

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХІМІЧНОГО ЗАРАЖЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ НА ХІМІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

Кочанов Е.О.¹, Некос А.Н.¹, Безсонний В.Л.^{1,2}

¹Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майд. Свободи, 4, 61022, м. Харків

²Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
пр. Науки, 9А, 61165, м. Харків

kochanov@karazin.ua, nekos@karazin.ua, bezsonny@gmail.com

Обґрунтовано необхідність створення більш адаптивних підходів до моделювання зони ураження, оскільки чинні емпіричні й напівемпіричні моделі не враховують топографічну складність місцевості, змінність метеорологічних умов та особливості середовища. Представлена модель дозволяє врахувати механізми утворення як первинної (імпульсне викидання з розливу ємності), так і вторинної хмари (випаровування з поверхні розливу) небезпечних речовин. Вперше до моделі включено вплив ефективної шорсткості підстилаючої поверхні (параметр z_0), що забезпечує підвищену точність розрахунку глибини хмар розповсюдження. Також враховано змінну вертикальну стійкість атмосфери та швидкість приземного вітру. Описано ключові параметри моделі: площа розливу, інтенсивність випаровування, глибина та тривалість хімічного зараження, доза токсичного впливу на населення. Окрема увага приділена процедурі розрахунку часу підходу хмари до заданого рубежу з урахуванням швидкості вітру та відстані до населених пунктів чи об'єктів критичної інфраструктури. Запропоновані розрахункові формули враховують фізико-хімічні властивості СДОР, що дозволяє адаптувати модель до різних речовин та умов їхнього поширення. Визначено можливості інтеграції розробленої моделі до систем підтримки прийняття рішень у сфері цивільного захисту. Продemonстровано потенціал використання моделі у прогнозуванні хімічної обстановки, оптимізації планів евакуації та визначенні зон санітарного захисту. Наведено порівняльний аналіз з іншими сучасними дослідженнями у сфері екологічної безпеки, зокрема щодо врахування складного рельєфу, багатокомпонентності викидів та адаптації до змін кліматичних умов. Отримані результати дозволяють підвищити ефективність реагування на техногенні аварії та мінімізувати ризики для здоров'я населення. *Ключові слова:* математичне моделювання; хімічне зараження; екологічна безпека; цивільний захист; первинна і вторинна хмара; прогнозування зони ураження; ефективна шорсткість.

Mathematical modeling of chemical contamination for environmental hazard assessment at hazardous chemical facilities.
Kochanov O., Nekos A., Bezsonnyi V.

The need for adaptive modeling approaches is substantiated, as existing empirical and semi-empirical models often neglect key influencing factors such as terrain complexity, atmospheric instability, and urban surface effects. The proposed model accounts for both the primary (instantaneous release due to container rupture) and secondary (evaporation from surface spill) contamination clouds. A novel contribution of the model is the integration of effective surface roughness (z_0) as a governing parameter, significantly improving the accuracy of the predicted cloud dispersion depth. Variable wind speed and atmospheric stability classes are also incorporated into the calculations. Key model parameters include spill area, evaporation intensity, contamination duration and depth, and toxic exposure dose for populations. The model also includes a procedure for estimating the cloud travel time to a designated boundary, factoring in wind speed and distance to settlements or critical infrastructure. The calculation framework incorporates substance-specific physical and chemical properties, which allows model adaptation to various toxic agents and dispersion scenarios. The paper also outlines prospects for implementing the model in decision support systems (DSS) for civil protection. Its use is demonstrated for forecasting chemical hazards, optimizing evacuation plans, and determining sanitary protection zones. A comparative overview with contemporary research is provided, focusing on terrain-sensitive modeling, multi-phase release mechanisms, and climate-adjusted scenarios. The results affirm the model's potential to enhance emergency response effectiveness and reduce public health risks during chemical incidents. *Key words:* mathematical modeling; chemical contamination; environmental safety; civil protection; primary and secondary cloud; hazard zone forecasting; surface roughness; meteorological parameters.

