

## ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОГЕННО-АНТРОПОГЕННИХ РИЗИКІВ І МЕТОДОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ ПІД ЧАС ТРАНСПОРТУВАННЯ ПЕСТИЦИДІВ ТА ІНШИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВІДХОДІВ

Петрук Р.В.

Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, 21000, м. Вінниця  
rroma07@gmail.com

У роботі обґрунтовано математичні моделі ризиків, як індивідуальних, так і соціальних, під час транспортування небезпечних вантажів, якими є пестициди та інші ХЗЗР. Запропоновано методологію управління ризиком можливих аварій під час ТНВ та прийняття відповідних управлінських рішень у передзагрозну і післязагрозну фази. *Ключові слова:* екологічна безпека, ризики, транспортування небезпечних вантажів, пестициди, управління ризиками

**Обоснование моделей техногенно-антропогенных рисков и методологии управления при транспортировании пестицидов и других опасных отходов.** Петрук Р.В. В работе обоснованы математические модели рисков, как индивидуальных, так и социальных, при транспортировании опасных грузов, какими являются пестициды и другие ХЗЗР. Предложена методология управления риском возможных аварий при ТОГ и принятия соответствующих управленческих решений в пре-дугрозную и последугрозную фазы. *Ключевые слова:* экологическая безопасность, риски, транспортирование опасных грузов, пестициды, управление рисками

**Justification of technogenic-antropogenic risk models and management methodology for the transportation of pesticides and other hazardous waste.** Petruk R.V. In this paper, the author justifies mathematical models of both individual and social risks for transporting of dangerous substances, e.g., pesticides and other chemicals for plant protection. Besides, the methodology of risks management for possible accidents during dangerous substances transportation and adoption of relevant management decisions in the pre-threatening and post-threatening phases is designed. *Key words:* ecological safety, risks, transportation of dangerous substances, pesticides, risks management.

**Постановка проблеми.** В Україні в результаті утворення великих обсягів токсичних (небезпечних) відходів (НВ) проблема екологічної безпеки набула особливої гостроти. Розрив між прогресуючим накопиченням токсичних відходів і заходами з їх утилізації та знешкодження загрожує поглибленням екологічної кризи в державі.

Особливої складності у дотриманні безпеки НВ набувають процеси, що пов'язані з транспортуванням небезпечних вантажів (ТНВ), які становлять значну частку обсягу перевезень. При цьому окрему групу токсичних відходів становлять непридатні пестицидні препарати та інші ХЗЗР. Наслідки транспортних подій під час перевезення небезпечних відходів можуть бути катастрофічними для людей, природи і транспорту, тому організаційно-технологічні, природоохоронні та технічні заходи щодо ефективної ліквідації цих наслідків повинні розглядатися у системному зв'язку із заходами щодо мінімізації ризику таких транспортних подій.

**Актуальність дослідження.** Ризик, який супроводжує дорожнє транспортування небезпечних вантажів, складний, щоб зрозуміти, наскільки він зв'я-

заний з усією дорожньою мережею й залежить від багатофакторних коефіцієнтів, таких як густина руху, атмосферні умови, виникнення небажаних подій (дорожні аварії, природні явища і т. п.). Цей ризик також сильно пов'язаний із природою матеріалів, що транспортуються, із присутністю людей і матеріалів у близькості до місця інциденту. Наприклад, транспортування ХЗЗР, зокрема хлор- та фосфорорганічних пестицидів, і їх поширення в навколишнє середовище під час аварії може викликати значний небезпечний вплив на людину, інші живі системи та довкілля, передусім масові отруєння, загибель тощо. Отже, моделювання та прогнозування ризиків під час ТНВ, а також управління можливими ризиками для зменшення небезпеки та шкоди для живих систем і довкілля є вкрай актуальною науково-технічною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як відомо з наукових джерел, імовірність настання надзвичайних ситуацій (НС) під час ТНВ відносно низька ( $10^{-8}$ – $10^{-6}$  на кожен кілометр), але катастрофічні наслідки разом із великими об'ємами НВ і великими відстанями, на які вони транспортуються,

становлять підвищену екологічну небезпеку. НС під час транспортування НВ відбуваються, насамперед, або в результаті аварійної ситуації, або через витікання й активацію небезпечних компонентів відходів, які перевозяться. Комбінація цих двох випадків зазвичай може мати навіть більш катастрофічні наслідки, які можуть призвести до людських жертв, забруднення довкілля і значних економічних утрат. При цьому у сучасних вітчизняних та зарубіжних наукових джерелах проблемі екологічної безпеки приділяється достатньо уваги. Однак це здебільшого теоретичні підходи та математичні моделі, які значною мірою не проєктуються на конкретні практичні завдання, зокрема на вищезазначені [1–18].

