

О. Є. Басманов, д.т.н., професор, головн. н.с. (ORCID 0000-0002-6434-6575)
С. С. Говаленков, нач. відділу інф.-техн. забезпеч. (ORCID 0000-0002-1894-1971)

ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ВИКЛИКАНИХ ВИКИДОМ ЛЕГКИХ ГАЗОПОДІБНИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН

В роботі запропоновані заходи попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з викидом легких газоподібних небезпечних хімічних речовин. Ці заходи складаються з розробки та удосконалення математичних моделей, що визначають рівні концентрацій небезпечних хімічних речовин в повітрі та дозволяють прогнозувати зони розповсюдження цих речовин для запобігання загибелі та травмування особового складу аварійно-рятувальних підрозділів, що здійснюють необхідні дії по локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій. Обґрунтовано можливість попередження надзвичайних ситуацій, обумовлених викидом легких газоподібних небезпечних хімічних речовин, шляхом побудови стохастичних математичних моделей визначення прогнозованої рівня концентрації небезпечних хімічних речовин та структурування зон їх розповсюдження. Сформульовано задачу розповсюдження легкої газоподібної речовини в атмосфері, яка являє собою лінійне диференціальне рівняння параболічного типу, крайової умови, що описує непроникність поверхні землі для цієї речовини, а також початкову умову, яка задає концентрацію речовини у повітрі у момент часу, що передуює аварії. За допомогою апарату функцій Гріна побудовано розв'язок рівняння дифузії легкої газоподібної небезпечної хімічної речовини при постійній інтенсивності викиду. Для задачі дифузії у стохастичній постановці отримано аналітичний вираз для математичного очікування концентрації небезпечної хімічної газоподібної речовини в атмосфері. Математична модель попередження надзвичайних ситуацій, обумовлених техногенним викидом в атмосферу небезпечних легких газоподібних речовин, являє собою систему з трьох аналітичних залежностей, перша з яких дозволяє розрахувати максимально можливі межі небезпечних зон у разі нескінченного у часі розповсюдження небезпечної хімічної газоподібної речовини в атмосфері; друга дозволяє розрахувати межі небезпечних зон після закінчення викиду; третя дозволяє розрахувати зміни меж небезпечних зон, утворених при короткотривалому викиді. Модель може бути використана при прогнозуванні динаміки областей надзвичайних ситуацій, параметри яких залежать від швидкості вітру.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, небезпечна хімічна речовина, прогнозування, зони розповсюдження хімічної речовини

1. Вступ

Підвищення ефективності проведення оперативних заходів, спрямованих на локалізацію та ліквідацію надзвичайних ситуацій (НС), можливо при підвищенні точності прогнозу динаміки фізичних і геометричних параметрів цих областей. Точність прогнозу, в свою чергу, безпосередньо пов'язана з точністю вхідних параметрів моделей розвитку надзвичайних ситуацій.

При виникненні НС, обумовлених викидом газоподібних небезпечних хімічних речовин (НХР) необхідно якнайшвидше евакуювати людей із зон ураження [1]. Внаслідок того, що існуючі методи попередження таких НС та моделі які в них використовуються виділяють лише границю зони розповсюдження НХР, виникає протиріччя: або всюди в цій зоні використовувати максимальні засоби захисту особового складу, або обмежитись використанням лише фільтруючих протигазів. В першому випадку збільшується час проведення евакуації людей з небезпечної зони, у другому – збільшується ймовірність ураження особового складу підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту, задіяних в локалізації наслідків НС.

Для існуючих на теперішній час методів прогнозування для попередження НС, пов'язаних з викидом легких газоподібних НХР та моделей поширення таких речовин в повітрі, характерно усереднення вхідних даних (напрямку і швидкості вітру); використання показників, що характеризують турбулентність атмосфери, у вигляді емпіричних залежностей, деякі параметри яких включають в себе суб'єктивний фактор (визначення класу стабільності атмосфери); отримання усередненого в часі результату – концентрації НХР в атмосфері. У той же час, у існуючих моделях практично не використовується апарат теорії ймовірностей, що є основним при дослідженні механіки турбулентності, яка визначає перенесення в атмосфері, і рушійною силою якого є пульсації швидкості вітру і температури повітря.

У зв'язку з цим однією з проблем є необхідність скорочення часу дій підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту при локалізації НС, пов'язаних викидом легкої газоподібної НХР, шляхом прогнозування величини зони її розповсюдження та визначення рівня концентрації НХР в повітрі. Це підтверджується останніми НС, що виникли наприкінці 2019 року та на початку 2020 року.

27 листопада 2019 року на нафтохімічному заводі TPC Group в техаському місті Порт-Нечесі стався вибух, який спричинив масштабну пожежу, що тривала дві доби [2]. Надзвичайна ситуація сталася в 145 км на схід від Х'юстона, у результаті з навколишніх районів було евакуйовано приблизно 60 тисяч жителів. Аварія спричинила викид отруйних хімікатів у повітря у радіусі кількох кілометрів від заводу, внаслідок чого постраждало троє робітників. Ця НС стала четвертою в 2019 році масштабною пожежею на нафтохімічному виробництві в цьому регіоні США [2].

14 січня 2020 року в іспанській провінції Таррагона на північному сході країни о 18.35 за місцевим часом пролунав вибух на нафтохімічному заводі IQOXE [3]. Результатом цієї НС став викид НХР та загибель трьох людей і п'ятеро постраждалих. Рятувальні служби виступили зі спеціальним попередженням для тих, хто проживає поблизу від заводу. 300 тисячам жителів, що потрапили в потенційно небезпечній зоні, рекомендувалося залишатися в приміщеннях і закрити щільно вікна і вхідні двері в будинках.

Такого роду НС, пов'язані з викидом НХР часто призводять до евакуації постраждалих [4]. При цьому, час евакуації можна було зменшити, але важкі засоби індивідуального захисту призвели до збільшення часу евакуації, тому за діючими в багатьох країнах світу нормативами попередньо складається план аварійної евакуації [5]. Таким чином, важливим є структурування місцевості для визначення небезпечних зон, з яких мають бути евакуйовані люди.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [6] проаналізовано систему розповсюдження попереджень про евакуацію, викликану аварійним викидом небезпечної хімічної речовини. Для аналізу використано метод опитування, що ускладнює перенесення результатів на інші умови. Евакуації населення при виникненні надзвичайної ситуації, пов'язаної з викидом в атмосферу небезпечної хімічної речовини, присвячено роботу [7]. Але фізичні процеси, що лежать в основі розповсюдження хімічної речовини в роботі не розглянуто.