Постановка проблеми. Розвиток хімічної промисловості, зростання обсягів виробництва, транспортування і зберігання небезпечних речовин значно підвищують рівень техногенної загрози для населення та довкілля. Особливої уваги потребують хімічно небезпечні об'єкти (ХНО), на яких можливі аварійні викиди токсичних речовин – аміаку,

хлору, сірководню та інших. У разі порушення цілісності ємностей або трубопроводів виникають масштабні зони хімічного зараження, які поширюються залежно від метеорологічних умов, рельєфу місцевості, характеру поверхні та фізико-хімічних властивостей речовин. Сучасна система цивільного захисту потребує надійних методів оцінки хіміч-

ної обстановки у режимі реального часу, з урахуванням різноманітних чинників, які впливають на формування первинної та вторинної хмари зараження. Існуючі емпіричні та напівемпіричні моделі, що застосовуються в оперативній діяльності, не завжди забезпечують достатню точність прогнозів, особливо в умовах складного рельєфу чи міського середовища. Це створює значні труднощі в організації евакуаційних заходів, визначенні зон ураження, прийнятті рішень щодо засобів колективного та індивідуального захисту.

Актуальність дослідження. Наразі в Україні функціонує велика кількість потенційно небезпечних об'єктів, на яких зберігаються тони токсичних речовин. Водночас засоби прогнозування зон ураження застарілі або ґрунтуються на спрощених моделях, які не враховують динамічні параметри атмосфери, поверхневу шорсткість, складний рельєф місцевості та багатокомпонентну природу викидів. Це обмежує можливості швидкого та обґрунтованого прийняття рішень з боку органів цивільного захисту, особливо у випадку раптових аварій. Окрему важливість становить підвищення точності оцінки зони хімічного зараження у складних природно-географічних умовах, таких як гірські райони, прибережні зони, території з розвиненою міською інфраструктурою. В таких умовах звичайні евристичні або аналітичні методи демонструють значні відхилення від фактичного поширення хмари небезпечної речовини. Таким чином, розробка адаптивної математичної моделі, яка враховує фізико-хімічні властивості речовин, топографічні та атмосферні чинники, а також параметри об'єкта-джерела зараження, є вкрай актуальною з погляду як наукових досліджень, так і практичних потреб оперативного реагування в системі цивільного захисту.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки на період до припинення або скасування воєнного стану в Україні (напрямок 5 «раціональне природокористування») затвердженими Законом України № 3534-IX від 21.12.2023; Національному плану дій з охорони навколишнього природного середовища на 2023–2025 рр., затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2021 р. № 443-р. та Державній цільовій екологічній програмі проведення моніторингу навколишнього природного середовища, затвердженій Постановою Кабінету Міністрів України від 5 грудня 2007 р. № 1376.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Моделювання поширення небезпечних хімічних речовин та оцінка зон ураження є предметом активного наукового інтересу у зв'язку з необхідністю підвищення ефективності реагування на аварії на хімічно небезпечних об'єктах. Загальними питаннями дослідження хімічного зараження на ХНО, при-

