УДК 504.1

Ю.А. Гусак[1], В.В. Ткаченко[2]

[1] *Воєнно-наукове управління ГШ ЗСУ, Київ*
[2] *Науково дослідний центр «Державний океанаріум», Одеса*

ВИЗНАЧЕННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ОЦІНКИ РИЗИКУ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ

Розглянуто питання побудови системи підтримки прийняття рішень щодо оцінки поточного стану та рівня ризику екологічної безпеки. Визначено необхідність розробки моделей ідентифікації та оцінки ризику техногенних аварій у транскордонному аспекті за умов неповної та неточної вихідної інформації, яка потребує часу для збору та обробки. Досліджено можливості апарату нечіткої логіки та різні постановки задач нечіткого математичного програмування. Проаналізовано апарат алгебри скінченних предикатів, який дозволяє автоматизувати процеси обробки даних в системі управління екологічною безпекою.

Ключові слова: *екологічна безпека, техногенна аварія, оцінка ризику, прийняття рішень,нечітка логіка, алгебра предикатів, модель.*

Вступ

Одним із пріоритетних напрямків національної безпеки України є забезпечення екологічно і техногенно безпечних умов життєдіяльності громадян, збереження навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів. Розробка інформаційної та методичної бази системи екологічної безпеки повинна спиратися на три складових сталого еколого-соціально-економічного розвитку в контексті підвищення якості навколишнього природного середовища і безпеки життя людей. Одним з перспективних напрямків таких досліджень є пошук нових методичних підходів до вирішення екологічних задач і створення інтелектуальних систем підтримки рішення в управлінні екологічною якістю навколишнього природного середовища. Таким чином, актуальними є розробки методологій структурно-параметричної ідентифікації, моделей скалярного багатофакторного оцінювання стану об'єктів навколишнього природного середовища, які відрізняються інформаційної повнотою і адекватністю уявлення динаміки і наслідків сталого розвитку.

Біля кордонів України розміщено чимало екологічно напружених, потенційно небезпечних підприємств і об’єктів інших країн. Відповідно до «Конвенції про трансграничний вплив промислових аварій», яку підписано і ратифіковано в Україні, у випадку такої аварії органи виконавчої влади нашої держави будуть належним чином проінформовані. Нажаль це ще не гарантує виконання необхідних дій та захист населення та навколишнього середовища, що пов’язано з рядом об’єктивних факторів. Тому розгляд проблем оцінки ризику техногенних аварій та визначення рекомендацій щодо оперативних дій з урахуванням транскордонного аспекту набуває певної актуальності.

Мета роботи пов’язана з формуванням методичного підходу до комплексної екологічної оцінки стану складних об’єктів. Відповідно для досягнення поставленої мети на першому етапі необхідно вирішити задачу визначення та обґрунтування математичного інструментарію для ідентифікації та оцінки ризику техногенних аварій.

Аналіз стану вирішення проблеми

Проблеми хімічних аварій, ліквідація їх наслідків, прогнозування та оцінювання ризиків широко вивчено у світовій науковій літературі [1 – 3]. Особливості аварій, викликаних витоком шкідливих речовин, пожежами на виробництві та вибухами розглянуті в роботі [2]. Необхідність упорядкування запланованих заходів щодо запобігання і ліквідації транскордонних аварій, тобто таких, які виникають в межах дії юрисдикції одного регіону і мають серйозний вплив в межах дії юрисдикції іншої регіону, підкреслюється низкою міжнародних угод [3 – 5].

Дослідження, що стосуються транскордонних аварій, як правило, відносяться до питань забруднення водних ресурсів [4, 6, 7] або повітря [8 – 10]. В усіх випадках для аналізу наслідків аварій використовують геоінформаційні системи моніторингу, що дозволяють аналізувати великі обсяги даних і враховувати багато факторів впливу на навколишнє середовище [3, 6]. Говорячи про вплив промислових аварій на навколишнє середовище, вчені аналізують розповсюдження і вплив різних хімічних речовин (газів, радіонуклідів, пестицидів, важких металів), а також застосування різних технологій очищення атмосфери від них [11 – 13]. Проблематику забруднень атмосфери цими речовинами розглянуто, наприклад, в роботах [14, 15].

Особливою небезпекою характеризуються аварії, які пов’язані з пожежею та вибухами на об’єкті зберігання та утилізації хімічних боєприпасів. Наукова спільнота розробила велику кількість моделей, заснованих на різній параметризації та використанні різних підходів. Так, в реєстрі Європейського агентства по навколишньому середовищу (European Environment Agency) [16] зареєстровано понад 100 подібних моделей, найбільш відомими серед яких є:

– модель лагранжевої хмари (OML);

– гібридна модель лагранжевої хмари (HPDM);

– статистична бі-гаусова модель розсіювання (IFDM);

– статистична псевдо-гаусова модель (UK-ADMS);

– ейлерова модель.

В цілому всі моделі розсіювання можна віднести до однієї з груп: гаусові, ейлерові або лагранжеві. Аналіз показав, що в науковій літературі популярним підходом до відображення розповсюдження домішок в атмосфері є класична ейлерова модель, яка базується на напівемпіричному рівнянні турбулентної дифузії. Моделі такого типу дуже широко використовуються у практиці прогнозу наслідків аварії та регулювання забруднення атмосфери.

