

УДК 515.2

І.А. Чуб<sup>1</sup>, М.В. Новожилова<sup>2</sup>, М.Ю. Карпенко<sup>2</sup><sup>1</sup> Національний університет цивільного захисту України, Харків<sup>2</sup> Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків

## МЕТОД МІНІМІЗАЦІЯ ВПЛИВУ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ З МОЖЛИВИМИ ВИКИДАМИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ

*Представлені математична модель та метод розв'язання задачі мінімізації впливу надзвичайної ситуації з можливими викидами небезпечних хімічних речовин в атмосферу шляхом раціонального розміщення хімічно небезпечних об'єктів в заданій області з урахування її кліматичних умов.*

**Ключові слова:** метод мінімізації, хімічно небезпечні речовини, оптимальне розміщення об'єктів.

### Вступ

Одним з пріоритетних напрямків соціально-економічної політики України є посилення техногенної безпеки промислових об'єктів. Аналіз надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру, що сталися за останні десять років на території України, показав, що значний внесок в рівень техногенної безпеки території вносять аварії на промислових та інших об'єктах, які супроводжуються викидами небезпечних хімічних речовин (НХР).

За розмірами негативного екологічного впливу, а також ступеню загрози здоров'ю та життю людей, найбільшу небезпеку представляють підприємства нафтохімічної, хімічної промисловості тощо, які розташовані у густонаселених районах [1–3]. Аварії на цих об'єктах майже завжди є екологічними катастрофами.

На сьогоднішній день в Україні відсутня затверджена методика оцінки негативного впливу на навколишнє середовище небезпечних чинників можливої хімічної аварії та методів його зниження, хоча їх необхідність закладена в ряді нормативно-правових документів.

Одним з дійових методів зниження негативного впливу НС з викидом НХР на хімічно небезпечних промислових об'єктів на етапах розробки планів на нове будівництво, розширення, реконструкцію і технічне переоснащення є їх оптимальне розміщення з урахуванням особливостей НХР та природно-кліматичних умов [4–6].

Тому розробка математичної моделі і методу мінімізації впливу НС з викидом НХР в атмосферу шляхом оптимізації розміщення хімічно небезпечних промислових об'єктів є актуальною науковою задачею.

### Основна частина

Нехай у заданій області  $\mathfrak{R} \subset \mathbb{R}^2$ , пов'язаній з загальною системою координат ХОУ, розміщуються

$N$  хімічно небезпечних об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), які у випадку НС є джерелами викиду НХР. З кожним об'єктом  $S_i$ , що розміщується, зв'язана власна система координат  $X_iO_iY_i$ .

В області  $\mathfrak{R}$  розташовуються ділянки, що є зонами заборони  $K_j$  ( $j=1, 2, \dots, J$ ), у яких присутність об'єктів  $S_i$  не допускається.

Тому розміщення об'єктів  $S_i$  здійснюється в підобласті  $\Omega$  області  $\mathfrak{R}$ :

$$\Omega = (\mathfrak{R}^* \setminus \bigcup_{j=1}^P K_j^*).$$

Розміщення об'єктів  $S_i$  здійснюється з урахуванням геокліматичних факторів  $Q$  (напряму і швидкості вітру) в області. При цьому вважається, що область  $\Omega$  розташована на рівнинній місцевості і її межі напрям та швидкість вітру не змінюються.

Місце розташування множини  $N$  об'єктів  $S_i$  в області  $\Omega$  визначається вектором  $Z$  параметрів розміщення

$$Z = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_N, y_N), Z \in \mathbb{R}^{2N},$$

де  $(x_i, y_i)$  – координати полюса об'єкта  $S_i$  – довільної точки у межах  $S_i$ , яка є началом власної системи координат  $X_iO_iY_i$ , зв'язаної з об'єктом  $S_i$ .

Кількісною характеристикою забруднення області  $\Omega$  викидами НХР є їхня концентрація в точках даної області:

$$c = C(x, y, t, Z, Q),$$

де  $t$  – час, який пройшов з початку виникнення НС з викидом НХР на об'єкті  $S_i$ .

