

О.О. Попов, Київ  
В.О. Ковач, Київ  
А.В. Яцишин, Київ  
Є.Б. Краснов, Київ

## **РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗВИТКУ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ВИКИДОМ АВАРІЙНО ХІМІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН**

**Abstract.** Given work is dedicated to mathematical models creation of emergencies development which connected with dangerous chemicals release. Necessity to develop such models was proved. Sequence of their construction and structure was described. The developed models take into account all main features of the polluted toxic cloud spreading. It gives possibility to use obtained mathematical tools in order to make effective management decisions for risk reduction to the human health during this type emergencies.

### **Вступ**

Особливості розвитку аварії з викидом хімічних речовин дозволяють визначити систему управління процесом розвитку аварії на хімічно небезпечних об'єктах (ХНО) як систему організаційно-економічного управління, яка характеризується комплексною взаємодією елементів, розподілених на значній території, наявністю ієрархічних компонентів у цих системах. В умовах аварії з викидом аварійно хімічно небезпечних речовин (АХНР) та ліквідації її наслідків доводиться мати справу з безліччю взаємопов'язаних процесів випадкового характеру, які розвиваються паралельно в часі і асинхронно взаємодіють один з одним, що дозволяє віднести їх до класу стохастичних дискретних динамічних систем. Використання традиційних математичних методів для аналізу ситуації, що складається і тенденцій її розвитку, а також для оцінки ефективності прийняття рішень по ліквідації аварії найчастіше не дозволяє адекватно описати всі аспекти, пов'язані з нею.

### **Розробка математичних моделей**

Останнім часом для потреб дослідження техносфери інтенсивно розробляються діаграми впливу, які відносяться до класу семантичних функціональних мереж. Такі мережі є графами, але відрізняються додатковою інформацією, що міститься в їх вузлах і дугах (ребрах). З них найбільш придатні в дослідженнях умов виникнення та попередження техносферних пригод так звані мережі стохастичної структури типу Петрі. Перевагами таких мереж є:

1. можливість об'єднання логічних і графічних способів подання досліджуваних подій;

2. облік стохастичності інформації, вираженої вузлами і дугами;
3. доступність для моделювання паралельно протікаючих, циклічних і багаторазово спостережуваних процесів;
4. найбільші (в порівнянні з іншими типами діаграм) логічні можливості в сенсі строгості, компактності і простоти коригування умов спостереження модельованих подій і явищ [1, 2].

Ці мережі мають у загальному випадку чотири типи символів – джерело, стік, мітка (планка) і статистика. На відміну від графів і дерев вузли мережі Петрі можуть характеризуватися і забарвленням. Розмальовка, тобто використання різнокольорових маркерів, дозволяє врахувати різноманітність станів або потоків інформації, модельованих мережами Петрі. В цілому ж ці та інші додаткові можливості стохастичних функціональних мереж дозволяють не тільки збільшити множину враховуваних ознак модельованого об'єкта або процесу, але і спростити їх структуру.

На відміну від детерміністичних мереж, де необхідна реалізація всіх дуг для досягнення конкретного їх вузла, стохастичні мережі можуть обмежуватися виконанням лише частини цих умов. Окремі елементи таких мереж можуть не мати фізичного сенсу, а використовуватися лише для вказівки логічної послідовності реалізації модельованого процесу.

Поєднання потужного математичного апарату з наочністю подання, можливість моделювання причинно-наслідкових зв'язків між подіями паралельних і конфліктних ситуацій, оцінки тимчасових і випадкових характеристик процесів, що протікають, зумовили широке використання мереж Петрі при моделюванні стохастичних дискретних динамічних систем [2-4].

Для здійснення функцій управління та аналізу розвитку аварії з викидом АХНР пропонується використовувати метод прийняття управлінських рішень, заснований на застосуванні мови модифікованих мереж Петрі, надалі іменованих узагальненими мережами Петрі. Skorистаємося загальними визначеннями, викладеними в роботі [2], для більш чіткого уявлення подальших досліджень.