свячені праці М. І. Адаменка [1], Б. М. Данилишина [2], Н. Г. Кчук [3], А. В. Степаненка [4]. Значну увагу приділено способам просторового представлення середовища, зокрема Bellos і Tsakiris [5] порівняли різні методи врахування будівель у моделюванні двовимірного потоку і встановили, що метод «відбиткових меж» забезпечує найвищу точність у міських умовах. У сфері оцінки ризику для здоров'я від хімічного впливу важливим є дослідження López-Roldán та ін. [6], у якому представлено підхід до оцінки глобального індексу ризику на основі токсикологічних характеристик забруднюючих речовин у воді. Запропонований індекс можна адаптувати для кількісної оцінки ризику при аварійному хімічному зараженні повітря. Yoo і Choi [7] зосередилися на евакуації населення під час витоків хімічних речовин, застосувавши ГІС-моделювання для створення карти ризиків у реальному часі. Li та ін. [8] запропонували нейромережеву модель раннього попередження для нафтохімічного парку, що функціонує на ізольованій території. Робота Zhang та ін. [9] є одним із перших систематичних досліджень, де застосовано CFD-моделювання для поширення токсичних газів у складному гірському рельєфі з попередньою генерацією сітки на основі ГІС-даних. Xie та ін. [10] розробили комплексну методику, яка поєднує аеродинамічні експерименти, CFD-моделювання та теорію ризику для оцінки поширення змішаного природного газу з вмістом сірководню. Zografos та ін. [11] запропонували структуру системи підтримки прийняття рішень у випадках надзвичайних ситуацій із залученням небезпечних речовин. Аналіз останніх досліджень свідчить про зростаючу увагу до розробки просторово чутливих, адаптивних моделей хімічного поширення, здатних інтегруватися з ГІС-технологіями, CFD та елементами штучного інтелекту для прийняття рішень у режимі реального часу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Більшість існуючих моделей використовують спрощене уявлення про навколишнє середовище, нехтуючи такими критичними факторами, як шорсткість підстилаючої поверхні, мікрорельєф та наявність перешкод, які суттєво впливають на структуру повітряних потоків та просторову конфігурацію зони ураження. Також обмежено враховується динаміка процесу формування вторинної хмари, що виникає внаслідок випару розлитої речовини з поверхні, особливо у випадках із тривалим випаровуванням або фазовими переходами. У типових аналітичних моделях вторинне зараження часто розглядається як рівномірне та однорідне джерело, що не відображає реальної складності процесу.

Наукова новизна

Новизна роботи полягає у формалізації багатфакторної моделі, що вперше враховує ефективну шорсткість підстилаючої поверхні (z_0) при оцінці

параметрів вторинної хмари, інтегрує змінні метеорологічні умови, включаючи вертикальну стійкість атмосфери та швидкість вітру та розрізняє механізми формування первинної та вторинної хмар, надаючи окремі розрахункові модулі для миттєвих і безперервних джерел викиду, що дозволяє точно змодельовати динаміку поширення речовини в часі.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Запропоноване в статті математичне моделювання хімічного зараження формує уніфікований підхід до оцінки хімічної обстановки, який інтегрує фізичні, хімічні, метеорологічні та топографічні параметри в єдину аналітичну схему, що дозволяє подолати обмеження існуючих спрощених моделей, орієнтованих переважно на умовно рівнинні території з постійними атмосферними умовами.

Викладення основного матеріалу. Для розробки методики оцінки хімічної обстановки необхідно розглянути процеси, що відбуваються в ході руйнування ХНО, для чого можливо використати сукупність існуючих математичних моделей, що описують джерело зараження, атмосферну дифузію домішок, вплив СДОР на населення та персонал виробництва.

Попереднім етапом розробки відповідної методики оцінки хімічної обстановки при руйнуванні ХНО, є побудова моделі процесу виникнення хімічних втрат населення та персоналу виробництва. Метою створення такої моделі є оцінка значень показників екологічної небезпеки хімічного зараження повітряного середовища при руйнуванні ХНО.

Показники масштабів хімічного зараження визначаються:

- радіусом (R_{np}) і площею (S_{np}) району руйнування;
- глибиною (G_1) і площею (S_1) зони поширення первинної хмари СДОР;
- глибиною (G_2) і площею (S_2) зони поширення вторинної хмари СДОР.

Показники тривалості хімічного зараження визначаються:

- часом випару СДОР з поверхні дзеркала розливу ($\tau_{вип}$);
- часом підходу хмари СДОР до заданого рубежу (t_n).

Показники небезпеки хімічного зараження оцінюються можливими хімічними втратами населення та персоналу виробництва в зонах екологічної небезпеки. Основною токсикологічною характеристикою СДОР є інгаляційна токсична доза. Можливі напрямки вирішення цього питання розглядаються у роботі [12].