Таким чином, можна зробити висновок, що проблема оцінки ризику та наслідків техногенних аварій є актуальною, досліджується світовою науковою спільнотою та має певні напрямки вирішення. Слід зауважити, що незважаючи на існуючі моделі, все ще виникають труднощі при моделюванні викидів багатокомпонентних, перегрітих сумішей, здатних розповсюджуватися на значні відстані та зберігати негативний ефект [17, 18]. Крім того, особливості транскордонних аварій, коли вихідна інформація є неповною, неточною, або потребує певного часу для її збору та аналізу, обумовлюють предмет дослідження – моделі ідентифікації та оцінки ризику техногенних аварій у транскордонному аспекті.

Застосування апарату нечіткої логіки в модулі прийняття рішень комплексу оцінки екологічної безпеки

До особливого класу задач, пов'язаних з використанням теорії нечітких множин, необхідно віднести проблему управління екологічною безпекою. Це пов’язано з тим, що параметри і змінні не є певними величинами і не можуть бути описані законами розподілу, побудованими на достатньому статистичному матеріалі. Тому виникає необхідність аналізу моделей і алгоритмів в системах підтримки прийняття рішень при нечіткій вихідній інформації, які можуть бути використані в задачах управління екологічною безпекою, зокрема оцінки ризику.

Вид моделей і алгоритмів, в системах підтримки прийняття рішень, методи їх дослідження істотно залежатимуть від способів опису вихідних даних на основі теорії нечітких множин. Тому важливим питанням для аналізу можливих підходів до «розмивання» традиційних моделей і алгоритмів, а також створенню принципово нових, є класифікація нечітких множин [19] за наступними ознаками.

За засобом представлення нечіткості:

а) за допомогою функції приналежності $\mu_A(x)$, де A – нечітка множина в X, $x \in X$. Y – множина можливих значень функції приналежності (ФП);

б) за допомогою набору ієрархічно упорядкованих чітких множин – множин рівня;

в) за допомогою комбінованих нечітко-статистичних підходів, що враховують як нечіткість параметрів, так і стохастичність їх функцій приналежності.

За видом області X:

а) вся базова множина X;

б) підмножини базової множини X (наприклад, нечіткі множини рівня);

в) числова вісь, яка породжує особливий клас нечітких множин – нечіткі числа.

За видом області Y:

а) інтервал [0, 1] – найбільш часто застосовується;

б) вся числова вісь або окремі її інтервали;

в) натуральний ряд чисел;

г) кінцева або нескінченна дистрибутивна решітка L;

д) деяка лінійно впорядкована множина;

е) нечітка множина.

В результаті ми отримаємо нечітку ФП:

$$\mu_A(x) = (y,\ \mu_B(y)).$$

За характером приналежності з $\mu_A(x)$ значення множині Y:

а) $\mu_A(x) \in Y$;

б) $\mu_A(x) \subset Y$.

Такі нечіткі множини отримали назву інтервальнозначних.

За ознакою однорідності-неоднорідності області значень.

Як приклад, розглянемо векторну множину:

а) функція приналежності визначена для всього вектора (гомогенні нечіткі множини).

$$x = (x_1, x_2, .. x_n) \in X,\ \mu_A(x) = \alpha ;$$

б) декілька ФП визначені для всього вектора (векторозначні нечіткі множини).

$$x = (x_1, x_2 ... x_n) \in X,$$

$$\mu_A(x) = (\mu_{A_1}(x), ... \mu_{A_m}(x));$$

в) ФП визначені для кожного елемента вектора окремо (гетерогенні нечіткі множини).

$$x = (x_1, x_2 ... x_n) \in X,$$

$$\mu_A(x) = (\mu_1(x_1) ... \mu_n(x_n)).$$

Одним з основних елементів, на базі якого будується теорія нечітких множин, є спосіб представлення нечіткості на основі ФП, які в свою чергу використовуються в моделях і алгоритмах систем підтримки прийняття рішень (СППР).

Тому коротко розглянемо основні підходи до побудови ФП.

В даний час можна виділити дві групи методів побудови ФП: прямі і непрямі.

Вони, в свою чергу, розбиваються на дві підгрупи методів, які відрізняються способом експертного опитування: груповий (використовується група експертів) і індивідуальний (використовується один експерт).

У прямих методах експерт безпосередньо задає правила визначення значень ФП, що характеризує поняття A. У непрямих методах значення ФП вибирається так, щоб задовольнити заздалегідь сформульовані умови. Експертна інформація є тільки вихідною, що використовується для подальшої обробки. При цьому додаткові умови можуть накладатися як на вигляд одержуваної інформації, так і на процедуру обробки. Прикладом такої умови при попарному порівнянні об'єктів є наступне твердження. Якщо один з об'єктів оцінюється в α раз приорітетніше за інший, то другий – в $1/\alpha$ разів приорітетніший за перший [20].