В [8] побудовано модель оцінки ризиків, пов'язаних з процесом евакуації внаслідок хімічної аварії, а також запропоновано алгоритм побудови маршруту евакуації. Але процес розповсюдження хімічної речовини в роботі не досліджено. В [9]

розглянуто мережу сповіщення про надзвичайну ситуацію і її зв'язок з маршрутами евакуації, але закономірності розповсюдження токсичної хмари не досліджено.

В [10] враховано вплив щільності населення на наслідки, заподіяні викидом аміаку. При цьому розглядаються типові погодні умови, а вплив випадкових чинників, таких, наприклад, як пульсації напрямку і швидкості вітру не враховуються.

В [11] використовується програмний пакет АЛОНА для визначення зон ураження внаслідок викиду хлор. При цьому основну увагу приділено визначенню характеристик зони ураження, ситуація в безпосередній близькості з джерелом викиду не розглядається.

В [12] для моделювання розповсюдження хмари хімічно небезпечної речовини використовується нейронна мережа з глибоким навчанням, що дозволяє уникнути проблем, типових традиційних нейронних мереж, зокрема від'ємних значень концентрацій та перенавчання. Але загальним недоліком використання нейронних мереж для задач такого типу є прив'язка до набору даних, на якому проводиться навчання, і неможливість визначити межі застосування отриманої моделі.

В [13] запропоновано використовувати CFD моделі, зокрема, для вивчення розповсюдження хмари небезпечної речовини в атмосфері внаслідок аварії. Але застосування до конкретних ситуацій в роботі не розглянуто. В [14] CFD моделі розповсюдження небезпечної хімічної хмари використовуються для обчислення пробіт-функції і знаходження ймовірності загибелі окремої людини. На підставі цих ймовірностей будуються маршрути евакуації, що забезпечують мінімізацію середньої смертності. Вплив випадкових факторів на процес розповсюдження небезпечної хмари в роботі не розглянуто.

В [15] для оптимізації мережі сенсорів для визначення джерела викиду в умовах міської забудови використовується ентропійний критерій. Експериментальна перевірка критерію показала, що такий підхід дозволяє зменшити кількість датчиків без втрати точності визначення. При цьому визначення меж небезпечних зон в роботі не розглядається. В [16] наведено метод визначення джерела викиду хімічної речовини, що базується на вихровому моделюванні LES і включає розв'язання спряжених рівнянь усередненого за часу потоку. Такий підхід не враховує випадкового характеру процесу розповсюдження речовини в атмосфері.

Тому невирішеною частиною проблеми є врахування випадкового характеру процесу розповсюдження газоподібної небезпечної хімічної речовини в атмосфері при побудові меж небезпечних зон.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є обґрунтування можливості попередження надзвичайних ситуацій, обумовлених викидом легких газоподібних небезпечних хімічних речовин, шляхом побудови стохастичних математичних моделей визначення прогнозованого рівня концентрації НХР та структурування зон їх розповсюдження.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- сформулювати задачу розповсюдження легкої газоподібної речовини в атмосфері;
- отримати розв'язок рівняння дифузії легкої газоподібної небезпечної хімічної речовини при постійній інтенсивності викиду для детермінованого і стохастичного випадків;

– побудувати математичну модель попередження надзвичайних ситуацій, обумовлених техногенним викидом в атмосферу небезпечних легких газоподібних речовин.

4. Формулювання задачі розповсюдження легкої газоподібної хімічної речовини в атмосфері

Розглянемо надзвичайну ситуацію техногенного характеру, що пов'язана з неперервним викидом НХР з місця аварії. При виконанні висунутих вище припущень його концентрація у повітрі буде описуватися рівнянням дифузії:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = a \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + a \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial q}{\partial x} - v_y \frac{\partial q}{\partial y} - v_z \frac{\partial q}{\partial z} + \Phi(x, y, z, t), \quad (1)$$

де Φ – об'ємна густина джерела речовини, що дифундує, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$, $q(x, y, z, t)$ – концентрація речовини, $\text{кг}/\text{м}^3$; a , a_z – коефіцієнти дифузії в горизонтальному і вертикальному напрямках; $\vec{v}(v_x, v_y)$ – вектор, що визначає напрямок і швидкість вітру, $\text{м}/\text{с}$, v_z – вертикальна складова швидкості вітру, обумовлена категорією стійкості атмосфери і густиною НХР. Виразимо об'ємну густина джерела НХР $\Phi(x, y, z)$ через інтенсивність викиду речовини E , $\text{кг}/\text{с}$,

$$\Phi = \frac{E}{\Delta V}, \quad (2)$$

де ΔV – малий об'єм, утворений вихідним отвором площею S і товщиною Δh . Нехтуючи розмірами вихідного отвору у порівнянні з розмірами області, яка підпадає під вплив НХР, перейдемо до границі при $\Delta V \rightarrow 0$:

$$\Phi(x, y, z, t) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{E}{\Delta V} = E \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \quad (3)$$

де $\delta(x)$ – дельта-функція Дірака; (x_0, y_0, z_0) – координати точки, з якої відбувається викид НХР. Сумістимо початок координат з точкою викиду речовини і будемо вважати, що викид відбувається з точки $(0, 0, z_0)$. Тоді рівняння розповсюдження НХР у повітрі набуде вигляду:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = a \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + a \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial q}{\partial x} - v_y \frac{\partial q}{\partial y} - v_z \frac{\partial q}{\partial z} + E \delta(x) \delta(y) \delta(z - z_0). \quad (4)$$

Початкова умова має вигляд:

$$q(x, y, z, 0) = 0, \quad (5)$$

що означає відсутність НХР у повітрі до моменту аварії. Крайова умова описує непроникність поверхні землі ($z = 0$) для речовини, що дифундує в атмосфері:

$$\left. \frac{\partial q}{\partial z} \right|_{z=0} = 0. \quad (6)$$

Диференціальне рівняння (4) разом з початковою умовою (5) і крайовою умовою (6) описують процес розповсюдження НХР у повітрі при його неперервному викиді із точки $(0,0,z_0)$.