В основі цього методу лежить моделювання аварійної ситуації та процесу її розвитку, а також дій всіх підрозділів при ліквідації як самої аварії на ХНО, так і її наслідків. Об'єктом моделювання є деяка територія (область, промисловий район) з її інфраструктурою. В якості елементів моделі виділимо ХНО (шкідливі виробництва, склади небезпечних для населення і навколишнього середовища речовин і т.д.), об'єкти, що захищаються (народногосподарські об'єкти; населення, розосереджене по населених пунктах, житловим масивам, будівлям в залежності від ступеня деталізації моделі; мости, джерела води і т.д.), сили і засоби попередження і ліквідації наслідків хімічної аварії, стаціонарні та організовані у разі настання аварії пункти обслуговування різного типу (дезактивація, місця збору для евакуації, сховища), об'єкти розміщення транспортних засобів і будівельної техніки, пункти управління силами і засобами (основний, запасний, мобільні).

Залежно від ступеня деталізації елементами моделі можуть виступати окремі одиниці сил і засобів ліквідації наслідків хімічної аварії (бригади швидкої допомоги, одиниці технічних засобів і т.д.). Елементи об'єкта моделювання пов'язані між собою інформаційними (лінії зв'язку) і транспортними магістралями (мережа доріг), причому кожний зв'язок має свої характеристики. Крім того, в моделі об'єкта необхідно враховувати зв'язки між різними вражаючими чинниками. Так, наприклад, руйнування за допомогою вибуху ємностей із стисненими отруйними речовинами і відповідно хімічне зараження, ступінь якого залежить від метеоумов, можуть спричинити і інші аварії.

При нормальному функціонуванні об'єкта (відсутність на території промислового району ознак хімічної аварії) вся система знаходиться в режимі очікування. У термінах моделі це означає, що інформаційні та матеріальні потоки між елементами об'єкта відсутні. Настання хімічної аварії (або небезпеки її виникнення) викликає активізацію переміщення різних типів ресурсів в деякому часовому інтервалі по зв'язках між об'єктами. У цих умовах виникають задачі моделювання розвитку аварії та прийняття рішень про раціональне (в окремих випадках оптимальному) використанні наявних ресурсів, залученні додаткових ресурсів з сусідніх районів для ліквідації наслідків хімічної аварії. Основними критеріями при вирішенні типових завдань, пов'язаних з виникненням аварії на ХНО та ліквідацією її наслідків, є мінімізація можливого збитку при її настанні, а також часу на розгортання сил і засобів у зоні ураження і часу, необхідного для ліквідації її наслідків.

Дамо формальне визначення моделі та її інтерпретацію на мові узагальнених мереж Петрі [3-5].

Нехай  $S^o = \{s_1^o, s_2^o, \dots, s_l^o\}$  – множина потенційно небезпечних хімічних об'єктів, розташованих на досліджуваній території. Кожен об'єкт  $s_l^o$  описується вектором характеристик, що містить дані про тип об'єкта, його місцезнаходження, займаної ним площі, кількості працюючих, типі потенційної небезпеки і масштабі наслідків можливих аварій і т. п.

$S^3 = \{s_1^3, s_2^3, \dots, s_l^3\}$  – множина об'єктів, що захищаються,  $s_i^3$  описується вектором, що містить дані про тип об'єкта, його місцезнаходження, площі, людей, що знаходяться на ньому і т. п.

$S^c = \{s_1^c, s_2^c, \dots, s_r^c\}$  – об'єкти, що входять в сили і засоби ліквідації наслідків хімічної аварії. Об'єкту  $s_r^c$  також відповідає вектор характеристик, що описує тип об'єкта, його місце розташування, наявні ресурси, специфіку, а також деяку множину  $V_{s_r^c}$ , що позначає технічні засоби, призначені для використання в разі настання аварії з викидом АХНР, і які знаходяться на даному об'єкті.