Найбільш часто використовують метод індивідуального непрямого оцінювання [19]. Результатом опитування особи, яка приймає рішення (ОПР), є матриця $B = \|b_{ij}\|$ розміром $n \times n$, де n – число точок u_i, в яких порівнюються значення ФП. Елемент b_{ij} матриці B є суб'єктивною оцінкою відношення $\mu_A(u_i)/\mu_A(u_j)$. Величина b_{ij} призначається відповідно до бальної шкали. Значення ФП $\mu_A(u_1),...\mu_A(u_n)$ в точках $u_1,...u_n$ визначаються на основі рішення задачі про знаходження власного вектора матриці B

$$BW^T = v_{max} W,$$

де v_{max} – максимальне власне число матриці B, $W = (w_1,...w_n)$ – відповідний власний вектор. При цьому

$$\mu_A(u_i) = w_i / \sum_{i=1}^{n} w_i, \ i = \overline{1,n}.$$

Різні методи побудови ФП розглядаються в роботах [17, 19, 20 – 22].

Згідно із запропонованою в роботах [22, 24] класифікацією виділимо наступні групи моделей, які використовуються в СППР.

За кількістю етапів (одноетапні і багатоетапні). Фактично перші використовуються для вирішення статичних задач, а другі – динамічних.

За кількістю ОПР (індивідуальні та колективні).

За кількістю використовуваних критеріїв (однокритеріальні та багатокритеріальні).

За характером опису переваги можна виділити моделі нечіткого математичного програмування і нечітких бінарних відносин альтернатив.

Математичне програмування (МП) є найцікавішою групою моделей прийняття рішень. В [25] пропонуються наступні постановки задач нечіткого математичного програмування (НМП).

Задача 1. Оптимізація заданої звичайної функції $f : X \to R^1$, де X – задана універсальна множина альтернатив, на заданій нечіткій множині допустимих альтернатив $\mu_C : X \to [0,1]$ [24, 25].

Для вирішення такого класу задач НМП пропонується розглядати функцію

$$\bar{f}(x) = f(x) / \sup_{x \in \sup p\mu_c} f(x)$$

як ФП нечіткої множини. В результаті це дозволяє застосувати до вирішення цієї задачі підхід Беллмана-Заде [23], згідно з яким раціональним вважається вибір альтернативи, яка має максимальну ступінь приналежності нечіткому рішенню. Така альтернатива визначається виходячи з рішення задачі

$$\max_{x \in X} \ \min\{\mu_C(x), \ \bar{f}(x)\}.$$

Задача 2. Нечіткий варіант стандартної задачі МП. Нехай задана наступна задача МП:

$$f(x) \to \max, \ \varphi(x) \le 0, \ x \in X.$$

Нечіткий варіант цієї задачі вийде, якщо «пом'якшити» обмеження, допустивши можливість їх порушення з тим або іншим ступенем. Замість максимізації функції $f(x)$ ОПР прагне до досягнення деякого заданого значення цієї функції, приписуючи різні ступені допустимості відхилень значень $f(x)$ від бажаної величини. У цьому випадку задача НМП записується в наступному вигляді:

$$f(x) \tilde{\ge} z_0, \ \varphi(x) \tilde{\le} 0, \ x \in X.$$

Знак "~" означає нечіткість відповідних нерівностей. В даному випадку величина z_0 визначає деяке достатнє значення функції цілі. Один з підходів до формалізації такої задачі полягає у формуванні нечітких множин цілі і обмежень:

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 0, & f(x) \le z_0 - a, \\ \mu(x,a), & z_0 - a < f(x) < z_0, \\ 1, & f(x) \ge z_0; \end{cases}$$

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 0, & \varphi(x) \ge b, \\ v(x,b), & 0 < \varphi(x) < b, \\ 1, & \varphi(x) \le 0. \end{cases}$$

Величини a і b задають деякі порогові значення, які визначають сильне порушення нерівностей

$$f(x) \geq z_0,$$
$$\varphi(x) \leq 0,$$

де μ і м – деякі функції, що описують ступінь виконання відповідних нерівностей з точки зору ОПР. До сформульованої задачі може бути застосований підхід Беллмана-Заде.

Задача 3. Нечітко задана функція, що максимізується, шляхом завдання відображення

$$\mu_f : X \times R^1 \to [0,1].$$

У цьому випадку кожному фіксованому значенню $x_0 \in X$ відповідає нечіткий опис оцінки результату вибору альтернативи x_0.

Задача 4. Формулюється звичайна задача МП, в якій параметри обмежень є нечіткими числами.

Задача 5. Нечітко описані як параметри функції, що оптимізується, так і обмежень, які накладаються на цільову функцію.

У загальному випадку, коли у ОПР є n і m нечітких обмежень, нечітке рішення згідно [25] визначається як нечітка підмножина D множини X, яка вийде в результаті наступних способів злиття нечітких цілей і нечітких обмежень.