Розрахунок концентраційного поля НХР в області  $\mathfrak{R}$  може виконуватися згідно рекомендацій методик [7, 8].

*Зауваження 1.* При одночасній присутності в атмосфері декількох однотипних НХР, сумарна їх концентрація  $C$  у кожній точці місцевості дорівнює суперпозиції концентрацій [9]:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_N,$$

де  $N$  – кількість об'єктів, які є джерелами викидів однотипних НХР.

*Зауваження 2.* Сумарна концентрація декількох різних НХР у кожній точці місцевості приводиться до значення концентрації  $C$  однієї з них [9] та розраховується за формулою:

$$C = C_1 + C_2 \frac{\text{ГДК}_1}{\text{ГДК}_2} + \dots + C_n \frac{\text{ГДК}_1}{\text{ГДК}_n},$$

де  $C_1$  – концентрація НХР, по якій виконується приведення;  $\text{ГДК}_1$  – його гранично допустима концентрація;  $C_2, \dots, C_n$  і  $\text{ГДК}_2, \dots, \text{ГДК}_n$  – відповідно концентрації та  $\text{ГДК}$  інших НХР, що входять до групи сумачії.

*Зауваження 3.* При одночасної присутності в атмосфері декількох різних небезпечних хімічних речовин, які мають сумасією дії, їх безрозмірна сумарна концентрація не повинна перевищувати одиниці [9]:

$$C = \frac{C_1}{\text{ГДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ГДК}_2} + \dots + \frac{C_N}{\text{ГДК}_N} \leq 1,$$

де  $C_1, C_2, \dots, C_N$  – концентрація НХР в атмосфері (у одній точці місцевості),  $\text{мг/м}^3$ ;  $\text{ГДК}_1, \text{ГДК}_2, \dots, \text{ГДК}_N$  – відповідні гранично допустимі концентрації цих НХР в атмосферному повітрі,  $\text{мг/м}^3$ .

Оптимізаційну задачу можна сформулювати таким чином:

*знайти таке розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) в області  $\Omega$ , щоб величина максимальної сумарної концентрації НХР в області  $\mathcal{U}$  була мінімальною, тобто знайти*

$$\min_{Z \in W} \max_{(x,y) \in \mathcal{R}} C(x, y, t, Z, Q), \quad (1)$$

де  $W$  – область допустимих розв'язків задачі, яка формується системою геометричних, технологічних обмежень.

Геометричні обмеження [10, 11] визначають умови взаємного розміщення об'єктів  $S_i$  і  $S_j$  ( $i, j=1, 2, \dots, N, i \neq j$ ), умови взаємного розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) і областей заборони  $K_j$  ( $j=1, 2, \dots, J$ ), а також належності об'єктів  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) області розміщення  $\Omega$ .

Формалізація геометричних обмежень виконується за допомогою апарату  $\Phi$ -функцій [6].

Технологічні обмеження можуть містити, наприклад, обмеження на допустимі відстані між об'єктами, що розміщуються, між об'єктами та транспортною, енергетичною мережами тощо.

Як показано в дослідженнях [4–6], розміщення хімічно небезпечних об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) може бути зведено до розміщення їх зон забруднення, які моделюються восьмикутниками, побудованими на розі вітрів місцевості, де знаходиться область  $\Omega$ .

Така модель зони забруднення пов'язана з неможливістю визначення величини геокліматичних факторів  $Q$  (напрямку і швидкості вітру) в області  $\Omega$  у зв'язку з невизначеністю часу виникнення НС з викидом НХР у атмосферу.

Границя  $\Gamma$  отриманого восьмикутника – це лінія, у кожній точці якої досягається максимальна концентрація НХР в даному напрямку  $\lambda$ :

$$C(x,y)|_{(x,y) \in \Gamma} = \max C(x,y)|_{\lambda} = C_M|_{\lambda}.$$

Графічна інтерпретація побудови можливої зони забруднення наведена на рис. 1 [6].