5. Розв'язання рівняння дифузії легкої газоподібної речовини при постійній інтенсивності викиду

Для розв'язання рівняння (4) з початковою умовою (5) і крайовою умовою (6), перейдемо до нових змінних

$$\begin{cases} x' = x - \int_0^t v_x(t) dt, \\ y' = y - \int_0^t v_y(t) dt, \\ z' = z - v_z t. \end{cases} \quad (7)$$

Тоді рівняння (4) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & a \frac{\partial^2 u}{\partial x'^2} + a \frac{\partial^2 u}{\partial y'^2} + a_z \frac{\partial^2 u}{\partial z'^2} + \\ & + E \delta \left(x' + \int_0^t v_x(t) dt \right) \delta \left(y' + \int_0^t v_y(t) dt \right) \delta (z' + v_z t - z_0). \end{aligned} \quad (8)$$

Його розв'язок може бути представлений у вигляді

$$u(x', y', z') = \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\xi, \eta, \zeta, \tau) \cdot G(x', y', z', \xi, \eta, \zeta, t - \tau) d\xi d\eta d\zeta d\tau, \quad (9)$$

де

$$\Phi(\xi, \eta, \zeta, \tau) = E \delta \left(\xi + \int_0^{\tau} v_x(t) dt \right) \cdot \delta \left(\eta + \int_0^{\tau} v_y(t) dt \right) \cdot \delta (\zeta + v_z \tau - z_0);$$

$G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, t)$ – функція Гріна:

$$\begin{aligned} G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, t) = & \frac{1}{8(\pi t)^{3/2} a \sqrt{a_z}} \exp \left[-\frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{4at} \right] \times \\ & \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - \zeta)^2}{4a_z t} \right] + \exp \left[-\frac{(z + \zeta)^2}{4a_z t} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Враховуючи властивості δ -функції при інтегруванні і повертаючись до змінних x, y та функції $q(x, y, z, t)$, отримуємо концентрацію речовини у повітрі [17]:

$$q(x, y, z, t) = \frac{E}{8\pi^{3/2} a \sqrt{a_z}} \cdot \int_0^t \frac{1}{(t-\tau)^{3/2}} \times \exp \left[-\frac{\left(x - \int_{\tau}^t v_x(s) ds \right)^2 + \left(y - \int_{\tau}^t v_y(s) ds \right)^2}{4a(t-\tau)} \right] \times \\ \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - v_z(t-\tau) - z_0)^2}{4a_z(t-\tau)} \right] + \exp \left[-\frac{(z - v_z(t-\tau) + z_0)^2}{4a_z(t-\tau)} \right] \right\} d\tau. \quad (11)$$

Нехай $\mu(x, y, z, t)$ – випадковий процес, що описує концентрацію НХР у повітрі; $\xi(t)$, $\eta(t)$ – компоненти вектора швидкості вітру, що також є випадковим процесом. Введемо наступні позначення:

$$\theta_{\tau}(t) = \int_{\tau}^t \xi(s) ds; \quad \rho_{\tau}(t) = \int_{\tau}^t \eta(s) ds. \quad (12)$$

Якщо $\xi(s)$, $\eta(s)$ розподілені за нормальним законом, то випадкові процеси $\theta_{\tau}(t)$, $\rho_{\tau}(t)$ також будуть мати нормальний розподіл [18]. Тоді концентрація НХР у повітрі при його неперервному витіканні може бути записана у вигляді:

$$\mu(x, y, z, t) = \frac{E}{8\pi^{3/2} a \sqrt{a_z}} \int_0^t \frac{1}{(t-\tau)^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x - \theta_{\tau}(t))^2 + (y - \rho_{\tau}(t))^2}{4a(t-\tau)} \right] \times \\ \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - v_z(t-\tau) - z_0)^2}{4a_z(t-\tau)} \right] + \exp \left[-\frac{(z - v_z(t-\tau) + z_0)^2}{4a_z(t-\tau)} \right] \right\} d\tau, \quad (13)$$

де випадкові процеси $\theta_{\tau}(t)$ і $\rho_{\tau}(t)$ розподілені за двовимірним нормальним законом. Враховуючи комутативність операцій інтегрування і математичного очікування, математичне очікування для (13) набуде вигляду:

$$M\mu(x, y, z, t) = \frac{E}{4\pi^{3/2} \sqrt{a_z}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(2as + D_{\theta})(2as + D_{\rho}) - K_{\theta\rho}^2}} \times \\ \times \exp \left[-\frac{(2as + D_{\rho})(x - \bar{v}_x s)^2 + (2as + D_{\theta})(y - \bar{v}_y s)^2 - 2K_{\theta\rho}(x - \bar{v}_x s)(y - \bar{v}_y s)}{2((2as + D_{\theta})(2as + D_{\rho}) - K_{\theta\rho}^2)} \right] \times \\ \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - v_z s - z_0)^2}{4a_z s} \right] + \exp \left[-\frac{(z - v_z s + z_0)^2}{4a_z s} \right] \right\} ds, \quad (14)$$

де $D_\theta(s)$, $D_\rho(s)$ – дисперсії випадкових процесів $\theta(s)$, $\rho(s)$ відповідно; $K_{\theta\rho}(s)$ – їх сумісна кореляційна функція.

Із аналізу (14) випливає, що підстановка у цей вираз значень $D_\theta = 0$, $D_\rho = 0$, $K_{\theta\rho} = 0$ (тобто детермінованого напрямку і швидкості вітру) перетворює його в (11) при $v_x = \text{const}$, $v_y = \text{const}$.

В якості приклада на рис. 1 наведено межі області розповсюдження аміаку в момент часу $t = 10$ хв. на висоті $z = 2$ м. При цьому критерієм належності до хмари обрано перевищення середньою концентрацією значень, більших, ніж $q_{\text{кр}} = 20$ мг/м³ (ГДК робочої зони). При цьому середня швидкість вітру прийнято $v_x = 2$ м/с, $v_y = 0$; вертикальна складова $v_z = 0,005$ м/с; коефіцієнт дифузії $a = a_z = 10$ м²/с; висота джерела $z_0 = 2$ м; інтенсивність джерела викиду $E = 0,1$ кг/с.