При визначенні особливостей процесу хімічного зараження складових навколишнього середовища можливо сформулювати деякі гіпотези:

1. Умови формування первинної і вторинної хмар повітря заражених СДОР різні. Виходячи з умов формування хмар повітря заражених СДОР, варто

розглядати джерело зараження для первинної хмари, як миттєвий точковий, а для вторинної хмари, як безперервний точковий.

2. Умови поширення у повітрі хмари, зараженої СДОР, варто розглядати наступним чином: по-перше, це відстань, на який розглядається вражаюча дія СДОР. Для хмар повітря, заражених СДОР, ця відстань складає декілька кілометрів; по-друге, це висота, на якій поширюються хмари повітря заражені СДОР. Первинна і вторинна хмари поширюються на висоті не більше 150 метрів. Прийнято вважати, що у випадку ізотропної дифузії переніс речовин здійснюється горизонтальною складовою повітря в напрямку осі абсцис, інакше приземним шаром повітрям.

При розливі СДОР зі зруйнованих ємностей, рідина потрапляє, як правило, на вирівняну поверхню території сховища, тому набуває форму близьку до кола, що дозволяє оцінити площу району руйнування (S_{np}):

$$S_{np} = \pi \cdot R_{np}^2, \quad (1)$$

де R_{np} – радіус дзеркала розливу СДОР [м].

Або через співвідношення:

$$S_{np} = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4}, \quad (2)$$

де d_{np} – діаметр дзеркала розливу, залежить від кількості СДОР, що пролилось зі зруйнованих ємностей. Наведемо вираз для оцінки діаметра дзеркала розливу, у залежності від кількості пролитого СДОР:

$$d_{np} = b \sqrt{\frac{Q - Q_1}{\rho}}, \quad (3)$$

де $b=1,22$ – при наявності обвалування, $[m^{-1/2}]$;

$b=5,04$ – при відсутності обвалування, $[m^{-1/2}]$;

ρ – щільність СДОР, $[kg/m^3]$;

Q – загальна кількість СДОР у ємності зберігання, $[kg]$;

Q_1 – кількість СДОР, що перешли в первинну хмару, $[kg]$.

Наближена оцінка кількості СДОР, що переходить в первинну хмару (Q_1), у момент розкриття оболонки може бути виконана по формулі, що наведена в роботі [14] і дозволяє використовувати наступні параметри:

$$Q_1 = \frac{Q C_v (t - t_k)}{\lambda}, \quad [kg], \quad (4)$$

де Q загальна кількість СДОР у ємності, $[kg]$;

C_v – питома теплоємність рідини, $[kJ/kg \cdot \text{град}]$;

t – температура рідкого СДОР, $[^\circ C]$;

t_k – температура кипіння СДОР, $[^\circ C]$;

λ – питома теплота випару СДОР, $[kJ/kg]$;

C_v, λ – для СДОР довідкові дані.

При визначенні глибини поширення первинної хмари СДОР за розповсюдження в приземному шарі повітря не враховувався вплив шорсткості підстила-

ючої поверхні землі на поширення хмари зараженої СДОР у повітрі. Для обліку впливу поверхні землі вводиться стандартний параметр z_0 , що дозволяє врахувати вплив шорсткості поверхні землі на поширення повітряних мас, з урахування зміни швидкості приземного вітру:

$$u' = u \cdot \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right), \quad (5)$$

де u' – значення горизонтальної складової швидкості приземного вітру з урахуванням впливу підстилаючої поверхні, [м/с];

u – середнє значення швидкості приземного вітру, [м/с];

z – висота поширення хмари СДОР, [м];

z_0 – ефективна висота для різних типів поверхонь, тобто геометричний параметр, пропорційний висоті елементів нерівностей земної поверхні, [м]. Значення параметра z_0 визначається з таблиці 1.