Аналогічним чином, визначаються множини, що позначають об'єкти

обслуговування  $S^{ob}$ , місця розміщення транспортних засобів і будівельної техніки  $S^T$ , пункти управління  $S^Y$  і відповідні конкретним об'єктам вектори характеристик. Інформаційну мережу задамо графом  $G^u$ , вершинами якого є елементи множини  $S = S^o \cup S^3 \cup S^c \cup S^{ob} \cup S^T \cup S^Y$ , дві вершини з'єднані дугою, якщо між об'єктами існує прямий канал зв'язку. Дуги графа є поміченими, мітка визначає тип зв'язку між об'єктами. Транспортну мережу в моделі задамо графом  $G^T$ , вершинами графа є елементи множини  $S$ , що позначає перетини доріг (перехрестя), дугам приписаний вектор характеристики дороги (її довжина, тип покриття, пропускна здатність). Крім того, для потенційно небезпечних хімічних об'єктів задані функціональні взаємозв'язки між різними типами аварій та їх вражаючими факторами. Наприклад, вибух на об'єкті  $S_i^o$  сили  $W_u$  викликає викид АХНР на території промислового об'єкта  $P(s_i^o, w_u) (W(s_i^o, w_u) = P(s_i^o, w_u))$  і т.д.; задані також функціональні залежності для визначення зон дії та інтенсивності різних вражаючих факторів аварії.

Визначимо запропоновану модель в термінах мереж Петрі [6-8].

Кожному потенційно небезпечному хімічному об'єкті  $s_i^o$  з множини  $S_i^o$  поставимо у відповідність фрагмент мережі, що складається із складового переходу  $t_{s_i^o}$  і його вхідної і вихідної позицій  $P_{s_i^o}^{BX}$  і  $P_{s_i^o}^{BIX}$  причому,

$$F(P_{s_i^o}^{BX}, t_{s_i^o}) = 1, F(t_{s_i^o}, P_{s_i^o}^{BIX}) = 1 \text{ і } H(t_{s_i^o}, P_{s_i^o}^{BIX}) = 1.$$

Мережа  $N$  моделює технологічні взаємозв'язки між елементами об'єкта  $S^o$  або функціональні взаємозв'язки між різними вражаючими факторами та їх наслідками, які можливі при виникненні на об'єкті хімічної аварії. У тривіальному випадку мережа  $N_{s_i^o}$  складається з однієї позиції  $P_{s_i^o}$  і вхідного і вихідного переходів. Кожному типу вражаючого фактора відповідає множина кольорів маркерів  $\Omega^{n\varphi} = \{\omega_k^{n\varphi(I)}\}$ , де  $k$  – індекс типу вражаючого фактора, а  $I$  – його інтенсивність. В режимі нормального функціонування об'єкта в позиції  $P_{s_i^o}$  мережі  $N_{s_i^o}$  знаходиться маркер кольору  $\omega_0^{n\varphi} \in \omega^{n\varphi}$ , який не пропускається вихідним переходом мережі  $N_{s_i^o}$ . Настання хімічної аварії моделюється заміною маркера кольору  $\omega_0^n$  на маркер кольору  $\omega_k^{n\varphi(I)}$ , який відповідає типу і тяжкості аварії, що настала. Якщо для модельованого об'єкта задані функціональні взаємозв'язки між вражаючими факторами та їх наслідками, тобто мережа  $N_{s_i^o}$  не тривіальна і робота мережі в загальному випадку породжує набір маркерів кольорів  $\{\omega_1^{n\varphi(I_1)}, \dots, \omega_{k_1}^{n\varphi(I_1)}\}$ , які через

вихідний перехід мережі  $N_{s_i^o}$  будуть пропущені у вихідну позицію  $P_{s_i^o}^{BIX}$  [9].

Поява маркера  $\omega_k^{n\phi(t)}$  в даній позиції визначає потребу в ресурсах, необхідних для ліквідації наслідків дії  $k$ -го вражаючого фактора інтенсивності  $I$ . Ресурси, які використовуються для ліквідації наслідків аварії з викидом АХНР типу  $\omega_k^{n\phi(t)}$ , моделюються маркерами  $\omega_k^{cc(f)}$ , де  $f$  – потенційна можливість ліквідації. Об'єкти, що захищаються, з множини  $S^3 = \{S_j^3\}$  представимо складовим переходом  $t_{s_j^3}$  (складається з вхідного  $\bar{t}_{s_j^3}$  і вихідного  $\bar{\bar{t}}_{s_j^3}$  переходів) і позиції  $P_{s_j^3}$  і його вхідної і вихідної позиціями  $P_{s_j^3}^{BIX}$  і  $P_{s_j^3}^{BIX}$  з функціями інцидентності позицій та переходів  $F(P_{s_j^3}^{BIX}, t_{s_j^3})=1$ ,  $F(P_{s_j^3}^{BIX}, t_{s_j^3})=1$  і  $H(t_{s_j^3}, P_{s_j^3}^{BIX})=1$ .