**Виклад основного матеріалу.**

**Оцінювання ризику ТНВ.** Оцінювання ризику є обов’язковою частиною процесу інтегрування програм протидії природним загрозам і загальних цілей розвитку. Ці оцінки ідентифікують джерела ризику, вразливі групи і потенційні впливи. Вони дають змогу точно визначати цілі програм управління ризиком та встановлювати цілі зменшення вразливості.

Ризик характеризується двома аспектами: ймовірністю виникнення події та наслідків цієї події. У контексті транспортування небезпечних вантажів небажані події – це нещасні випадки, які можуть призвести до викиду (витоку) небезпечних матеріалів. Відповідно до [5], «ризик – це міра ймовірності і серйозності небезпеки для рецептора через потенційні небажані події, що включають небезпечні матеріали, тоді як рецептором можуть бути особа, навколишнє середовище або властивості». У [2] ризик визначено на основі історичних даних:

$$Risk = \frac{Events}{Exposure}, \tag{1}$$

де *Events* – кількість надзвичайних ситуацій (подій); *Exposure* – масштаб впливу (експозиція).

Оскільки дослідження, як правило, зосереджені на викидах (витоках), які відбуваються на автомагістралі чи (рідше) вздовж залізниць, учені оцінюють ризик з урахуванням різних чинників, таких як щільність населення, тип управління (особливості логіс-

тики), властивості та компонентний склад відходів, які підлягають перевезенню [1–4; 13–18].

Кількісний аналіз ризику передбачає такі ключові кроки: 1) ідентифікація небезпеки і рецептора (того, хто піддається небезпеці); 2) частотний аналіз подій; 3) моделювання наслідків.

**Моделі ризику ТНВ.** Ризик транспортування небезпечних матеріалів, як правило, обчислюється за допомогою функції оцінки шляху. Розглянемо шлях *r*, що складається з послідовного набору ділянок  $\{1, 2, \dots, n\}$ , *i*. Припустимо, що в кожній ділянці є дві важливі та відомі ознаки: *p<sub>i</sub>* – ймовірність виникнення аварійної ситуації на ділянці та *C<sub>i</sub>* – величина, що характеризує наслідки на ділянці *i*. Наслідок можна визначити кількісно, наприклад число людей, що живуть у межах 1 км від місця виникнення нещасного випадку. Найпоширеніша функція оцінки шляху носить назву «традиційна модель ризику»:

$$TR(r) = \sum_{i=1}^n p_i C_i \tag{2}$$

Вираз для традиційного ризику можна інтерпретувати як математично очікувану величину наслідку руху вантажівки з небезпечним вантажем по шляху *r*. Щоб включити завершення поїздки, ми можемо замінити ймовірність *p<sub>i</sub>* аварії на ділянці (припускаючи, що вантажівка їде по ділянці *i*) на вираз  $(1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_{i-1}) p_i$ , що включає ймовірність того, що вантажівка буде рухатися по ділянках від *i* до *i* – 1 без аварії. Це дасть змогу отримати більш складну функцію оцінки шляху (модель Альпа):

$$R^l = \sum_{(i_k, j_k) \in A^l} \prod_{h < k} (1 - p_{i_h, j_h}) p_{i_k, j_k} C_{i_k, j_k}, \tag{3}$$

яка припускає, що відвантаження закінчується, як тільки нещасний випадок відбувається на зв’язку (*I, j*). Якщо припустити, що нещасні випадки на ділянці *i* довжиною *l<sub>i</sub>*, по якій рухається ця вантажівка, відбуваються відповідно до просторового розподілу Пуасона зі швидкістю  $\lambda_i$  за одиницю відстані, і якщо  $p_i = l_i \lambda_i$ , тоді ми отримаємо ймовірність зупинки руху в будь-якому місці ділянки:

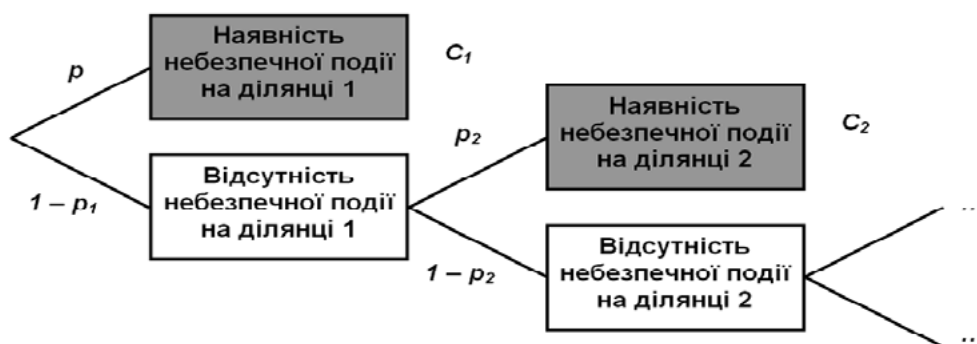


Рис. 1. Відображення часткової ймовірності можливих наслідків під час транспортування НВ, де *p* – ймовірність інциденту на певній ділянці, *C* – кількість населення, що піддається впливу у разі інциденту

## Функції оцінки ризику ТНВ

Вид ризику або його складова частина	Модель	Автор(и)
Ймовірність аварії	$IP(r) = \sum_{i \in r} p_i$	Ф. Саккоманно, А. Чан (1985)
Прийнятний ризик	$PR(r) \sum_{i \in r} p_i (C_i)^q$	М. Абковіц та ін. (1992)
Умовний ризик	$CR(r) = \sum_{i \in r} p_i C_i / \sum_{i \in r} p_i$	Р. Сівакумар та ін. (1993)
Традиційний ризик	$TR(r) = \sum_{i \in r} p_i C_i$	Е. Альп (1995)
Вплив на населення вздовж маршруту	$Exposure_i = f(V_c, \rho(V_c))$	Р. Батта, С. Чіу (1988)
	$PE(r) = \sum_{i \in r} D_i$	К. Ревелль та ін. (1991)
	$R_{ij}(v_{ij}, \nu_{ij}) = s_{ij}(v_{ij}) \rho_{ij} u_{ij}$	Ван та ін. (2011)
Середнє відхилення	$MV(r) = \sum_{i \in r} (p_i C_i + k p_i C_i^2)$	Еркурт, А. Інголфссон (2000)
Небезпека впливу	$DU(r) = \sum_{i \in r} p_i (\exp(k C_i) - 1)$	
Мінімум-максимум	$MM(r) = \max_{i \in r} C_i$	

$$R^l = \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^{i-1} \exp(-p_j) (1 - \exp(-p_i)) C_i \quad (4)$$

Якщо визначити атрибути ділянки як  $q_i = 1 - \exp(-p_i)$  для всіх ділянок, то попередні вирази суттєво спростуються із заміною  $q_i$  на  $p_i$ . При цьому кількість  $q_i$  – імовірність однієї або декількох аварій, що відбуваються на ділянці і під час руху по ній небезпечного вантажу.

Окрім моделі традиційного ризику, у літературних джерелах є багато інших функцій оцінки шляху та ризиків під час транспортування НВ (табл. 1).

У табл. 1  $D_i$  використовується для позначення загальної чисельності населення в регіоні впливу вздовж ділянки  $i$ .

**Частотний аналіз ТНВ.** Згідно з [5], частотний аналіз включає: 1 – визначення ймовірності небажаної події; 2 – визначення рівня потенційного впливу на рецептора з урахуванням природи явища; 3 – оцінка ступеня серйозності з урахуванням рівня впливу. Кожна стадія цього оцінювання вимагає розрахунку розподілу ймовірності, а стадії (1) і (2) включають умовні розподіли. Наприклад, для кожної ділянки дороги визначають спільну ймовірність типу аварії, емісії, події і наслідку, як показано нижче. При цьому нехай: А – аварія з перевізником небезпечних матеріалів, М – подія (явище) емісії, І – вид події, D – розмір шкоди живим організмам. Припустимо, що наслідок емісії небезпечних матеріалів виражається числом пошкоджень. Тоді, використовуючи теорему Байєса, ми отримаємо ймовірність шкоди, яка виникає внаслідок нещасного випадку, пов'язаного з небезпечними матеріалами:

$$p(A, M, I, D) = p(D|A, M, I) p(I|A, M) p(M|A) p(A) \quad (5)$$

Під час оцінювання ризику в наукових джерелах розрізняють індивідуальні і соціальні ризики. Такий

поділ виправданий, якщо небагато людей присутні навколо небезпечної ділянки, і соціальний ризик наближається до нуля, тоді як індивідуальний ризик може бути досить високим.

**Оцінювання індивідуального ризику.**

У [5] індивідуальний ризик визначається як щорічна частота смертельних випадків середньостатистичної особи на певній відстані від зони впливу. Наприклад, автори [9] пропонують модель, що потребує для оцінювання індивідуального ризику такі змінні високого рівня: частота викидів (скидів, аварій), ймовірність події з викидом (аварією), ймовірність вітру та інші метеоумови, вразливість та декілька інших механічних та фізико-хімічних параметрів джерел ризику, зокрема: швидкість витoku, його тривалість тощо.

Таким чином, розподіл уразливості навколо точки ризику приписується кожній парі «метеоумов випадків витoku (аварії)». Це називають картою вразливості. З математичного погляду «одична ймовірність» («пробіт») – це пряма ймовірність, розроблена для вимірювання, наприклад, смертельної шкоди певній частині населення, виражена як середньоквадратичне відхилення з математичним очікуванням. Рівняння пробіту (одичної ймовірності) має вигляд:

$$Y = k_1 + k_2 \cdot \ln V, \quad (6)$$

де  $Y$  – пробіт, який пов'язаний із відсотком населення, яке страждає від наслідків;  $k_1$  і  $k_2$  – константи, які визначаються з історичних даних;  $V$  – величина ефекту, наприклад надлишковий тиск або теплова доза.

Згідно з [6], у точці досліджуваної області (тобто точці, що відповідає реальному місцю розташування), індивідуальний ризик задається сумою ризиків, які створюються у тій точці всіма дугами лінійного джерела ризику на дорозі.

Щоб обчислити індивідуальний ризик у точці  $P$  унаслідок нещасного випадку в точці  $Q(t)$ , карти вразливості поєднуються з ймовірністю настання різних сезонних ситуацій, метеоумов і напряму вітру для одержання карт одиничного ризику, тоді як  $t$  – абсциса криволінійного маршруту.

Припустимо, що  $Q(t)$  – точкове джерело ризику, тоді у спільній точці  $O$  карти одиничного ризику для  $i$ -го випадку витoku (аварії) одиничний ризик визначається як:

$$\bar{R}_{Q(t) \rightarrow O}(i) = \sum_{j=1}^{N_{seas}} x(j) \sum_{k=1}^{N_{met}} \int_0^{2\pi} P_{wind}(j, k, \vartheta) v_{Q(t) \rightarrow O}(i, k, \vartheta) d\vartheta, \quad (7)$$

де  $N_{seas}$  – кількість різних сезонних ситуацій;  $N_{met}$  – кількість різних метеорологічних ситуацій;  $P_{wind}$  – функція щільності ймовірності заданого вітру  $\vartheta$  для визначених метеоумов  $k$  і сезонної ситуації  $j$ ;  $v_{Q(t) \rightarrow O}$  – вразливість того, що витік (аварія)  $i$  при  $Q(t)$  виникає в точці  $O$ , коли метеоумова –  $k$ , і напрям вітру –  $\vartheta$ ;  $X(j)$  – частка року, протягом якої танкери (цистерни) переміщуються по дорозі в даному сезоні (у цьому разі використовують символ  $x_V(j)$ );  $x(j)$  – частка сезону, протягом якого будь-який засіб, з якого може витекти шкідлива речовина, є активним й у цьому разі використовується символ  $x_P(j)$ . Тоді карти одиничного ризику суміщаються з відповідними коефіцієнтами частоти і перетворюються вздовж маршруту для опису змін в місці, де може відбутися нещасний випадок, тобто частку всіх точкових джерел ризику  $Q(t)$  у значенні ризику  $P$ . Нарешті, вони додаються для всіх випадків витоків (аварій) для одержання глобального індивідуального ризику  $IR_p$ :

$$IR_p = \sum_{i=1}^{N_{rel}} \left[ \int_L f_{rel}(i, t) \bar{R}_{Q(t) \rightarrow P}(i) dt \right], \quad (8)$$

де  $L$  – дорожній маршрут;  $N_{rel}$  – кількість випадків витоків (аварій);  $f_{rel}$  – частота  $i$ -го випадку витoku (аварії). Вона обчислюється як:

$$f_{rel}(i, t) = \lambda_R(t) p_{rel} p_{\Phi}(i) p_I n_V, \quad (10)$$

де  $\lambda_R$  – середня кількість аварій (транспортних засобів $^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ );  $p_{rel}$  – ймовірність витoku під час аварії;  $p_{\Phi}$ (шт) – ймовірність витoku певного розміру (певної кількості);  $p_I$  – ймовірність займання (тільки для вогнебезпечних речовин);  $n_V$  – кількість транспортних засобів, які проїжджають за рік.

Для того щоб виконати лінійний інтеграл виразу (10), необхідно представити маршрут як полігональну криву з  $N_{seg}$  прямих сегментів, кожен з яких характеризується постійними значеннями частоти витоків. Із цією гіпотезою вираз (10) та з урахуванням виразу (8) перетворюється на:

$$IR_p = \sum_{i=1}^{N_{rel}} \sum_{l=1}^{N_{seg}} f_{rel}(i, l) \left[ \int_{L_i} \bar{R}_{Q(t) \rightarrow P}(i) dt \right]. \quad (11)$$

**Оцінювання соціального ризику.** Соціальний ризик може бути представлений за допомогою кривих  $F(N)$ , де  $F$  – частота всіх аварій, які призводять до смерті  $N$  або більше осіб. Окрім карт уразливості

для кожного випадку метеорологічних умов необхідно також ідентифікувати на карті населення: зони прямокутної форми, де людей можна вважати однорідно розподіленими з густотою, яка залежить від того, чи територія міська, приміська або сільська; дороги, де люди лінійно розподілені; місця скупчення людей, наприклад, школи, лікарні, та магазини, де людей можна розглядати як розбитих на групи. Крім того, потрібно оцінити ймовірності перебування всередині приміщень кожної категорії людей.

Тоді у точковому джерелі ризику  $Q(t)$  розвиток подій залежить від комбінації сезонної ситуації  $i$ , метеорологічних умов  $j$  і напрямку вітру  $k$ . Коли в  $Q(t)$  трапляється аварія, то кількість летальних наслідків  $N_{Q(t)}^{scen}(i, j, \vartheta)$  відповідно до кожного сценарію розвитку подій оцінюється рівнянням:

$$N_{Q(t)}^{scen}(i, j, \vartheta) = \sum_{m=1}^{n_L} p_{L_m}(j) \int_{L_m} v_{Q(t)}(i, k, \vartheta) [x_{L_m}(j) + (1 - x_{L_m}(j)) \alpha_{P, L_m}] dL_m + \sum_{n=1}^{n_A} p_{A_n}(j) \int_{A_n} v_{Q(t)}(i, k, \vartheta) [x_{A_n}(j) + (1 - x_{A_n}(j)) \alpha_{P, A_n}] dA_n + \sum_{o=1}^{n_C} v_{Q(t)}(i, k, \vartheta) [x_{C_o}(j) + (1 - x_{C_o}(j)) \alpha_{P, C_o}] N_{C_o}(j), \quad (12)$$

де  $n_L$  – кількість ліній (прямих) на карті населення;  $n_A$  – кількість прямокутників на карті населення;  $n_C$  – кількість точок на карті населення;  $p_{L_m}$  – щільності людей, що відповідають  $m$ -ій лінії;  $p_{A_n}$  – щільності людей, що відповідають  $n$ -му прямокутнику;  $N_{C_o}$  – кількість осіб у місці скупчення  $O$ ;  $x_{L_m}$  – частка людей, що залишаються в приміщенні на загальній прямій;  $x_{A_n}$  – частка людей, що залишаються в приміщенні на загальному прямокутнику;  $x_{C_o}$  – частка людей, що залишаються в приміщенні в місці скупчення  $O$ ;  $\alpha_{P, A_n}$  – коефіцієнт зменшення, який залежить від перебування в приміщенні на загальній прямій;  $\alpha_{P, A_n}$  – коефіцієнт зменшення, який залежить від перебування в загальному прямокутнику;  $\alpha_{P, C_o}$  – коефіцієнт зменшення, який залежить від перебування в місці скупчення;  $v_{Q(t)}$  – вразливість унаслідок витoku в точковому джерелі  $Q(t)$ , яка відображена на картах уразливості.

Для того щоб здійснити інтегрування рівняння (12), кожна матриця вразливості лінійно інтерполюється з одержанням неперервної функції.