1. Перетин 1 (взяття мінімуму) нечітких множин цілей і обмежень

$$\mu_{D_1} = \mu_{G_1} \Lambda ... \Lambda \mu_{G_n} \Lambda ... \Lambda \mu_{C_m}.$$

2. Перетин 2 (обмежений добуток) нечітких множин цілей і обмежень

$$\mu_{D_2} = \mu_{G_1} \circ ... \mu_{G_n} \circ \mu_{C_{Б1}} \circ ... \circ \mu_{C_m}.$$

3. Лінійна комбінація нечітких множин цілей і обмежень

$$\mu_{D_3} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \mu_{G_i} + \sum_{j=1}^{m} \beta_j \mu_{C_j};$$

$$\alpha_i,\ \beta_j \geq 0,\ \sum_{i=1}^{n} \alpha_i + \sum_{j=1}^{m} \beta_j = 1.$$

Необхідно відмітити, що

$$\mu_{D_2}(x) \leq \mu_{D_1}(x) \leq \mu_{D_3}(x) \quad \forall x \in X.$$

У роботах [24, 25] викладено такі два варіанти вирішення завдання НМП з нечіткою множиною допустимих альтернатив.

Варіант 1. Спирається на розкладанні нечіткої множини обмежень на множини рівня і представленні задачі НМП у вигляді набору звичайних задач оптимізації цільової функції $\varphi(x)$ на підмножинах рівня C_λ, де λ – рівень приналежності.

При цьому вводиться підмножина $N(\lambda) \subseteq C_\lambda$, на якій функція $\varphi(x)$ досягає свого максимального значення

$$N(\lambda) = \left\{ x \setminus x \in X,\ \varphi(x) = \sup_{x' \in C_\lambda} \varphi(x') \right\}.$$

Можна сказати, що цільова функція $\varphi(x)$ максимізується на множині тих альтернатив, які зі ступенем не менше λ є допустимими у вихідній задачі НМП.

Таким чином, рішення задачі записується в наступному вигляді

$$\mu_D^1(x) = \sup_{\lambda : x \in N(\lambda)} \lambda$$

або

$$\mu_D^1(x) = \begin{cases} \mu_C(x), & \text{при } x \in \bigcup_{\lambda > 0} N(\lambda) \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases}$$

Варіант 2. ОПР при прийнятті рішення має базуватися не тільки на величині ФП, а й на відповідному значенні цільової функції. Другий варіант вирішення заснований на понятті оптимальних за Парето елементів для функції, яка мінімізується, і нечіткій множині обмежень. В результаті рішення має вигляд

$$\mu_D^2(x) = \begin{cases} \mu_C(x), & \text{при } x \in P^0, \\ 0, & \text{в інших випадках;} \end{cases}$$

де P^0 – множина Парето. У підсумку враховується необхідність компромісу між бажанням отримати якомога більше значення функції $\varphi(x)$ і прагненням взяти якомога більш допустиму альтернативу.

У роботах [23, 25] розглядаються моделі і алгоритми НМП для задачі 2. У тому випадку, якщо немає ніяких підстав задавати коефіцієнти цільової функції і обмежень у вигляді точно визначених чисел, вводяться поля допусків (інтервали толерантності). Такого класу задачі розглядаються в роботах [25, 26].

Задача НМП з нечіткими параметрами в описі цільової функції і обмежень може бути представлена в наступному вигляді [26].

Знайти

$$\min f(x, \tilde{a}) = \left[f_1(x, \tilde{a}_1), ... f_k(x, \tilde{a}_k) \right]$$

за умови

$$x \in X = \left\{ x \in E^n \setminus g_j(x, \tilde{b}) \leq 0,\ j = \overline{1,m} \right\},$$

де $\tilde{a}_i = (\tilde{a}_{i,1} ... \tilde{a}_{ip})$, $\tilde{b}_j = (\tilde{b}_{j1}, ... \tilde{b}_{js})$ – відповідно вектори нечітких параметрів, включених в цільову функцію та обмеження.

Нечіткі параметри передбачаються нечіткими числами. Вводиться поняття α-Парето-оптимального рішення задачі, де α – рівень приналежності або α – перетин нечітких чисел $\tilde{a}_{ir}, \tilde{b}_{jq}$. В цьому випадку ОПР повинен вибирати задовільне рішення серед α-Парето-оптимальних рішень на підставі його суб'єктивних суджень.

В роботі [22] формулюється мінімаксна задача, яка використовується як засіб генерації α-Парето-оптимальних рішень. Якщо ОПР не задоволений поточним α-Парето-оптимальним рішенням, то можливо його поліпшити шляхом коригування його еталонних рівнів.

Крім НМП в СППР використовується апарат:

нечітких ігор,

нечітких відношень і графів,

моделей нечіткої очікуваної корисності,

нечітких моделей колективного прийняття рішень,

динамічних моделей прийняття рішень,

лінгвістичних моделей.

Зупинимося коротко на апараті нечітких ігор.

Розглянемо нечітку ігрову постановку задачі. Нехай X_1 і X_2 – універсальні множини стратегій, які можуть вибрати гравці 1 і 2 відповідно. Допустимі стратегії гравців описуються множинами $D_{X_i} \subset X_i,\ i = 1,2$.

Пара

$$\left(x_1 \in X_1,\ x_2 \in X_2\right) \in X_1 \times X_2$$

називається ситуацією.

Для кожного гравця задані функції

$$f_i\left(x_1, x_2\right) : X_1 \times X_2 \to R^1 \ -$$

суб'єктивні оцінки ситуацій, де R^1 – числова вісь, що інтерпретується як універсальна множина оцінок.