Тоді вираження для визначення глибини поширення первинної хмари прийме вид:

$$\Gamma_1 = b_1 \left(\frac{Q_1 \cdot 10^{-3}}{u' \cdot PC_{\tau_{50}}} \right)^{a_1}, \quad (6)$$

де Γ_1 – глибина поширення первинної хмари СДОР над рівнинною місцевістю, з урахуванням шорсткості підстилаючої поверхні, [м];

Q_1 – кількість СДОР, що переходить у первинну хмару, визначається з вираження (4), [кг];

$PC_{\tau_{50}}$ – середнє граничне значення токсодози, [гр·с/м³];

u' – горизонтальна складова швидкості приземного повітря з урахуванням підстилаючої поверхні, [м/с];

a_1, b_1 – безрозмірні коефіцієнти, що залежать від категорії вертикальної стійкості атмосфери, визначаються з наступних формул:

$$b_1 = 15,42 \cdot \exp(6,96 \cdot \varepsilon) \quad (7)$$

$$a_1 = 0,57 \cdot \exp(0,864 \cdot \varepsilon), \quad (8)$$

де ε – параметр вертикальної стійкості повітря, значення якого визначається в залежності від категорії вертикальної стійкості атмосфери за Пасквілем (А, В, С – конвекція; D – ізотермія; Е, F – інверсія): Е, F $\varepsilon = 0,2$; D $\varepsilon = 0$; А,В,С $\varepsilon = -0,2$ [15]

Іншим показником, що характеризує масштаби хімічного зараження, є глибина поширення вторинної хмари повітря зараженого СДОР. Кількість СДОР, що надходить у вторинну хмару, знаходиться з вираження:

$$Q_2 = Q - Q_1, \quad (9)$$

де Q – загальна кількість СДОР, [кг];

Q_1 – кількість СДОР, що перейшла в первинну хмару, [кг].

Значення Q_2 пов'язано з часом випару СДОР. При цьому мінімальний час випару цих речовин, у межах якого доцільно оцінювати глибину їхнього поширення, не повинне перевищувати однієї доби через велику мінливість напрямку вітру.

Наведемо формулу для визначення глибини поширення вторинної хмари, без обліку впливу підстилаючої поверхні землі на поширення хмари. Раніше зроблені допущення, дозволяють ввести параметр, що дозволяє враховувати вплив шорсткості земної поверхні.

$$\Gamma_2 = 16,84 \cdot \tau^{-0,51} \cdot b_2 \left(\frac{Q_2 \cdot 10^{-3}}{u' \cdot PC_{\tau_{50}}} \right)^{a_2}, \quad (10)$$

де Γ_2 – глибина поширення вторинної хмари повітря зараженого СДОР, [м];

$PC_{\tau_{50}}$ – середня гранична токсодоза, [м·с/м³];

Q_2 – кількість СДОР, що переходить у вторинну хмару, визначається з вираження (9), [кг];

Таблиця 1

Значення ефективної висоти (z_0) для різних типів поверхонь

Тип поверхні		z_0 , [м]
Дуже рівна, сніжна або крижана		10^{-5}
Рівний сніг на невисокій траві		$5 \cdot 10^{-5}$
Пустеля		$3 \cdot 10^{-3}$
Снігова поверхня при наявності чагарнику		$1 \cdot 10^{-3}$
Скошена трава, висота зрізу до 1,5 [см]		$2 \cdot 10^{-3}$
Скошена трава, висота зрізу до 3 [см]		$7 \cdot 10^{-3}$
Скошена трава, висота зрізу до 4,5 [см]		$2,4 \cdot 10^{-2}$
Висота трави 60-70 [см]	для $u \leq 1,5$ [м/с]	$9 \cdot 10^{-2}$
	для $1,6 \leq u \leq 3,5$ [м/с]	$6,1 \cdot 10^{-2}$
	для $3,6 \leq u \leq 6,5$ [м/с]	$3,7 \cdot 10^{-2}$
Неоднорідна поверхня, з переважаючими ділянками місцевості покритими травою, чагарником, деревами		0,1
Лісонасадженнями із середньою висотою дерев 10 [м], міська забудова		0,9