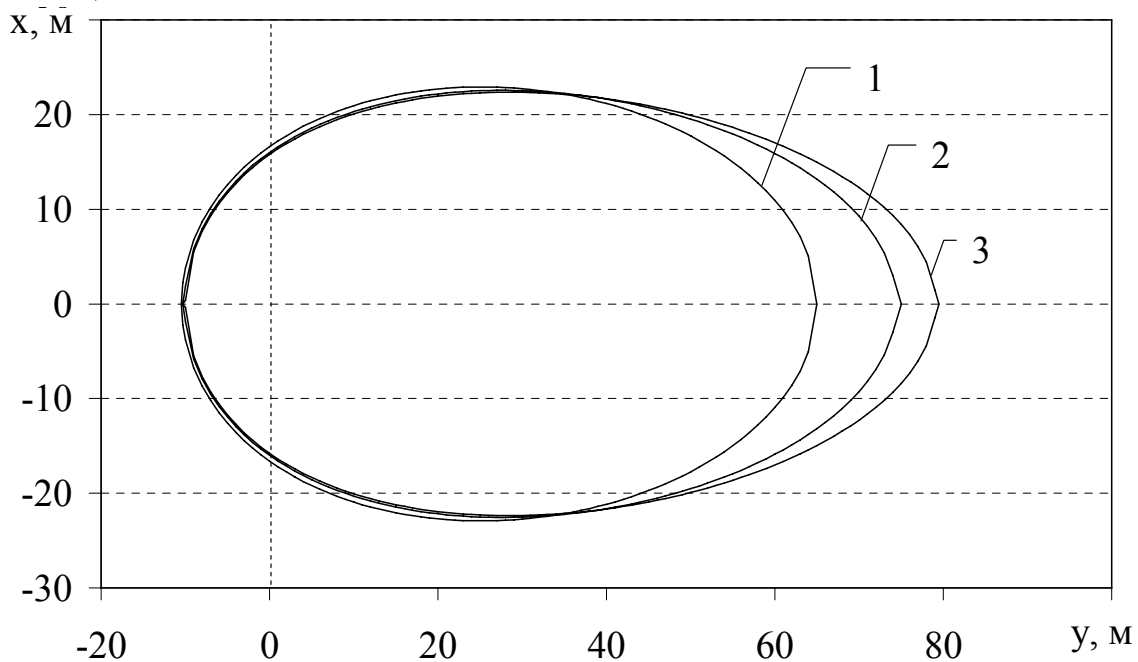


Рис. 1. Стационарна межа зони розповсюдження аміаку з концентрацією більшою ГДК при неперервному викиді на висоті $z = 2$ м при різних значеннях дисперсії швидкості вітру: 1 – $\sigma_\xi^2 = \sigma_\eta^2 = 0,4$ м²/с²; 2 – $\sigma_\xi^2 = \sigma_\eta^2 = 0,1$ м²/с²; 3 – $\sigma_\xi^2 = \sigma_\eta^2 = 0$

З аналізу рис. 1 випливає, що наявність випадкових пульсацій швидкості вітру призводить до скорочення зони ураження в напрямку вітру: зменшення дисперсії швидкості вітру з $0,4$ м²/с² до $0,1$ м²/с² призводить до збільшення зони ураження у підвітряному напрямку на 15%.

6. Розробка математичної моделі розрахунку меж зон розповсюдження небезпечної газоподібної речовини

З урахуванням сукупності виразів (13)-(14) щодо оцінки граничних значень математичного очікування концентрації речовини у повітрі, що відповідає нескінченно триваючому викиду НХР, отримаємо залежність зміни концентрації небезпечної хімічної газоподібної речовини у повітрі при довготривалому викиді:

$$\begin{aligned}
M\mu(x, y, z) = & \frac{E}{4\pi^{3/2} \sqrt{a_z}} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(2as + D_\theta)(2as + D_\rho) - K_{\theta\rho}^2}} \times \\
& \times \exp \left[-\frac{(2as + D_\rho)(x - \bar{v}_x s)^2 + (2as + D_\theta)(y - \bar{v}_y s)^2 - 2K_{\theta\rho}(x - \bar{v}_x s)(y - \bar{v}_y s)}{2((2as + D_\theta)(2as + D_\rho) - K_{\theta\rho}^2)} \right] \times \\
& \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - v_z s - z_0)^2}{4a_z s} \right] + \exp \left[-\frac{(z - v_z s + z_0)^2}{4a_z s} \right] \right\} ds. \quad (15)
\end{aligned}$$

Залежність (15) дозволяє розрахувати межі максимально можливої зони ураження внаслідок довготривалого викиду техногенного характеру.

З математичної точки зору ситуація після припинення викиду небезпечної хімічної газоподібної речовини описується П-образною функцією об'ємної густини джерела $\Phi(t)$, де початок активності джерела співпадає з моментом часу $t=0$, а припинення викиду НХР відбувається в момент часу t_0 . Тоді функцію джерела може бути записана у вигляді

$$\Phi(t) = (1 - l(t - t_0))\Phi_0,$$

де $l(t)$ – функція Хевісайда. Вважаючи розміри отвору, через який відбувається витік НХР, нескінченно малими (у порівнянні з зоною ураження), аналогічно (3) запишемо об'ємну густину джерела НХР у вигляді

$$\Phi(x, y, z, t) = E\delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(z - z_0)(1 - l(t - t_0)),$$

де E – інтенсивність джерела НХР, кг/с; (x_0, y_0, z_0) – координати джерела НХР. Суміщаючи початок координат з джерелом НХР, отримаємо рівняння розповсюдження НХР у повітрі від точкового джерела інтенсивністю E , що знаходиться у точці $(0, 0, z_0)$ і діє протягом інтервалу часу $(0, t_0)$:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial q}{\partial t} = & a \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + a \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial q}{\partial x} - v_y \frac{\partial q}{\partial y} - v_z \frac{\partial q}{\partial z} + \\
& + E\delta(x)\delta(y)\delta(z - z_0)(1 - l(t - t_0)). \quad (16)
\end{aligned}$$

З початковою умовою (5) і крайовою умовою (6). Виконуючи заміну (7), отримаємо

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} = & a \frac{\partial^2 u}{\partial x'^2} + a \frac{\partial^2 u}{\partial y'^2} + a_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \\
& + E\delta\left(x' + \int_0^t v_x(t)dt\right)\delta\left(y' + \int_0^t v_y(t)dt\right)\delta(z' + v_z t - z_0)(1 - l(t - t_0)). \quad (17)
\end{aligned}$$

