. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K. and Belyaev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution spreading in the environment]. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Lacombe 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: 03.11.2021.