Кожен гравець прагне до досягнення своєї мети

$$f_1\left(x_1, x_2\right) \to \max, \quad x_1 \in D_{X_1},$$

$$f_2\left(x_1, x_2\right) \to \max, \quad x_2 \in D_{X_2}.$$

При цьому використовуються різні принципи раціональної поведінки. Основними є: принцип найкращого гарантованого результату і принцип рівноваги.

Модель нечіткої гри може бути представлена наступним чином.

Нехай $D_{X_i} \subset X_i$ – нечіткі множини, які описуються функціями приналежності $\mu_C : X_C \to [0,1]$. Цілі гравців описуються нечіткими множинами G_i в універсальній множині оцінок R^1 з функцією приналежності $\bar{\mu}_{G_i} : R^1 \to [0,1]$.

Позначимо

$$\mu_{G_i}\left(x_1, x_2\right) = \tilde{\mu}_{G_i}\left(f_i\left(x_1, x_2\right)\right),\ i = 1,2.$$

Вводиться поняття нечіткої множини реалізованих оптимальних ситуацій

$$\mu^*_{D_i}\left(x_1, x_2\right) = \min\left\{\mu_i\left(x_i\right), \mu_{G_i}\left(x_1, x_2\right)\right\}.$$

Цілі гравців визначаються як

$$\mu^*_{D_1}\left(x_1, x_2\right) \to \max,\ x_1 \in X_1,$$

$$\mu^*_{D_1}\left(x_1, x_2\right) \to \max,\ x_2 \in X_2.$$

Теоретичні та практичні питання використання теорії ігор в нечітко визначеній обстановці описані в роботах [25].

Аналіз застосування логіко алгебраїчних моделей в системі екологічної безпеки

У проблемах багатокритеріального прийняття рішень, класифікації, обробки різнорідної інформації, інших предметних областях, зокрема при вирішенні задач оцінки ризику техногенних аварій, виникає необхідність згрупувати або впорядкувати об'єкти, ґрунтуючись на їх властивостях, які виражені ознаками (атрибутами) цих об'єктів. Головною особливістю завдань, що стоять перед системою підтримки прийняття рішень, є той факт, що досліджувані об'єкти характеризуються багатьма різнорідними ознаками, які можуть бути як кількісними, так і якісними, і, крім того, одні й ті ж об'єкти можуть існувати в декількох екземплярах, але відрізнятися значеннями ознак. У таких випадках згортка таких ознак або неможлива, або математично некоректна, що не дає можливості вирішення задачі класифікації класичними методами. Наявність невизначеності внаслідок методів збору даних також ускладнює проблему.

Вибір тієї чи іншої моделі для подання розглянутих об'єктів і дослідження структури їх зв'язків визначається властивостями цих об'єктів, які виражаються ознаками. Ознаки, що характеризують властивості об'єктів, можуть бути безперервними і дискретними, кількісними і якісними, або змішаними. Зазвичай сукупність об'єктів представляється множиною точок в деякому багатовимірному (як правило, метричному) просторі, осі якого співвідносяться з відповідними ознаками. У прикладних задачах у якості такого простору досить часто вибирається простір типу евклідового. Завдання відстані між об'єктами дозволяє оцінювати близькість або віддаленість цих об'єктів щодо один одного незалежно від їх природи, досліджувати структурні особливості сукупності об'єктів і всього простору в цілому.

Властивість подібності і розрізнення об'єктів, що відносяться до одного і того ж класу, широко використовується при побудові різних методів класифікації. Так, в методах класифікації об'єктів, заснованих на теорії нечітких множин, допускається неоднозначність класифікації об'єктів, пов'язана з різним ступенем приналежності об'єкта до класу, тобто об'єкти, які «без сумніву» і «можливо» належать до деякого класу, вважаються різними. Процедура класифікації об'єктів в рамках формальної логіки може бути описана як сукупність (послідовність) вирішальних правил, які представляються виразами виду:

ЯКЩО <умови>, ТО <рішення>.

При прямий класифікації терм <умови> включає назви об'єктів або перелік значень ознак, що описують об'єкти класу, що часто вважається еквівалентним. При непрямій класифікації один або кілька термів <умови> конструюються як відношення між різними ознаками або їх значеннями. Терм <рішення> в обох випадках означає, що об'єкт належить до певного класу еквівалентності.

При досить невеликій кількості об'єктів, що класифікуються і ознак, що їх описують, сімейство вирішальних правил легко піддається огляду та доступно для аналізу. Чим більше кількість розглянутих об'єктів і різноманітніші вирішальні правила їх класифікації, тим важче стає аналіз цих правил. Неузгодженість індивідуальних вирішальних правил може бути викликана неоднозначністю розуміння експертами розв'язуваної задачі, помилками або неточностями, допущеними при первісній класифікації об'єктів, суб'єктивною відмінністю вирішальних правил, використовуваних різними експертами, специфічністю знань самих експертів, нетранзитивністю окремих експертних суджень і багатьма іншими причинами. В результаті може з'явитися сімейство вирішальних правил, серед яких будуть однакові, подібні, або суперечливі правила.