Об'єкти  $S^c$ ,  $S^{ob}$  та  $S^T$ , які містять сили і засоби, які можуть бути використані для ліквідації наслідків аварії з викидом АХНР, в моделі представлені складовими переходами  $t_{s_r^{cc}}(\bar{t}_{s_r^{cc}}, \bar{\bar{t}}_{s_r^{cc}}, P_{s_r^{cc}})$ , що містять в позиції  $P_{s_r^{cc}}$  деякий набір маркерів, який відповідає засобам ліквідації наслідків хімічної аварії, що знаходяться на об'єкті (множина  $V_{s_r^{cc}}$ ). Пункти управління  $S^y$  моделюються складовим переходом  $t_{s_m^y}(\bar{t}_{s_m^y}, \bar{\bar{t}}_{s_m^y}, P_{s_m^y})$ .

Вхідний перехід  $\bar{t}_{s_m^y}$  пов'язаний з усіма об'єктами моделі, а вихідний перехід  $\bar{\bar{t}}_{s_m^y}$  – з об'єктами, що входять до складу сил і засобів з ліквідації наслідків аварії на ХНО. Дані зв'язку представлені за допомогою дуг, що моделюють інформаційні зв'язки між об'єктами. Вихідний перехід  $\bar{\bar{t}}_{s_m^y}$  моделює прийняття рішень щодо залучення тих чи інших коштів для ліквідації наслідків хімічної аварії, і в загальному випадку його функція спрацьовування може мати складний вигляд залежно від стратегії прийняття рішень.

Якщо об'єкт потрапляє в зону дії вражаючих факторів хімічної аварії, то в позицію  $P_{s_j}$  заносяться маркери кольору  $\omega_{k_j}^{n\phi(t_j)}$ , які відповідають тяжкості наслідків дії різних вражаючих факторів аварії та які визначаються за інтенсивністю дії вражаючих факторів у зоні знаходження об'єкта.

Розглянемо динаміку функціонування пропонованої моделі [4, 7, 8]. У стаціонарному режимі (під час відсутності аварійної ситуації) жоден з переходів моделі не може бути активізований, у всіх вихідних позиціях переходів, що моделюють об'єкти множини  $S = S^o \cup S^3 \cup S^c \cup S^{ob} \cup S^T \cup$ ,

$\cup S^y$  містяться маркери кольору  $\omega_0^{n\phi} \in \Omega^{n\phi}$ . Дане маркування мережі назвемо стаціонарним та позначимо через  $M_c$ . Виникнення на промисловому об'єкті аварії з викидом АХНР моделюється формуванням початкового маркування  $M_0$ , що містить маркери  $\omega_k^{n\phi(t)}$  в позиції об'єкта – джерела хімічної аварії і в позиціях  $P_{s_j}$  всіх об'єктів, що потрапили в зону дії вражаючих факторів.

Ліквідація наслідків аварії відповідає переходу мережі в стаціонарний стан, тобто досягненню маркування  $M_c$  [10].

Якщо термінальний мову  $L^{T(M_c)}(N, M_0) = \{l_w\}$  мережі  $N$ , що розглядається, з початковим станом  $M_0$  і фінальним маркуванням  $M_c$  не порожній, то існує можливість ліквідації наслідків аварії з викидом АХНР силами і засобами, наявними в промисловому районі.

Слова даної термінальної мови представляють можливі варіанти ліквідації наслідків хімічної аварії. На множині слів можливі постановка і розв'язання задач підвищення ефективності прийняття управлінських рішень з ліквідації її наслідків. Критеріями прийняття рішень можуть служити мінімальний час на ліквідацію її наслідків (або наслідків деякого типу, наприклад, мінімальний час для вивозу постраждалих із зони ураження), мінімальні матеріальні втрати і т.п.