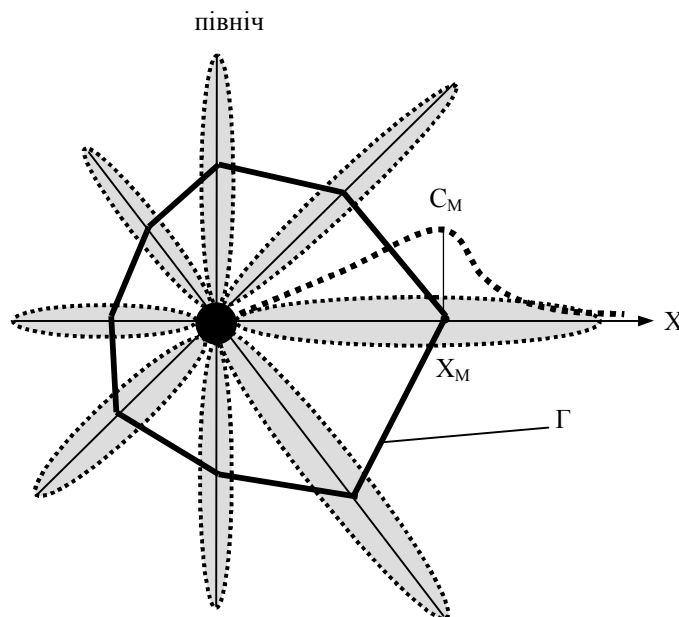


Рис. 1. Модель зони забруднення у вигляді восьмикутника

Така побудова області забруднення гарантує, що за її межами концентрація НХР буде менше, ніж на границі.

Розподіл концентрації НХР в області розміщення при побудові зони забруднення за вказаним методом відповідає часу  $t$  з початку виникнення НС з викидом НХР на об'єкті  $S_i$ , при якому максимальна концентрація НХР дорівнює її гранично допустимій:  $C_M = ГДК$ .

Аналіз оптимізаційної задачі (1) показав, що застосування для її розв'язання точних методів нелінійного математичного програмування [12, 13] є неможливим.

Тому для визначення оптимального розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) пропонується чисельний метод, який дає змогу отримати наближений розв'язок задачі (1).

Запропонований метод розв'язку задачі (1) заснований на схемі методу мінімізації по групах змінних [12, 13], у якості яких виступають параметри розміщення об'єктів  $S_i$ .

Об'єкти розміщуються послідовно з урахуванням системи обмежень таким чином, що новому вектору розміщення відповідає менше значення цільової функції задачі (1):

$$F(x, y, t, Z^{p+1}, Q) < F(x, y, t, Z^p, Q),$$

де 
$$F(Z) = \max_{(x,y) \in \mathbb{R}} C(x, y, t, Z, Q);$$

$p$  – номер ітерації.

Загальна схема методу визначення вектору розміщення об'єктів, що відповідає локальному мінімуму цільової функції задачі (1), на  $p$ -й ітерації складається з таких кроків [6]:

**Крок 1.** Визначається об'єкт  $S_k$ , що змінює своє положення і має на  $p$ -й ітерації параметри розміщення  $z_k^p = (x_k^p, y_k^p)$ .

**Крок 2.** Виділяються обмеження, що формують в навколо полюса рухомого об'єкта  $S_k$  область  $W_k^p$  допустимих параметрів його розміщення на  $p$ -й ітерації.