В цьому випадку виникає проблема: побудувати таке узагальнене вирішальне правило або невелику групу правил, які найкращим (в певному сенсі) чином апроксимують сукупність всіх індивідуальних правил сортування об'єктів, включають мінімальний набір ознак і відносять об'єкти в задані класи з допустимою точністю. Проблеми класифікації та впорядкування об'єктів, які описуються багатьма кількісними та якісними ознаками, причому кожен з об'єктів може існувати в декількох різних, але рівноправних «примірниках», є досить важкими. Головні з перерахованих труднощів виявилося можливим подолати завдяки використанню нового теоретичного інструментарію, заснованого на алгебрі скінченних предикатів. Застосування алгебри скінченних предикатів дозволяє розробляти нові методи рішення нових класів задач, які не містять необґрунтованих перетворень вихідної інформації і не призводять до втрати або перекручування даних [26].

Далі розглянемо поняття алгебри предикатів [26]. Візьмемо деяку непусту множину U, елементи якої будемо називати предметами. Сама ж множина U називається універсумом предметів. Візьмемо, далі, m деяких непустих, необов'язково різних підмножин A_1, A_2, A_m універсума U. Декартовий добуток $S = A_1 \times A_2 \times ... \times A_m$ множин A_1, A_2, A_m називається предметним простором S з координатними предметними осями A_1, A_2, A_m над універсумом U. Число осей m називається розмірністю простору S. Вводимо множину $V = \{\tilde{o}_1, \tilde{o}_2, ..., \tilde{o}_{o'}\}$ різних змінних $x_1, x_2, ..., x_m$, які називаються предметними змінними простору S. Значеннями змінної x_i ($i = \overline{1, m}$) є елементи множини A_i, так що $x_1 \in A_1$, $x_2 \in A_2, ..., x_m \in A_m$.

Предметний простір S можна розглядати як сукупність всіх векторів виду $(x_1, x_2, ..., x_m)$, компоненти яких задовольняють умові $x_1 \in A_1$, $x_2 \in A_2, ..., x_m \in A_m$. Будь-яка підмножина P простору S називається відношенням, заданим на просторі S. Відношення має розмірність m, тобто воно m-місне. Відношення, задані на одному й тому ж просторі S, називаються однотипними. Тип відношення визначається набором змінних $x_1, x_2, ..., x_m$ та набором множин $A_1, A_2,.., A_m$. Відношення $\varnothing$, що не містить жодного вектору, називається порожнім, відношення S, у якому є різноманітні вектори – повним.

Предикатом, заданим на декартовому добутку A_1, A_2, A_m, називається будь-яка функція $P(x_1, x_2, ..., x_m) = \xi$, яка відображає декартовий добуток $A_1 \times A_2 \times ... \times A_m$ множин A_1, A_2, A_m у множину $\Sigma = \{0,1\}$. Символи 0_mта 1 є булевими елементами, Σ – множина всіх булевих елементів. Змінна $\xi = \{0,1\}$, яка є значенням предиката P, є булевою. Предикат $P(x_1, x_2, ..., x_m)$ на $A_1 \times A_2 \times ... \times A_m$ називається скінченним, якщо всі множини $A_1, A_2, \dots, A_m$ скінченні, та нескінченним – у протилежному випадку. Ця ж термінологія переноситься й на відповідні предикатам відношення. Змінні $x_1, x_2, ..., x_m$ називаються аргументами предиката P.

Припустимо, що L – множина всіх відношень на S, M – множина всіх предикатів на S. Між всіма відношеннями множини L й всіма предикатами множини M, заданими на S, існує взаємно однозначна відповідність. Відношення P з L і предикат P з M називаються відповідними один одному, якщо при будь-яких $x_1 \in A_1, x_2 \in A_2, ..., x_m \in A_m$:

$$P(x_1, x_2, ..., x_m) = \begin{cases} 1, \text{якщо } (x_1, x_2, ..., x_m) \in P, \\ 0, \text{якщо } (x_1, x_2, ..., x_m) \notin P. \end{cases}$$

Зворотний перехід від предиката P до відношення P здійснюється за правилом:

$$\text{Якщо } P(x_1, x_2, ..., x_m) = 1, \text{ то } (x_1, x_2, ..., x_m) \in P;$$
$$\text{якщо } P(x_1, x_2, ..., x_m) = 0, \text{ то } (x_1, x_2, ..., x_m) \notin P.$$

Множина всіх векторів $(x_1, x_2, ..., x_m)$, що задовольняють рівнянню $P(x_1, x_2, ..., x_m) = 1$, утворює відношення P, яке називається областю істинності предиката P. Предикат $P \in M$ при цьому є характеристичною функцією відношення $P \in L$. Алгеброю предикатів таким чином стає будь-яка алгебра, задана над носієм M.

Тип скінченних предикатів задаємо, вказуючи множини $V = \{\tilde{o}_1, \tilde{o}_2, ..., \tilde{o}_{o'}\}$ та $A_i = \{a_{1i}, a_{2i}, ..., a_{k_i i}\}$, $i = \overline{1, m}$, k_i – число елементів у множині A_i. Над носієм M вводимо диз'юнктивно-кон'юнктивну алгебру предикатів. У ролі базисних елементів цієї алгебри використовуємо предикати 0 та 1, а також предикати x_i^a впізнавання предмета a за змінною x_i, $i = \overline{1, m}$, $a \in A_i$

$$x_i^a = \begin{cases} 1, \text{якщо } x_i = a \\ 0, \text{якщо } x_i \neq a. \end{cases}$$

Символ a у записі предиката x_i^a називається його показником. Доведено, що диз'юнктивно-кон'юнктивна алгебра предикатів повна, її формулами можна записати будь-який предикат, а отже можна виразити аналітично будь-яке відношення довільного типу [26].