τ – час випару СДОР з поверхні дзеркала розливу, [с];

a_1, b_2 – безрозмірні коефіцієнти, що залежать від категорії вертикальної стійкості повітря. a_1 – визначаються з виразень (7, 8), а b_2 – з вираження:

$$b_2 = 16,84 \cdot \exp(6,87 \cdot \varepsilon), \quad (11)$$

де ε – параметр вертикальної стійкості повітря, значення якого визначається, як: E, F $\varepsilon = 0,2$; D $\varepsilon = 0$; A, B, C $\varepsilon = -0,2$ [15];

u' – горизонтальна складова швидкості приземного вітру з урахуванням поверхні, [м/с].

До показників тривалості хімічного зараження відносяться: час випару СДОР з поверхні дзеркала розливу і час підходу хмари повітря, зараженого СДОР до заданого рубежу.

Вражаюча дія СДОР залежить від часу випару СДОР з поверхні дзеркала розливу. Час випару СДОР з поверхні дзеркала розливу залежить від погодних умов і фізико-хімічних властивостей цих речовин. Для визначення даного параметра використовується формула:

$$\tau_{\text{вип}} = \frac{Q_2}{E \cdot S_{\text{пр}} \cdot 3,6 \cdot 10^3}, \quad (12)$$

де $\tau_{\text{вип}}$ – час випару СДОР з поверхні дзеркала розливу, [с];

E – питома швидкість випару, [кг/м²·с]:

$$E = 0,041 \frac{u \cdot M}{d_{\text{пр}}^{0,14} \cdot T_u} \cdot \exp \left[\frac{\lambda \cdot M}{R} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_u} \right) \right], \quad (13)$$

де M – молекулярна маса СДОР, [г/Мол];

$d_{\text{пр}}$ – приведений діаметр площі розливу, визначається з вираження (3), [м];

T_u – температура навколишнього повітря, [°C];

λ – питома теплоємність випару, [кДж/кг];

R – універсальна газова постійна, дорівнює 8,3, [кДж/кМол·K];

0,041 – коефіцієнт узгодження розмірності, [с·K·Мол/м^{0,86}·г];

T_k – температура випару СДОР, [°K].

Для своєчасного оповіщення населення про початок хімічного зараження і для оперативного виконання заходів щодо ліквідації наслідків аварії необхідно визначити час підходу хмари зараженого повітря об'єкту чи населеного пункту. Значення даного показника знаходиться за формулою:

$$t_n = 0,3 \frac{x}{u}, \quad (14)$$

де t_n – час підходу хмари повітря зараженого СДОР до заданого рубежу, [год];

x – відстань від зруйнованого хімічно небезпечного об'єкту до об'єкта оцінки обстановки, [км];

u – швидкість приземного повітря, [м/с];

0,3 – коефіцієнт для перерахування [м/с] у [км/год].

Головні висновки. Запропонована система оцінки хімічної обстановки при руйнуванні ХНО за рахунок розробленої формульної схеми (моделі) дозволяє:

- виконувати математичні формулювання реальних задач оптимального розподілу засобів ліквідації наслідків аварій на екологічно небезпечних об'єктах;

- враховувати різноманітний характер впливу негативних факторів на навколишнє середовище;

- можливість формування оптимального плану ліквідації наслідків аварії при заданому бюджеті, чи виконання певного плану відбору аналізів/проб при мінімальному бюджеті;

- можливість побудови оптимального розподілу засобів ліквідації наслідків в умовах невизначеності обставин, що склалися внаслідок аварії на ХНО.