**Крок 3.** Визначається напрямок і крок зміщення об'єкта  $S_k$ . Параметри розміщення об'єкта  $S_k$  отримують приріст  $\Delta_k^p$ , що приводить до зменшення значення цільової функції задачі (1), визначеного на  $(p-1)$  ітерації:

$$\Delta^p < \Delta^{p-1}.$$

Знаходяться нові параметри розміщення

$$z_k^{p+1} = (x_k^{p+1}, y_k^{p+1})$$

об'єкта  $S_k$ :

$$x_k^{p+1} = x_k^p + \Delta_k^p; \quad y_k^{p+1} = y_k^p + \Delta_k^p.$$

**Крок 4.** Проводиться перевірка виконання системи обмежень для нового положення об'єкта  $S_k$ :

$$(x_k^{p+1}, y_k^{p+1}) \in W_k^p.$$

У разі її виконання здійснюється перехід до **Кроку 5**, в іншому випадку – до **Кроку 3**.

**Крок 5.** Номер  $K$  збільшується на одиницю.

При  $K \leq N$  здійснюється повернення до **Кроку 1**.

**Крок 6.** Якщо на  $p$ -й ітерації хоча б один з об'єктів змінив своє положення, тобто  $Z^p \neq Z^{p-1}$ , то номер  $P$  збільшується на 1 і здійснюється перехід до **Кроку 1**. В іншому випадку розв'язком задачі (1) вважають вектор  $Z^p$  параметром розміщення об'єкта  $S_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), отриманий на  $(p-1)$  ітерації.

Конкретні алгоритми, що реалізують наведену загальну схему, можуть відрізнятися правилом визначення рухомого об'єкта  $S_k$  (**Крок 1**) і вибором напрямку і величини зміщення  $\Delta_k^p$  (**Крок 3**).

Вибір об'єкта, який першим розпочинає змінювати параметри розміщення (**Крок 1**), може здійснюватися різними шляхами, виходячи з умов конкретної задачі. Наприклад, це може бути об'єкт  $S_k$ , при НС на якому відбувається викид НХР з мінімальним значенням ГДК (тобто найбільш токсичної). У цьому випадку визнаються значення ГДК для усіх НХР, які обертаються на хімічно небезпечних об'єктах  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), об'єкти  $S_i$  ранжуються за зростанням величини ГДК і отриманий ряд представляє собою послідовність зміни параметрів розміщення об'єктів  $S_i$ .

Вибір напрямку і величини зміщення  $\Delta_k^p$  об'єктів (**Крок 3**) доцільно виконувати градієнтним методом [12, 13]. У цьому випадку напрям зміщення об'єкту  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) співпадає з антиградієнтом цільової функції задачі (1) по параметрах його розміщення. Координати нового положення полюса об'єкта  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) на  $p+1$  ітерації визначаються за формулою:

$$z_i^{p+1} = z_i^p - \Delta_k^p = z_i^p - \alpha_i^p g_i^p,$$

або в проєкціях на координатні осі:

$$x_i^{p+1} = x_i^p - \alpha_i^p g_{ix}^p,$$

$$y_i^{p+1} = y_i^p - \alpha_i^p g_{iy}^p,$$

де  $g_i^p = \text{grad}F(x, y, t, Z, Q)$  – градієнт цільової функції  $F(x, y, t, Z, Q)$  по параметрах розміщення об'єкта  $S_i$  на  $p$ -й ітерації;  $g_{ix}^p$  і  $g_{iy}^p$  – проєкції вектора градієнта  $g_i^p$  на координатні осі; константа  $\alpha_i^p$  – шаг зміщення об'єкту  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) в напрямку антиградієнту.

Часткові похідні від функції  $F(x, y, Z, G, Q)$  по параметрах розміщення об'єктів визначаються чисельним методом, наведеним в [13]. Це обумовлено рядом причин, зокрема, необхідністю визначенням концентраційного поля НХР в області розміщення для обчислення функції мети оптимізаційної задачі.

Метод, що пропонується, дозволяє отримати раціональне розміщення хімічно небезпечних об'єктів. Це пояснюється тим, що об'єкти розміщуються послідовно.

Однак вибір такого методу розв'язку, який є модифікацією методу Гаусса-Зейделя [13], обумовлений особливостями даної задачі і дозволяє отримати досить хороше наближення до локального мінімуму задачі.