В загальному вигляді типову задачу оптимізації в термінах узагальнених мереж Петрі можна записати у вигляді

$$I = \min F(l_w),$$

де  $l_w \in L^{T(M_c)}(N, M_0)$  – значення обраного критерію при реалізації плану ліквідації наслідків аварії з викидом АХНР  $l_w$ .

При прийнятті рішень даного типу в умовах настання хімічної аварії виділимо наступні основні етапи [2, 10]:

- формування інформаційної моделі регіону (виділення множин об'єктів моделі та їх взаємозв'язків);
- побудова моделі регіону в термінах узагальнених мереж Петрі (формування мережі Петрі  $N$ );
- визначення початкового маркування  $M_0$  мережі  $N$  в умовах настання аварії;
- виконання мережі і формування термінальної мови  $L^{T(M_c)}(N, M_0) = \{l_w\}$ , яка переводить мережу в стаціонарний стан з маркуванням  $M_c$  (на даному етапі використовується математичний апарат узагальнених мереж Петрі).

Отримана термінальна мова є простором допустимих значень розв'язків

задачі вибору планів ліквідації наслідків аварії з викидом АХНР. На заключному етапі відповідно до заданих критеріїв ефективності вибирається оптимальний (раціональний) варіант (множина варіантів) плану дій в умовах хімічної аварії.

### **Висновки**

Математичне моделювання розвитку надзвичайних ситуацій, пов'язаних з викидом аварійно хімічно небезпечних речовин, дає можливість заздалегідь виявити напрямки розповсюдження зараженої хмари, оцінити зони ураження та ризик для здоров'я населення.

Побудовані нові математичні моделі мають суттєві переваги перед існуючими аналогами, і їх використання значно збільшує ефективність прийняття управлінських рішень щодо попередження надзвичайних ситуацій такого типу, а в разі їх виникнення – швидкої ліквідації наслідків.

1. *Белов П.Г.* Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: учеб. пособие / П.Г. Белов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 512 с.
2. *Шоботов В.М.* Цивільна оборона: навчальний посібник / В.М. Шоботов. – вид. 2-ге, перероб. – К.: Центр навчальної літератури, 2006. – 438 с.
3. *Дивизинюк М.М.* Модель управления чрезвычайной ситуацией / М.М. Дивизинюк, Г.М. Коротенко, Г.А. Черненькая и др. // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – 2009. – Вып. 4(32). – С.204-208.
4. *Дивизинюк М.М.* Особенности моделирования чрезвычайных ситуаций, вызванных распространением антропогенных загрязнений / М.М. Дивизинюк, Е.В. Азаренко, А.Н. Фурсенко // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. – 2012. – Вип. 1 (41). – С.201-207.
5. *Попов О.О.* Прогнозування аварійного ризику / О.О. Попов // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. – 2013. – № 6. – С.28-33.
6. *Сергеев В.С.* Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях: учебное пособие для вузов / В.С. Сергеев. – М.: Академический Проект, 2004. – 429 с.
7. *Акимов В.А.* Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски / В.А. Акимов, В.Д. Новиков, Н.Н. Радаев. – М.: ЗАО ФИД, 2001. – 344 с.
8. *Кофф Г.Л.* Оценка последствий чрезвычайных ситуаций / Г.Л. Кофф, А.А. Гусев, Ю.Л. Воробьев. – М.: РЭФИА, 1997. – 364 с.
9. *Мастрюков Б.С.* Безопасность в чрезвычайных ситуациях: учебное пособие для вузов / Б.С. Мастрюков. – М.: Академия, 2003. – 331 с.
10. Реагування на виникнення надзвичайних ситуацій: монографія / С.О. Гур'єв, А.В. Терент'єва, С.М. Миронець [та ін.]; за заг. ред. С.О. Гур'єва. – Вінниця: ІДУЦЗ НУЦЗУ [та ін.], 2010. – 412 с.

*Поступила 18.09.2017р.*