Розв'язок такого рівняння може бути записаний у вигляді:

$$u(x', y', z') = \int_0^t \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \Phi(\xi, \eta, \zeta, \tau) \cdot G(x', y', z', \xi, \eta, \zeta, t - \tau) d\xi d\eta d\zeta d\tau, \quad (18)$$

де

$$\Phi(\xi, \eta, \zeta, \tau) = E \delta\left(\xi + \int_0^\tau v_x(t) dt\right) \cdot \delta\left(\eta + \int_0^\tau v_y(t) dt\right) \cdot \delta(\zeta + v_z \tau - z_0)(1 - 1(\tau - t_0));$$

$G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta, t)$ – функція Гріна вигляду (10). Тоді вираз для концентрації речовини у повітрі набуде вигляду

$$q(x, y, z, t) = \frac{E}{8\pi^{3/2} a \sqrt{a_z}} \cdot \int_0^t \frac{1 - 1(\tau - t_0)}{(t - \tau)^{3/2}} \exp\left[-\frac{\left(x - \int_\tau^t v_x(s) ds\right)^2 + \left(y - \int_\tau^t v_y(s) ds\right)^2}{4a(t - \tau)}\right] \times \\ \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z - v_z(t - \tau) - z_0)^2}{4a_z(t - \tau)}\right] + \exp\left[-\frac{(z - v_z(t - \tau) + z_0)^2}{4a_z(t - \tau)}\right] \right\} d\tau. \quad (19)$$

Отже, для вітру, що описується вектором швидкості з випадковими компонентами $\vec{v} = (\xi(t), \eta(t))$, концентрація НХР у повітрі буде описуватися випадковим процесом $\mu(x, y, z, t)$:

$$\mu(x, y, z, t) = \frac{E}{8\pi^{3/2} a \sqrt{a_z}} \cdot \int_0^t \frac{1 - 1(\tau - t_0)}{(t - \tau)^{3/2}} \exp\left[-\frac{\left(x - \int_\tau^t \xi(s) ds\right)^2 + \left(y - \int_\tau^t \eta(s) ds\right)^2}{4a(t - \tau)}\right] \times \\ \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z - v_z(t - \tau) - z_0)^2}{4a_z(t - \tau)}\right] + \exp\left[-\frac{(z - v_z(t - \tau) + z_0)^2}{4a_z(t - \tau)}\right] \right\} d\tau. \quad (20)$$

Аналіз співвідношення (20) свідчить, що при $\tau > t_0$ підінтегральна функція цього виразу перетворюється на 0. Це означає, що на інтервалі часу $(0, t_0)$, тобто під час дії джерела розподіл концентрації НХР співпадає з випадком довготривалого викиду. Після того, як викид припинився ($t > t_0$), концентрація НХР у повітрі описується виразами аналогічними (19), (20), але інтеграли мають сталу верхню межу, що дорівнює t_0 . При цьому, якщо тривалість викиду $t_0 = \infty$, то розв'язки (19), (20) перетворюються в (11), (14).

Повторюючи для (20) ті самі міркування, що і при виводі математичного очікування для постійно діючого джерела, отримуємо для джерела з П-образною функцією інтенсивності

$$\begin{aligned}
 M\mu(x, y, z, t) = & \frac{E}{4\pi^{3/2} \sqrt{a_z}} \int_{t-t_0}^t \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(2as + D_\theta)(2as + D_\rho) - K_{\theta\rho}^2}} \times \\
 & \times \exp \left[-\frac{(2as + D_\rho)(x - \bar{v}_x s)^2 + (2as + D_\theta)(y - \bar{v}_y s)^2 - 2K_{\theta\rho}(x - \bar{v}_x s)(y - \bar{v}_y s)}{2((2as + D_\theta)(2as + D_\rho) - K_{\theta\rho}^2)} \right] \times \\
 & \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - v_z s - z_0)^2}{4a_z s} \right] + \exp \left[-\frac{(z - v_z s + z_0)^2}{4a_z s} \right] \right\} ds, \quad (21)
 \end{aligned}$$

де $t > t_0$. Модель (21) дозволяє знайти межі небезпечних зон після припинення викиду небезпечної хімічної газоподібної речовини.

В якості приклада розглянемо витік оксиду азоту (NO_2) з інтенсивністю $E = 50$ г/с, що відбувається на висоті $z_0 = 3$ м. Вітер з середньою швидкістю $v_x = 1$ м/с направлений вздовж вісі OX , вертикальна складова $v = 0,01$ м/с, дисперсії компонент швидкості вітру $\sigma_\xi^2 = 0,2$ м²/с², $\sigma_\eta^2 = 0,1$ м²/с². Припустимо, що джерело НХР діє протягом $t_0 = 20$ хв. На рис. 2 представлено динаміку зміни області, в якій математичне очікування концентрації оксиду азоту у повітрі на висоті $z = 2$ м перевищує ГДК і яка відповідає періоду активності джерела НХР ($t \leq t_0$). Рис. 3 ілюструє динаміку зміни цієї області після припинення викиду НХР ($t > t_0$).