Мінімізація в просторі розмірності  $2N$  замінюється  $N$ -кратною мінімізацією в двовимірних просторах параметрів розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ).

Це дозволило скоротити кількість громіздких обчислень, пов'язаних з необхідністю перевірки виконання системи обмежень, що включає в себе чисельне визначення розподілу концентрації небезпечних хімічних речовин, а також за рахунок зниження розмірності і зменшення числа обмежувальних умов на кожному кроці оптимізації.

## Висновки

Запропоновано математичну модель та метод розв'язання оптимізаційної задачі розміщення хімічно небезпечних об'єктів у заданій області з урахуванням кліматичних умов.

## Список літератури

1. Попов В.М. Показатели эффективности региональной системы техногенной безопасности / В.М. Попов, И.А. Чуб, М.В. Новожилова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2(20). – С. 32-41.

2. Попов В.М. Модель адаптивной системы техногенной безопасности региона В. М. Попов, И.А. Чуб,

М.В.Новожилова // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2013. – Вип. 2(26). – С. 120-123.

3. Попов В.М. Інформаційна технологія підвищення техногенної безпеки регіону / В.М. Попов, І.А. Чуб, М.В. Новожилова // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 15. – С. 134-138.

4. Чуб И.А. Размещение объектов техногенной опасности с минимизацией уровня воздействия возможной чрезвычайной ситуации / И.А. Чуб, Е.В. Мориц, А.О. Труш, С.В. Ковальский // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – Вып. 16. – С. 248–251.

5. Чуб И.А. Моделирование размещения пожароопасных объектов с учетом опасных факторов возможного пожара / И.А. Чуб, Е.В. Мориц // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – Вып. 15. – С. 224–227.

6. Чуб И.А. Моделирование размещения пожароопасных объектов: минимизация загрязнения атмосферы / И.А. Чуб, М.В. Новожилова, В.А. Аноронов. – Харьков: ІД ІНЖЕК, 2012. – 133 с.

7. Методика оценки последствий химических аварий. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2005. – 57 с.

8. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2012. – 46 с.

9. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1985. – 271 с.

10. Чуб И.А. Построение системы геометрических ограничений в задачах оптимизации размещения пожаровзрывоопасных объектов / И.А. Чуб // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – 2007. – Вип 16. – С. 125–132.

11. Новожилова М.В., Чуб І.А. Умовля розміщення екологічно небезпечного об'єкта з урахування змін геометричних характеристик області можливого забруднення / М.В.Новожилова, І.А. Чуб // Науковий вісник будівництва. – 2009 – № 54. – С. 240-248.

12. Банди Б. Методы оптимизации / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

13. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 536 с.

Надійшла до редколегії 27.10.2017

**Рецензент:** д-р фіз.-мат. наук, проф. Н.Д. Сизова, Харківський національний університет будівництва і архітектури, Харків.

## МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ВЛИЯНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ С ВОЗМОЖНЫМИ ВЫБРОСАМИ ОПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

И.А. Чуб, М.В. Новожилова, Н.Ю. Карпенко

Представлены математическая модель и метод решения задачи минимизации влияния чрезвычайной ситуации с возможными выбросами опасных химических веществ в атмосферу путем рационального размещения химически опасных объектов в заданной области с учетом ее климатических условий.

**Ключевые слова:** метод минимизации, химически опасные вещества, оптимальное размещение объектов.

## METHOD TO MINIMIZE THE IMPACT OF AN EMERGENCY SITUATION WITH POSSIBLE RELEASES OF HAZARDOUS CHEMICALS INTO THE ATMOSPHERE

I.A. Chub, M.V. Novozhilova, N.Yu. Karpenko

A mathematical model and a method for solving the problem of minimizing the impact of an emergency situation with possible releases of hazardous chemicals into the atmosphere through the rational placement of chemically hazardous objects in a given area, taking into account its climatic conditions, are presented.

**Keywords:** minimization method, chemically dangerous substances, optimal planning of objects.