Суть методу полягає в наступному. Реєстрація M сигналу X, що надійшов від набору датчиків, відбувається з дискретністю Δt, яка визначається необхідною точністю спостереження за змінами величин сигналів. Для цього сигналу формується матриця $M \times N$, яка відображає кількість N екземплярів, що потрапили у інтервал спостереження. Кожен стовпець такої матриці надалі може розглядатися як характеристика стану навколишнього середовища, сформована M вимірювальними датчиками в моменти часу t_i.

Кожен рядок такої матриці A_1, A_2, …, A_m – це непусті підмножини можливих значень параметрів навколишнього середовища, що піддаються імпактному моніторингу.

Множина $A = A_1 \times A_2 \times ... \times A_m$ всіх таких наборів $a_1 \in A_1$, $a_2 \in A_2$, …, $a_m \in A_m$ формує матрицю $M \times N$ як декартовий добуток цих підмножин. Перетворимо фрагменти отриманих даних імпактного моніторингу в логічні дані.

Предметна область визначена множиною $M = \{a_1, a_2, ..., a_m\}$, що складається з m елементів – значень сигналів у M вимірювальних каналах. $G \subseteq A$ – підмножина, виміряні значення a_i якої перевищують порогові значення q_i.

Набір логічних елементів можна скласти за таким правилом: якщо $a_1 \in G$, то $a_i = 1$; якщо $a_1 \notin G$, то $a_i = 0$, $i = \overline{1, n}$.

Предикат P(x) на множині A, відповідний множині G значень сукупності фрагмента даних імпактного моніторингу (сигналів), які перевищили поріг, запишеться формулою:

$$P(x) = x^{a_1} \vee x^{a_2} \vee K \vee x^{a_k},$$

$$x_i^{a_i} = \begin{cases} 1, \text{якщо } x_i = a_i, \\ 0, \text{якщо } x_i \neq a_i. \end{cases}$$

Таким чином, у порівнянні з математичним апаратом нечіткої логіки, апарат алгебри скінченних предикатів дозволяє оперувати з дискретними, скінченними, детермінованими об'єктами, що забезпечує автоматизацію процесів обробки даних в системі управління екологічною безпекою та дозволяє вирішувати завдання підтримки прийняття рішень та надання рекомендацій щодо стану забруднення, оцінок ризику та можливих дій тощо.

Висновки

У даній роботі були отримані наступні наукові результати.

1. Система прийняття рішень щодо оцінки ризику техногенних аварій характеризується процесами прийняття рішень, коли немає можливості спостерігати вхідні сигнали та результати їх інтелектуальної обробки, тобто немає прямого доступу до вихідного сигналу.

2. В якості можливого інструментарію для моделювання процесів ідентифікації та оцінки ризику техногенних аварій можна використовувати нечітке математичне програмування та алгебру предикатів.

3. Алгебра скінченних предикатів дозволяє вирішувати проблеми багатокритеріального прийняття рішень, обробки різнорідної інформації, класифікації та впорядкування об'єктів, які описуються багатьма кількісними та якісними ознаками.

Список літератури

1. Xue P. Policy issues on the control of environmental accident hazards in China and their implementation / P. Xue, W. Zeng // Procedia Environmental Sciences. – 2010. – №2. – P. 440-445.

2. Convention on the Transboundary Effects of Industrial Accidents. – United Nations, 2008. – 45 p.

3. Yu Q. Research on the Emergency Response System of Major Dangerous Chemical Accident on Highway based on the GIS / Q. Yu, J. Jiang, H. Yu // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 45. – P. 716-721.

4. Transboundary water resources management: the role of international watercourse agreements in implementation of the CBD // CBD Technical Series. – 2008. – No. 40. – 48 p.

5. Sikorska P. The need for legal regulation of global emissions from the aviation industry in the context of emerging aerospace vehicles / P. Sikorska // International Comparative Jurisprudence. – 2016.

6. The handbook for integrated water resources management in transboundary basins of rivers, lakes and aquifers. – International Networking of Basin Organization. – 2012. – 121 p.

7. Albuquerque M. Sequential Gaussian Simulation of Uranium Spatial Distribution – A Transboundary Watershed Case Study / M. Albuquerque, I. Antunes, M. Seco, N. Roque, G. Sanz // Procedia Earth and Planetary Science. – 2014. – Vol. 8. – P. 2-6.

8. Koornneef J. The impacts of CO2 capture on trans-boundary air pollution in the Netherlands / J. Koornneef, T. Harmelen, A. Horssen, R. Gijlswijk, A. Ramirez, A. Faaij, W. Turkenburg // Energy Procedia. – 2009. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 3787-3794.

9. Chavez A. Articulating a trans-boundary infrastructure supply chain greenhouse gas emission footprint for cities: Mathematical relationships and policy relevance / A. Chavez, A. Ramaswami // Energy Policy. – 2013. – Vol. 54. – P. 376-384.

10. Wu D. Will joint regional air pollution control be more cost-effective? An empirical study of China's Beijing–Tianjin–Hebei region / D. Wu, Y. Xu, S. Zhang // Journal of Environmental Management. – 2015. – Vol. 149. – P. 27-36.

11. Lauenstein G. The global importance of regional studies in marine science: Trans-boundary pollutants matter / G. Lauenstein, K. Leung, J. Hall-Spencer // Regional Studies in Marine Science. – 2015. – Vol. 2. – P. A1-A2.

12. Benchekroun H. Transboundary pollution and clean technologies / H. Benchekroun, A.R. Chaudhuri // Resource and Energy Economics. – 2014. – Vol. 36, Iss. 2. – P. 601-619.

13. Huimin L. Numerical Simulation and Field Experiment Validation of Atmospheric Pollution Chemical Accidents Based on Canopy Model / L. Huimin, Z. Xuezhi, C. Haiping, H. Shunxiang, L. Feng, W. Gang // Procedia Environmental Sciences. – 2012. – Vol. 12, Part A. – P. 30-37.

14. Iodice P. Air Pollution and Air Quality State in an Italian National Interest Priority Site. Part 2: The Pollutant Dispersion / P. Iodice, A. Senatore // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 81. – P. 637-643.

15. Shunxiang H. Modeling and Optimal Control of Atmospheric Pollution Hazard in Nuclear and Chemical Disasters / H. Shunxiang, L. Feng, Z. Qingcun, H. Fei, Z. Jiang, W. Zifa // Procedia IUTAM. – 2015. – Vol. 17. – P. 79-90.

16. The Model Documentation System / European Environment Agency [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://www.simmering.eu/european_ environment_agency_en.html.

17. Ткаченко В.В. Моделювання розсіювання небезпечних домішок в атмосфері при аварійних ситуаціях / В.В. Ткаченко, А.Л. Цикало // Холодильна техніка і технологія. – 2009. – С. 51-54.

18. Ткаченко В.В. Оцінка впливу техногенних аварій та катастроф у транскордонному контексті / В.В. Ткаченко, А.Л. Цикало // Холодильна техніка і технологія. – 2007. – №6(110). – С. 22-25.

19. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.

20. Saaty T. Decision making with the analytic network process. Economical, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks / T. Saaty, L. Vargas. – Springer, 2006. – 278 p.

21. Канеман Д. Принятие решений в неопределенности: Правила и предубеждения / Д. Канеман, П. Словик, А. Тверски; пер. с англ. – Х.: Изд-во Институт прикладной психологии «Гуманитарный центр», 2005. – 632 с.

22. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Ю.П. Зайченко. – К.: «Издательский дом «Слово», 2008. – 344 с.

23. Дилигенский Н.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология / Н.В. Дилигенский, Л.Г. Дымова, П.В. Севастьянов. – М.: «Издательство Машиностроение - 1», 2004.

24. Вятченин В.А. Нечеткие методы автоматической классификации / В.А. Вятченин. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – 219 с.

25. Пономарев А.С. Нечеткие множества в задачах автоматизированного управления и принятия решений: учебное пособие / А.С. Пономарев. – Х.: НТУ «ХПИ», 2005. – 232 с.

26. Бондаренко М.Ф. Мозгоподобные структуры: Справочное пособие. Т. 1 / М.Ф. Бондаренко, Ю.П. Шабанов-Кушнаренко. – К.: Наукова думка, 2011. – 460 с.

Надійшла до редколегії 20.02.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Скачков, Військова академія, Одеса.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОЦЕНКИ РИСКА ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ

Ю.А. Гусак, В.В. Ткаченко

Рассмотрен вопрос построения системы поддержки принятия решений касательно оценки текущего состояния и уровня риска экологической безопасности. Определена необходимость разработки моделей идентификации и оценки риска техногенных аварий в трансграничном аспекте в условиях неполной и неточной исходной информации, которая требует времени для сбора и обработки. Исследованы возможности аппарата нечеткой логики и различные постановки задач нечеткого математического программирования. Проанализирован аппарат алгебры конечных предикатов, который позволяет автоматизировать процессы обработки данных в системе управления экологической безопасностью.

Ключевые слова: *экологическая безопасность, техногенная авария, оценка риска, принятие решений, нечеткая логика, алгебра предикатов, модель.*

MATHEMATICAL TOOLS DEFINITION FOR IDENTIFICATION AND ESTIMATION OF TECHNOLOGICAL ACCIDENTS RISK

Yu.A. Gusak, V.V. Tkachenko

The problem of decision support system development is considered for evaluation of the current state and risk level of ecological safety. For this purpose it is necessary to develop models of identification and risk estimation of technological accidents in the transboundary aspect under the conditions of incomplete and inaccurate input information requiring time for its collection and processing. The capabilities of fuzzy logic and different problem statements of fuzzy mathematical programming are studied. The algebra of finite predicates is analyzed which allows to automate data processing in the system of ecological safety management.

Keywords: *ecological safety, technological accident, risk estimation, decision making, fuzzy logic, algebra of predicates, model.*