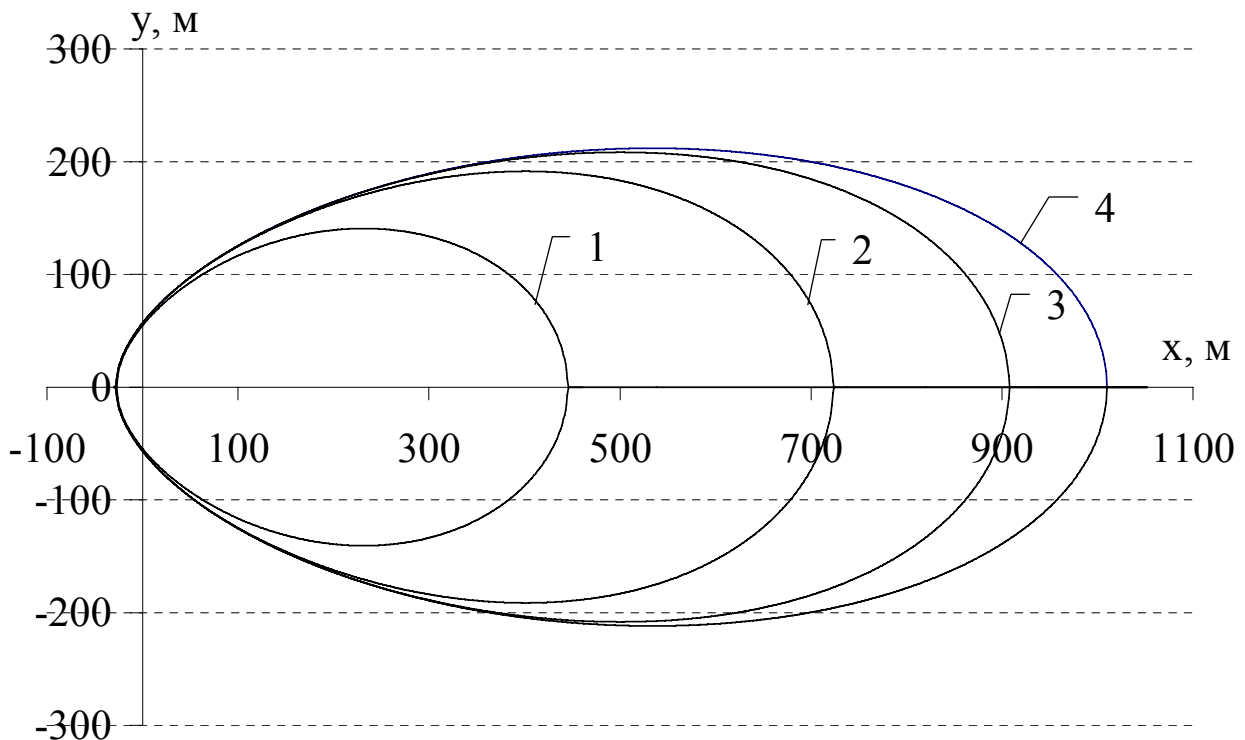


Рис. 2. Межі областей, в яких концентрація оксиду азоту перевищує ГДК, для різних моментів часу: 1 – $t = 5$ хв.; 2 – $t = 10$ хв.; 3 – $t = 15$ хв.; 4 – $t = 20$ хв

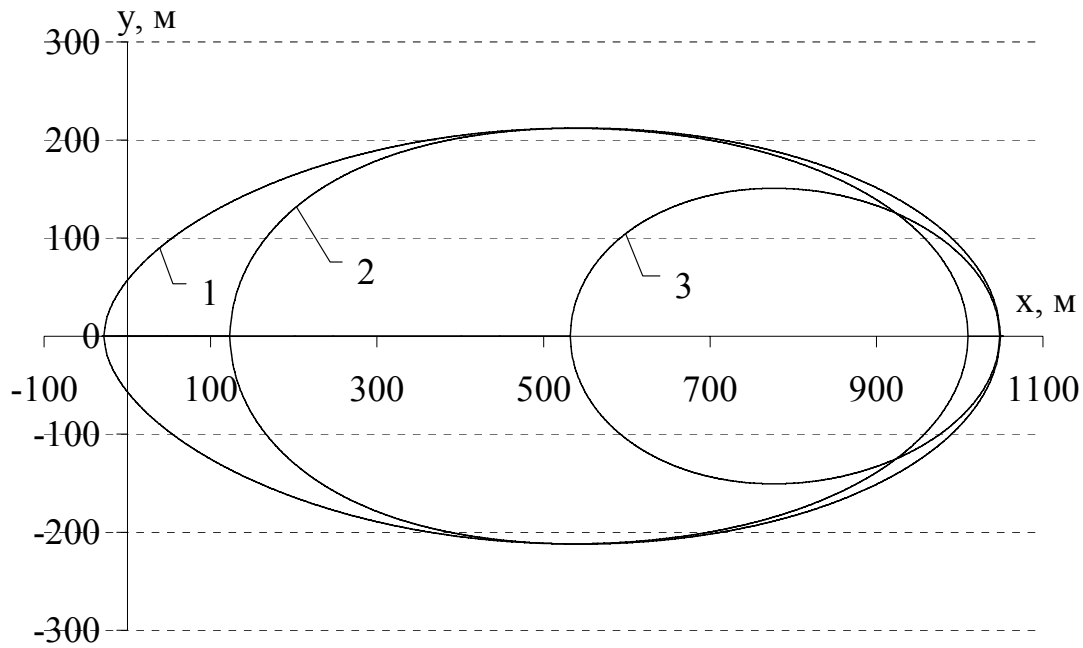


Рис. 3. Межі областей, в яких концентрація оксиду азоту перевищує ГДК, для різних моментів часу: 1 – $t = 20$ хв.; 2 – $t = 25$ хв.; 3 – $t = 30$ хв.

Відзначимо, що якщо тривалість викиду t_0 спрямувати до нуля, одночасно збільшуючи інтенсивність викиду, так, щоб зберігалась загальна кількість викинутої речовини ($E \cdot t_0 = \text{const}$), то отримаємо миттєвий викид, а розв'язок (21) набуде вигляду

$$M\mu(x, y, z, t) = \frac{m}{4\pi^{3/2} \sqrt{a_z t} \sqrt{(2at + D_\theta)(2at + D_\rho) - K_{\theta\rho}^2}} \times$$

$$\times \exp \left[- \frac{(2at + D_\rho)(x - \bar{v}_x t)^2 + (2at + D_\theta)(y - \bar{v}_y t)^2 - 2K_{\theta\rho}(x - \bar{v}_x t)(y - \bar{v}_y t)}{2((2at + D_\theta)(2at + D_\rho) - K_{\theta\rho}^2)} \right] \times$$

$$\times \left\{ \exp \left[- \frac{(z - v_z t - z_0)^2}{4a_z t} \right] + \exp \left[- \frac{(z - v_z t + z_0)^2}{4a_z t} \right] \right\}. \quad (22)$$

При цьому при рівній масі викинутої речовини більшу небезпеку буде являти короткочасний, але інтенсивний викид, тобто в цьому випадку будуть досягнуті більш високі концентрації небезпечної хімічної речовини у повітрі.

Математична модель попередження надзвичайних ситуацій, обумовлених техногенним викидом в атмосферу небезпечних легких газоподібних речовин, являє собою систему з трьох аналітичних залежностей, перша з яких (15) дозволяє розрахувати межі максимально можливих небезпечних зон (ця математична модель описує межі зон розповсюдження небезпечної хімічної газоподібної речовини в атмосфері в результаті техногенного викиду, який триває нескінченно); друга (21) дозволяє розрахувати межі небезпечних зон після закінчення довготривалого викиду; третя (22) дозволяє розрахувати динаміку зміни меж небезпечних зон, утворених внаслідок короткотривалого викиду.