Підхід до розробки формульної схеми дозволяє удосконалити її в залежності від середовища програмування, що використовується.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати проведеного дослідження мають потенціал практичного застосування у сфері цивільного захисту, промислової безпеки, екологічного моніторингу та інженерного моделювання надзвичайних ситуацій, зокрема в автоматизованих системах оповіщення і реагування, які функціонують на рівні державних і регіональних центрів ДСНС для прогнозування зон ураження в режимі реального часу та у системах підтримки прийняття рішень для підвищення оперативності реагування при аваріях на ХНО, а також під час планування евакуаційних маршрутів та визначення пріоритетних заходів захисту населення. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на поглиблення моделі шляхом інтеграції нестационарної метеорології, моделювання багатокомпонентних викидів, урахування хімічних реакцій речовин у повітряному середовищі, а також адаптації під сценарії біохімічного або комбінованого ураження.

Література

1. Адаменко М. І., Кучук Н.Г. Структура моніторингу екологічної безпеки регіонів України. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур*. Тези за матеріалами VI Всеукраїнського наукового семінару 15-16 жовтня. Харків, 2014. С. 9-11.
2. Данилишин Б. М. Степаненко А.В., Ральчук О. М. Безпека регіонів України і стратегії її гарантування. Т. 1: Природно-техногенна (екологічна) безпека. К.: Наукова думка, 2008. 389 с.
3. Кучук Н. Г. Моделювання та аналіз екологічного стану регіонів України. *Науковий вісник будівництва*. Збірник наукових праць. Х.: Харківський національний університет будівництва та архітектури, 2014. № 3(77). С. 223-226.
4. Степаненко А. В. Стратегія прориву в соціально-економічному і технологічному розвитку України. *Продуктивні сили України*. 2009. № 1. С. 5-20. Режим доступу: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/5892>.

5. Bellos V., Tsakiris G. Comparing various methods of building representation for 2D flood modelling in built-up areas. *Water Resources Management*. 2015. Vol. 29, № 2. P. 379–397. DOI:10.1007/s11269-014-0702-3
6. López-Roldán R., de Alda M. L., de Miguel N. et al. Assessment of the water chemical quality improvement based on human health risk indexes: Application to a drinking water treatment plant incorporating membrane technologies. *Science of the Total Environment*. 2015. Vol. 532. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.045.
7. Yoo B., Choi S.D. Emergency evacuation plan for hazardous chemicals leakage accidents using GIS-based risk analysis techniques in South Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16, № 11. Article 1948. DOI: 10.3390/ijerph16111948.
8. Li G., Hong B., Hu H. et al. Risk management of island petrochemical park: Accident early warning model based on artificial neural network. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 9. Article 3278. DOI: 10.3390/en15093278.
9. Zhang B., Chen G., Kong L. Toxic gas dispersion modelling over complex terrains. *Proceedings of the 2009 International Conference on Energy and Environment Technology*. 2009. P. 488–492. DOI: 10.1109/ICEET.2009.499.
10. Xin B., Dang W., Yan X. et al. Dispersion characteristics and hazard area prediction of mixed natural gas based on wind tunnel experiments and risk theory. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 152. P. 278–290. DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.012.
11. Zografos K.G., Vasilakis G.M., Giannouli I.M. Methodological framework for developing decision support systems for hazardous materials emergency response operations. *Journal of Hazardous Materials*. 2000. Vol. 71. P. 503–521. DOI: 10.1016/S0304-3894(99)00096-5.
12. Пахоменко В.Ф., Кочанов Е.О., Маркін П.В. Методика визначення хімічних втрат особового складу при руйнуванні хімічно небезпечних об'єктів. *Збірник наукових праць Харківського військового університету*. Х.: 2001. Вип. 7 (37). – С. 113–114.
13. Brandt M., Becker E., Jöhncke U. A weight-of-evidence approach to assess chemicals: case study on the assessment of persistence of 4,6-substituted phenolic benzotriazoles in the environment. *Environ Sci Eur*. 28, 4, 2016. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0072-y>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: