

УДК 614.8

О. М. Мирошник, к. т. н., доц.,
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛІКВІДАЦІЇ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ

У статті здійснений аналіз надзвичайних ситуацій, які виникали на території України. Визначено основні процеси, які відбуваються під час надзвичайних ситуацій. Проаналізовано моделі розповсюдження надзвичайних ситуацій. На основі складових моделей розповсюдження надзвичайних ситуацій розроблено математичну модель їх ліквідації. Зроблені висновки щодо ефективності використання математичної моделі ліквідації надзвичайної ситуації та наведені приклади оптимальних рішень керівника ліквідації надзвичайної ситуації залежно від обстановки.

Ключові слова: математична модель, надзвичайна ситуація.

Постановка проблеми. Зростання масштабів господарської діяльності і кількості великих промислових комплексів, концентрація на них агрегатів і установок великої і надвеликої потужності, використання у виробництві великих кількостей потенційно небезпечних речовин збільшує вірогідність виникнення техногенних аварій. Надзвичайні ситуації (НС) техногенного походження загрожують людині, економіці і природному середовищу або здатні створити загрозу внаслідок імовірного вибуху, пожежі, затоплення або забруднення (зараження) навколишнього середовища.

На більшій частині території України проявляються НС техногенного або природного походження, спровоковані антропогенною діяльністю на потенційно-небезпечних об'єктах (ПНО). Такі об'єкти є потенційними джерелами НС.

В Україні налічується 24,4 тисячі ПНО, із яких 6,5 тисячі відносяться до об'єктів підвищеної небезпеки. Особливе занепокоєння викликають 1211 об'єктів промисловості, на яких зберігається або використовується у виробничій діяльності більше 805 тис. тонн небезпечних хімічних речовин. Усього у зонах можливого зараження цих об'єктів проживає близько 12 млн. осіб [5].

Згідно статистичних даних [5] в Україні щороку виникає понад 100 НС. Тільки у 2014 році зареєстровано 143 НС, на яких загинуло 287 осіб та постраждало 680 осіб. Порівняно з 2013 роком зареєстровано збільшення кількості загиблих у НС на 13,4 %. Такі показники вказують на те, що питання пожежної та техногенної безпеки є актуальним і потребує особливої уваги.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Забезпечення високого рівня пожежної та техногенної безпеки в багатьох країнах світу здійснюється шляхом розробки моделей, методів прогнозування та моніторингом НС. Проблема розробки моделей, методів та систем моніторингу НС локального і регіонального забруднення місцевості, їх використання для експериментального вивчення забруднення атмосферного повітря, ґрунту, водних об'єктів вивчали багато науковців, у тому числі: Ю.О. Абрамов, Землянський О.М., Захаренко О.В., Шостак І.В.

Детальний аналіз наукових публікацій та проблем моніторингу надзвичайних ситуацій [1,2,4] свідчить про недостатність використання лише табличної інформації та відомих підходів до виконання оперативних дій підрозділів цивільного захисту (ЦЗ), а і про необхідність врахування тактичних можливостей даних підрозділів та місць їх розташування на оперативних позиціях.

На практиці після виникнення аварії проходить значний час, пов'язаний з розрахунками, урахуванням впливових факторів, розробкою сценарію дій, який найчастіше виявляється зовсім не оптимальним, внаслідок критичності часу на прийняття рішень. Крім того, відзначимо, що більшість хімічних аварій відбувається внаслідок композиції детермінованих та випадкових процесів і мають дві складові (оперативну та довготривалу):

по-перше, вони відбуваються, як правило, раптово в результаті збігу обставин й їх наслідком є людські жертви і матеріальні збитки; по-друге, викид небезпечної хімічної речовини (НХР) призводить до забруднення навколишнього середовища і, як наслідок, знову до жертв і збитків, які відбуваються, на відміну від першого випадку, не негайно, а впродовж певного часу. Таким чином, моніторинг НС має комплексний характер: прогнозування НС як такої, що може статися, і прогнозування дій підрозділів ЦЗ у часі.

Постановка задачі та її розв'язання. Основна мета дослідження полягає у розробці математичної моделі ліквідації надзвичайної ситуації. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- провести аналіз основних складових моделей поведінки надзвичайних ситуацій;
- визначити вихідну інформацію для побудови математичної моделі;
- визначити керуючі параметри математичної моделі та встановити їх обмеження.

Результати дослідження дозволять визначити необхідну кількість сил та засобів цивільного захисту необхідних для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Найбільш загальна постановка задачі оптимізації полягає в поєднанні доставки сил і засобів ЦЗ з виконанням робіт з ліквідації наслідків НС у секторах з урахуванням маневрування. Дані операції розглядаються в часі, при чому приймається розрахунок такий період, протягом якого умови робіт і параметри НС можна прийняти постійними. Процес доставки може здійснюватися протягом усього періоду, а ліквідація НС відбувається в міру прибуття сил і засобів в одному або декількох секторах одночасно. Після закінчення робіт у деякому секторі відбувається перебазування зайнятих у цьому секторі сил і засобів в інший сектор, де роботи ще не починалися. Розглянутий в задачі період ліквідації наслідків НС розбивається на кілька інтервалів, наприклад, якщо планування проводиться наперед, що стоїть в робочу зміну, в якості інтервалу можна прийняти 1 год. Такий підхід дозволяє перейти від безперервного варіанту постановки завдання до простішого дискретного, при якому кожному інтервалу часу відповідає певний номер.

В якості керуючих параметрів приймаються число підрозділів певного типу, які мають деяку продуктивність, оскільки облік кожного технічного засобу і кожного рятувальника з інструментом пов'язаний зі збільшенням розмірності задачі. Передбачається також, що роботи з ліквідації наслідків НС сектора проводиться одними і тими ж силами і засобами безперервно до їх повного закінчення, тобто, не допускається прибуття або вибуття підрозділів ЦЗ до закінчення робіт в секторі.

Вихідною інформацією при побудові даної математичної моделі є відомості про доставку сил і засобів ЦЗ і перекидання їх з сектора в сектор, параметри НС в секторах, техніко-економічні показники використання сил і засобів.

Введемо наступні позначення:

$\{T_{kij}\}$ – матриця витрат часу на перебазування сил і засобів із підрозділів «дислокації» у сектори ліквідації НС (t_{okj}), із сектора в сектор (T_{kij} при $k_i \neq 0$) при $k_i = k_j$, $t_{kij} = 0$;

P_k, V_{kp}, V_{nk} – відповідно протяжність зони забруднення до початку робіт із ліквідації, швидкість поширення зони забруднення і периметрична швидкість в кожному секторі;

t_k^*, t_k^{**} – відповідно час початку та тривалість робіт з ліквідації наслідків НС в кожному секторі;

$A_m(t)$ – кількість підрозділів, що доставляється w -им способом у t – інтервал часу;

$X_o(t)$ – кількість підрозділів, які прибули на ліквідацію наслідків НС в t ін. інтервал часу;

$A_o(t)$ – кількість підрозділів, готових до відправки на ліквідацію НС в t -ий інтервал часу;

$\{t_m\}$ – вектор витрат часу на доставку підрозділів ЦЗ m -им способом.

Виходячи з того, що при вирішенні оптимізованого завдання в якості керуючих параметрів можуть бути $A_m(t)$, значення яких залежить від вибору способів доставки підрозділів ЦЗ до місця ліквідації НС, встановимо обмеження на них:

$$A_m^*(t) \leq A_m(t) \leq A_o(t-1) + A_m^*(t),$$

$$\text{де: } A_m(t-1), \text{ при } \{A_m(t-1) \neq 0 \wedge (t < i+1)\}$$

$$A_m^*(t) = A_m(t-1), \text{ при } \{(A_m(t-1) \neq 0) \wedge (t > i+1) \wedge (\prod_{i=t-i-1}^{t-1} A_m(i) = 0)\} 0, \text{ при}$$

$$\{(A_m(t-1) \neq 0) \wedge (t > i+1) \wedge (\prod_{i=t-i-1}^{t-1} A_m(i) \neq 0)\} 0, \text{ при } A_m(t-1) = 0$$

Сенс обмежень в тому, що число перевезених в t інтервал часу w -им способом рятувальних формувань повинно бути не менш ніж знаходяться в процесі доставки, але не перевищувати суми наступних і знову відправлених.

Число підрозділів, що знаходяться на ліквідації наслідків НС в t -ий інтервал часу дорівнює сумі, що прибули на в попередньому інтервалі і новоприбулих до моменту t підрозділів:

$$X_o(t) - X_o(t-1) + X_o^*(t),$$

$$\text{де: } X_o^*(t) \sum_{m-1}^{m1} [A_m(t) - A_m(t-1)]$$

Час початку робіт у кожному секторі визначається наступним чином

$$t_k^* = \left\{ \begin{array}{l} tt, \text{ при } \{X_t(t) = 0 (\sum_{i=1}^t X_k(i) = 0)\} \\ t, \text{ при } \{(X_k(t) > 0 \wedge (X_k(t-1) = 0)\} \\ t_k^*, \text{ при } \{(X_k(t) = 0 \wedge (\sum_{i=1}^t X_k(i) \neq 0)\} \end{array} \right\}$$

Значення tt , що перевищує максимально важливу величину t , присвоюється у випадку, якщо ліквідація наслідків НС в кожному секторі ще не розпочиналася, у другому випадку t_k^* приймає значення t , при якому почалася ліквідація наслідків НС в секторі. При подальшому зростанню t час початку робіт у секторі зберігається.

Тривалість робіт з ліквідації наслідків НС в кожному секторі обчислюється за формулою:

$$t_k^{**} = \frac{P_k(t_k^*)}{V_{\pi} X_k(t) - \frac{1}{2} V_{\pi k}}$$

Число рятувальних підрозділів, зайнятих у k_i -ому секторі в $(t+1)$ -му інтервалі має задовольняти обмеженням:

$$X_{ki}(t+1) \leq X_{kikj}^*(t)$$

$$\sum_{ki=1}^{k1} X_{ki}(t+1) \leq \sum_{ki=1}^{k1} \max X_{kikj}^*(t)$$

при початкових умовах: $X_k(0)X_k(I) = X_k$ для всіх k

$$X_{kikj}^*(t) = \left\{ \begin{array}{l} X_{kj}(t - t_{kikj}), \text{ при } t \geq t_{kikj} + t_{kj}^* + t_{kj}^{**} - 1 \\ 0, \text{ при } t < t_{kikj} + t_{kj}^* + t_{kj}^{**} - 1 \\ \text{для } ki, kj=1, k1, ki \neq kj \end{array} \right\}$$

$$X_{ko}^*(t) = \left\{ \begin{array}{l} X_o(t - t_{k10}), \text{ при } t \geq t_{k10} \\ 0, \text{ при } t < t_{ko} \\ \text{для } k_{jo} = 0 \end{array} \right\}$$

Ці обмеження враховують наявні ресурси, причому приймається в розрахунок те, що частина з них знаходиться в стадії доставки до місця проведення робіт або перебазування з

сектора в сектор. Інша частина сил і засобів, зайнятих виконанням робіт в секторах, і дані обмеження не допускають їх розподілу в інші сектори.

Основне призначення останньої групи обмежень полягає у визначенні можливості використання сил і засобів служби ЦЗ, раніше зайнятих в деяких секторах, з урахуванням часу виконання робіт у попередніх секторах і часу перебазування у розглянутий сектор. Має також виконуватися співвідношення, що обмежує перебування сил і засобів підрозділів ЦЗ в секторі:

$$\sum_{i=1}^t X_k(i) \leq t_k^{**} \max X_k(t)$$

При вирішенні оптимізаційних задач з використанням розглянутої математичної моделі визначається порядок обчислення $X_k = (t+1)$ в залежність від попереднього значення $X_k = (t)$:

$$X_k(t+1) = \begin{cases} 0, \text{ npu } t < t_k^* \\ X_k(t+1), \text{ npu } t = t_k^* \\ X_k(t), \text{ npu } t_k^* \leq t_k^* + t_k^{**} \\ 0, \text{ npu } t > t_k^* + t_k^{**} \end{cases}$$

Останнє співвідношення означає, що, якщо роботи в кожному секторі почалися то вони тривають до повного закінчення. Якщо ж роботи в секторі вже закінчилися то всі наступні значення $X_k = 0$. У разі, коли роботи в секторі ще не розпочиналися, значення $X_k = (t+1)$ вибирається відповідно з іншими обмеженнями.

Наведені вище співвідношення дозволяють формалізувати процес ліквідації наслідків НС і дають можливість застосовувати математичні методи оптимізації при плануванні робіт підрозділів ЦЗ. В якості цільової функції можуть бути прийняті різні техніко-економічні показники (наприклад, витрати трудових і матеріальних ресурсів), які залежать від керуючих параметрів $A_m(t)$ і $X_k(t)$.

Представлена математична модель процесу ліквідації наслідків НС достатньо складна при використанні її для задач оптимізації у зв'язку з цим становлять інтерес деякі окремі випадки даної математичної моделі. Розглянуте завдання розподілу ресурсів передбачає що сили і засоби, які залучаються для ліквідації наслідків НС, не міняють вид робіт або сектор в якому вони спочатку спрямовані. Фактично в цій оптимізаційній задачі був використаний частковий випадок узагальненої математичної моделі процесу ліквідації наслідків НС, в якій число розглянутих інтервалів часу дорівнює одиниці. Така постановка завдання не передбачає використання одних і тих же сил і засобів для послідовного виконання різних видів робіт, тобто маневрування силами і засобами в процесі ліквідації наслідків НС.

Іншим частковим випадком даної моделі є завдання вибору способу доставки на місце ведення оперативних дій і черговості виконання робіт у ряді секторів при застосуванні одного рятувального підрозділу (наприклад, аварійного загону). При цьому оптимальне рішення залежить від витрат часу на доставку до місця аварії і перебазування підрозділу з одного сектора в інших і параметрів аварії в секторах. Проведенні розрахунки показали, що в тих випадках, коли час перебазування малий, відносно з тривалістю робіт у секторах – черговість гасіння не залежить від «фронту» поширення НС і периметральної швидкості розповсюдження небезпечних хімічних речовин в секторах. Якщо час перебазування сектора в сектор схожий з часом робіт в секторі, то на загальну тривалість ведення оперативних дій впливають всі розглянуті фактори, і оптимальне рішення визначається їх конкретним поєднанням. Так при рівних витратах часу на перебазування підрозділу ЦЗ, в першу чергу потрібно ліквідувати наслідки НС в секторі, що має велику периметричну швидкість, тобто оптимальне рішення за критеріями витрат трудових і матеріальних ресурсів або тривалості

часу розвитку НС (до її повної локалізації) відповідає послідовності $V_{п1} > V_{п2} > \dots > V_{пk}$. Якщо периметричні швидкості поширення хмари НХР в секторах однакові то оптимальним буде той варіант при якому сумарний час мінімальний.

Висновки. Підводячи підсумок роботи можна відзначити, що в ній вирішено одну з актуальних задач сьогодення, а саме розроблено математичну модель ліквідації наслідків НС на основі складових моделей розповсюдження НХР.

На основі аналізу основних складових моделей поведінки НС встановлено, що більшість таких моделей містять моделі прогнозування зони НС, а також моделі відображення просторової інформації про місцевість і її форми. Відсутність в моделях прогнозування складової частини введення сил і засобів ЦЗ, не відтворює реальні параметри обстановки НС.

Визначені керуючі параметри математичної моделі дозволяють спрогнозувати обсяг робіт, який може бути виконаний одним підрозділом ЦЗ і передбачити кількість підрозділів, яку необхідно залучити до ліквідації наслідків НС.

Розроблена математична модель ліквідації НС дозволяє скорегувати дії підрозділів ЦЗ, щодо ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, шляхом визначення оптимального методу ведення оперативних дій та доставки до місця НС необхідної кількості сил і засобів з урахуванням різного роду внутрішніх та зовнішніх факторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Басманов А.Е. Определение зон взрывоопасных концентраций опасного химического вещества в воздухе / А.Е. Басманов, С.С. Говаленков // Матеріали III міжн. наук.-практ. конф. «Актуальні проблеми технічних та природничих наук у забезпеченні цивільного захисту». – Черкаси, АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2010. – С. 66-69.
2. Землянский О.Н. Прогнозирование и мониторинг предаварийного развития процессов / О.Н. Землянский / Матеріали III міжн. наук.-практ. конф. «Системний аналіз. Інформатика. Управління» САІУ-2012. – Запоріжжя: КПУ, 2012. – С. 119-120.
3. Кодекс цивільного захисту України № 5403-VI від 02.10.2012.
4. Моніторинг надзвичайних ситуацій / Ю.О. Абрамов, Є.М. Грінченко, О.Ю. Кірючкін, П.А. Коротинський, С.М. Миронець, В.О. Росоха, В.В. Тютюнник, В.М. Чучковський, Р.І. Шевченко – Х.: Вид-во АЦЗУ, 2005. – 530 с.
5. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2014 році.
6. Статут дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту. Затверджено наказом МНС України від 13.03.12 р. №575
7. Указ Президента України від 16 січня 2013 року № 20/2013 «Положення про Державну службу України з надзвичайних ситуацій».