7. Обговорення результатів побудови моделі попередження надзвичайних ситуацій

Задача розповсюдження легкої газоподібної речовини в атмосфері являє собою сукупність лінійного диференціального рівняння параболічного типу, що описує дифузію речовини у повітрі, крайової умови, що описує непроникність поверхні землі для цієї речовини, а також початкової умови, яка задає концентрацію речовини у повітрі у момент часу, що передує аварії. Випадковий характер вітру призводить до випадковості концентрації речовини в атмосфері і стохастичної постановки задачі про дифузію речовини в атмосфері. В такій ситуації доцільно розглядати математичне очікування концентрації речовини в атмосфері.

Математичне очікування концентрації НХР у повітрі в довільній точці простору буде являти собою неспадну функцію часу, яка прямує до певної скінченної границі (своїй для кожної точки простору). При цьому в точках, розташованих ближче до джерела НХР граничне значення буде досягнуто раніше.

Для викидів, що тривають кілька годин, має сенс в якості верхньої оцінки концентрації НХР в повітрі знайти граничне значення концентрації при нескінченно довгому викиді. Такі тривалі викиди мають місце у випадку аварій на магістральних трубопроводах, коли великий надлишковий тиск и запас речовини забезпечують можливість тривалого викиду.

Після припинення втікання НХР з джерела викиду протягом ще деякого часу зберігається небезпека для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів, що приймають участь в ліквідації аварії, технічного персоналу підприємства, населення. Це обумовлює необхідність оцінки розповсюдження газоподібної НХР у повітрі до її повного розсіювання, тобто зниження концентрації менше критичної.

Отже для практичного застосування важливим є розрахунок меж зон розповсюдження небезпечної хімічної газоподібної речовини в умовах як довготривалого викиду, так і після його закінчення.

Побудована модель може бути використана при прогнозуванні динаміки областей надзвичайних ситуацій, параметри яких залежать від швидкості вітру [19].

8. Висновки

1. Сформульовано задачу розповсюдження легкої газоподібної речовини в атмосфері, яка зводиться до лінійного диференціального рівняння параболічного типу, що описує дифузію речовини у повітрі, і крайової умови, що описує непроникність поверхні землі для цієї речовини, а також початкової умови, яка задає концентрацію речовини у повітрі у момент часу, що передує аварії.

2. За допомогою апарату функцій Гріна отримано розв'язок рівняння дифузії легкої газоподібної небезпечної хімічної речовини при постійній інтенсивності викиду. Для задачі дифузії у стохастичній постановці отримано аналітичний вираз для математичного очікування концентрації небезпечної хімічної газоподібної речовини в атмосфері. Наявність випадкових пульсацій швидкості вітру призводить до скорочення зони ураження в напрямку вітру: зменшення дисперсії швидкості вітру з $0,4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ до $0,1 \text{ м}^2/\text{с}^2$ призводить до збільшення зони ураження у підвітряному напрямку на 15%.

3. Математична модель попередження надзвичайних ситуацій, обумовлених техногенним викидом в атмосферу небезпечних легких газоподібних речовин,

являє собою систему з трьох аналітичних залежностей, перша з яких дозволяє розрахувати максимально можливі межі небезпечних зон у разі нескінченного у часі розповсюдження небезпечної хімічної газоподібної речовини в атмосфері в результаті техногенного викиду; друга дозволяє розрахувати (уточнити) межі небезпечних зон після закінчення, кінцевого у часі, довготривалого викиду; третя дозволяє розрахувати (уточнити) зміни меж небезпечних зон, утворених уразі короткотривалого викиду. Побудована модель може бути застосована для газоподібних речовин, густина яких дорівнює або є меншою, ніж густина повітря, і які не вступають в хімічні реакції з його компонентами.

Література

1. Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances.
2. URL: <https://www.unn.com.ua/uk/news/1838470-tisyachi-meshkantsiv-tekhasu-evakuyovani-cherez-pozhezhu-na-naftokhimichnomu-zavodi>
3. URL: <https://www.eurointegration.com.ua/news/2020/01/14/7105129>
4. Standard for Emergency Services Incident Management System and Command Safety, 2014 Edition. URL: <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=1561>
5. Hu Y., Liu X. Optimization of grouping evacuation strategy in high-rise building fires based on graph theory and computational experiments. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2018. 5 (6). P. 1104–1112. URL: <https://doi.org/10.1109/JAS.2018.7511231>
6. Gai W., Deng Y. Survey-based analysis on the diffusion of evacuation advisory warnings during regional evacuations for accidents that release toxic vapors: A case study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. 57. P. 174–185. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.012>
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, 16 (11). URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph16111948>
8. Gai W., Deng Y., Jiang Zh, Li J., Du Y. Multi-objective evacuation routing optimization for toxic cloud releases. *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. 159. P. 58–68. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.10.021>
9. Gai W., Du Y., Deng Y. Regional evacuation modeling for toxic-cloud releases and its application in strategy assessment of evacuation warning. *Safety Science*. 2018. 109. P. 256–269. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.007>
10. Anjana N. S., Amarnath A., Harindranathan Nair M. V. Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system. *Journal of Environmental Management*. 2018, 210. P. 201–209. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.021>
11. Fatemi F., Ardalan A., Aguirre B., Mansouri N., Mohammadfam I. Areal location of hazardous atmospheres simulation on toxic chemical release: A scenario-based case study from Ray, Iran. *Electronic Physician*. 2017. 9 (10). P. 5638–5645. URL: <http://dx.doi.org/10.19082/5638>
12. Qian F., Chen L., Li J., Ding C., Chen X., Wang J. Direct Prediction of the Toxic Gas Diffusion Rule in a Real Environment Based on LSTM. *International Journal*

of Environmental Research and Public Health. 2019, 16. P. 2133. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph16122133>

13. Ciparisse J. F., Malizia A., Poggi L. A. Numerical Simulations as Tool to Predict Chemical and Radiological Hazardous Diffusion in Case of Nonconventional Events. Modelling and Simulation in Engineering. 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6271853>

14. Wang J., Yu, X., Zong R. A dynamic approach for evaluating the consequences of toxic gas dispersion in the chemical plants using CFD and evacuation modelling. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. P. 65. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104156>

15. Ngae P., Kouichi H., Kumar P., Feiz A., Chpoun A. Optimization of an urban monitoring network for emergency response applications: An approach for characterizing the source of hazardous releases. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2019, 145. Pp. 967–981. URL: <https://doi.org/10.1002/qj.3471>

16. Xue F., Kikumoto H., Li, X., Ooka R. Bayesian source term estimation of atmospheric releases in urban areas using LES approach. Journal of Hazardous Materials. 2018. 349. P. 68–78. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.050>

17. Басманов А. Е., Говаленков С. С. Математическая модель диффузии паров опасных химических веществ в воздухе. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2008. 8. С. 29–39. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3764>

18. National Pollutant Inventory Emissions Estimation Technique Manual for Mining v3.1, Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities. 2012.

19. Басманов А. Е., Говаленков С. С., Васильев М. В. Зонирование местности в районе непрерывно действующего источника опасного химического вещества. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2011. 13. С. 20–33. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/263>

O. Basmanov, DSc, Professor, Chief Researcher

*S. Hovalenkov, Head of the Information and Technical Support Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

PREVENTION THE EMERGENCY SITUATIONS ASSOCIATED WITH EMISSIONS OF LIGHT GASEOUS HAZARDOUS CHEMICALS

The work proposes measures for the prevention of emergencies related to the emission of light gaseous hazardous chemicals. These measures consist of the development and improvement of mathematical models that determine the levels of concentrations of hazardous chemicals in the air and allow the prediction of areas of distribution of these substances to prevent the death and injury of personnel of emergency units, performing the necessary actions to localize and eliminate emergency situations. The possibility of preventing emergencies caused by the release of light gaseous hazardous chemicals by building stochastic mathematical models for determining the predicted concentration level of hazardous chemicals and structuring their distribution zones is substantiated. The problem of the propagation of a light gaseous substance in the atmosphere is formulated. It is a linear differential equation of parabolic type, boundary condition that corresponds to impermeability of ground, initial condition that describes initial concentration of the substance in the atmosphere. The solution of equation of diffusion of light gaseous hazardous chemical substance for the case of constant emission rate is built by using Green's functions. For the stochastic formulation of diffusion problem the expected value of hazardous chemical gas-like substance concentration in the atmosphere is learned. The mathematical model of prevention emergencies caused by technogenic release of light gaseous hazardous chemicals is a system of three analytical expressions. The first one allows determining maximal borders of hazardous are-

as for the case of timeless propagation light gaseous hazardous chemicals in the atmosphere. The second expression allows determining the borders of hazardous areas after the end of release. The third one allows determining the borders of hazardous areas for the case of instant release. The model can be used to predict the dynamics of emergency areas which parameters depend on the wind speed.

Keywords: emergency, hazardous chemical, forecasting, chemical distribution zones

References

1. Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances.
2. URL: <https://www.unn.com.ua/uk/news/1838470-tisyachi-meshkantsiv-tekhasu-evakuyovani-cherez-pozhezhu-na-naftokhimichnomu-zavodi>
3. URL: <https://www.eurointegration.com.ua/news/2020/01/14/7105129>
4. Standard for Emergency Services Incident Management System and Command Safety, 2014 Edition. URL: <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=1561>
5. Hu, Y., Liu, X. (2018). Optimization of grouping evacuation strategy in high-rise building fires based on graph theory and computational experiments. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 5 (6), 1104–1112. URL: <https://doi.org/10.1109/JAS.2018.7511231>
6. Gai, W., Deng, Y. (2019). Survey-based analysis on the diffusion of evacuation advisory warnings during regional evacuations for accidents that release toxic vapors: A case study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 57, 174–185. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.012>
7. Yoo, B., Choi, S.D. (2019). 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*, 16 (11). URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph16111948>
8. Gai, W., Deng, Y., Jiang, Zh, Li, J., Du, Y. (2017). Multi-objective evacuation routing optimization for toxic cloud releases. *Reliability Engineering & System Safety*, 159, 58–68. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.10.021>
9. Gai, W., Du, Y., Deng, Y. (2018). Regional evacuation modeling for toxic-cloud releases and its application in strategy assessment of evacuation warning. *Safety Science*, 109, 256–269. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.007>
10. Anjana, N. S., Amarnath, A., Harindranathan Nair, M. V. (2018). Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system. *Journal of Environmental Management*, 210, 201–209. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.021>
11. Fatemi, F., Ardalan, A., Aguirre, B., Mansouri, N., Mohammadfam, I. (2017). Areal location of hazardous atmospheres simulation on toxic chemical release: A scenario-based case study from Ray, Iran. *Electronic Physician*, 9 (10), 5638–5645. URL: <http://dx.doi.org/10.19082/5638>
12. Qian, F., Chen, L., Li, J., Ding, C., Chen, X., Wang, J. (2019). Direct Prediction of the Toxic Gas Diffusion Rule in a Real Environment Based on LSTM. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2133. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph16122133>
13. Ciparisse, J. F., Malizia, A., Poggi, L. A. (2016). Numerical Simulations as Tool to Predict Chemical and Radiological Hazardous Diffusion in Case of

Nonconventional Events. Modelling and Simulation in Engineering. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6271853>

14. Wang, J., Yu, X., Zong, R. (2020). A dynamic approach for evaluating the consequences of toxic gas dispersion in the chemical plants using CFD and evacuation modelling. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 65. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104156>

15. Ngae, P., Kouichi, H., Kumar, P., Feiz, A., Chpoun, A. (2019). Optimization of an urban monitoring network for emergency response applications: An approach for characterizing the source of hazardous releases. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145, 967-981. URL: <https://doi.org/10.1002/qj.3471>

16. Xue, F., Kikumoto, H., Li, X., Ooka, R. (2018). Bayesian source term estimation of atmospheric releases in urban areas using LES approach. *Journal of Hazardous Materials*, 349. Pp. 68–78. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.050>

17. Basmanov, A. E., Govalenkov, S. S. (2008). Mathematical model of vapor diffusion of hazardous chemicals in the air. *Problems emergencies*, 8, 29–39.

18. National Pollutant Inventory Emissions Estimation Technique Manual for Mining v3.1, Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities, 2012.

19. Basmanov, A. E., Govalenkov, S. S., Vasilyev, M. V. (2011). Zoning of the area in the area of a continuously operating source of a hazardous chemical. *Problems of emergencies*, 13, 20–33.

Надійшла до редколегії: 19.02.2020

Прийнята до друку: 21.02.2020