Кожен сценарій у точковому джерелі ризику має бути охарактеризований кількістю фатальних наслідків  $N_{Q(t)}^{scen}(i, j, \vartheta)$  та частотою на одиницю довжини й одиницю кута, яка визначається як:

$$f_{Q(t)}^{scen}(i, j, \vartheta) = f_{rel}(i, t) x(j) P_{wind}(i, j, \vartheta). \quad (13)$$

Для того щоб оцінити  $N_{Q(t)}^{scen}(i, j, \vartheta)$  для даного сценарію у точковому джерелі ризику  $Q(t)$ , на карту населення накладаються карти вразливості, які обертаються для опису змін напрямку вітру.

Коли  $N_{Q(t)}^{scen}(i, j, \vartheta)$  і  $f_{Q(t)}^{scen}(i, j, \vartheta)$  у точці  $Q(t)$  відомі для кожного сценарію,  $F_Q(t)[N(i, j, k)]$  – кумулятивну функцію частоти  $Q(t)$  на одиницю довжини в точці  $Q(t)$  можна оцінити з урахуванням усіх напрямків вітру.

Для того щоб моделювати зміни в місці, де можуть відбутися аварії, карти вразливості переносяться вздовж маршруту і для кожної точки маршруту  $Q(i)$ , і для фіксованих значень  $N$ , щоб додати інтегровані значення для всіх комбінацій сезонних ситуацій, метеоумов і одержати остаточну криву  $F(N)$ .

Попередні вирази дають змогу оцінювати ризик із припущенням, що може відбутися лише один тип аварії. Однак під час транспортування небезпечних матеріалів може відбутися більше ніж один тип аварії чи наслідків. Тоді ризик транспортування небезпечних матеріалів, пов'язаний із дорожнім сегментом  $l$ , можна виразити як:

$$R_l = s_m \sum_{a \in A} \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} p_i(A_a, M_m, I_i, C_c) \cdot CONS_c, \quad (14)$$

де  $CONS_c$  – можливий наслідок  $c$ -типу.

#### Аналіз моделей ризику ТНВ автотранспортом.

Транспортування НВ автотранспортом фактично створює потенційно високий ризик залежно від природи небезпечних відходів, які транспортуються, та потенційних фізико-хімічних подій, пов'язаних із ними (радіоактивність, вибухо- та пожежонебезпека, токсичність, корозійна здатність тощо); природи, розміщення та щільності огорожених територій (населені пункти, промислова зона, об'єкти інфраструктури, паркова зона та ін.); особливостей стану доріг (топографія, планування, наявність тунелів тощо); щільності руху та стану навколишнього середовища (погодні умови, природні явища та ін.).

При цьому тип небезпечних відходів, їхня кількість, маршрут та час перевезення не завжди відомі органам державної влади, дорожнім компаніям, територіальним громадам, населенню.

**Методика визначення ризику ТНВ автошляхами.** Дослідження у цьому напрямі зосереджено на двох головних питаннях:

- 1) оцінці ризику для населення від вантажівок, які рухаються на різних сегментах дорожньої мережі;
- 2) вибору найбільш безпечних маршрутів для перевезення НВ.

Відомо, що одна з найбільш поширених моделей ризику – це модель соціального ризику, яка є результатом між імовірністю інциденту на одиницю довжини й наслідком інциденту, який оцінюється як кількість населення в зоні впливу. У [10] наведено концепцію  $\lambda$ -сусідства, в якій зона впливу являє собою коло із центром у місці розташування інциденту з радіусом  $\lambda$ , величина якого залежить від класу небезпеки речовини. У цій ситуації зусилля з планування заходів не тільки повинно бути спрямоване на мінімізацію повного ризику, а й повинно забезпечити однорідний розподіл ризику по всьому маршруту.

**Розроблення моделі та її параметри.** Автострада, як правило, – широкий бетонований шлях (без поперечних переїздів) для масового автомобільного руху. Вона являє собою переважно дорогу з двобічним рухом, із мінімум двома смугами у кожному напрямку, а також смуги, які мають розділений доступ. При цьому потрібно враховувати такий причинно-наслідковий зв'язок, який може бути пов'язаний із процесом транспортування групи небезпечних відходів: 1) автомобіль може бути предметом ДТП (аварії); 2) унаслідок аварійної ситуації можливе вивільнення матеріалу, що транспортується (емісія); 3) аварія може викликати ланцюгову реакцію (інцидент); 4) інцидент впливає на територію, прилеглу до місця аварії.

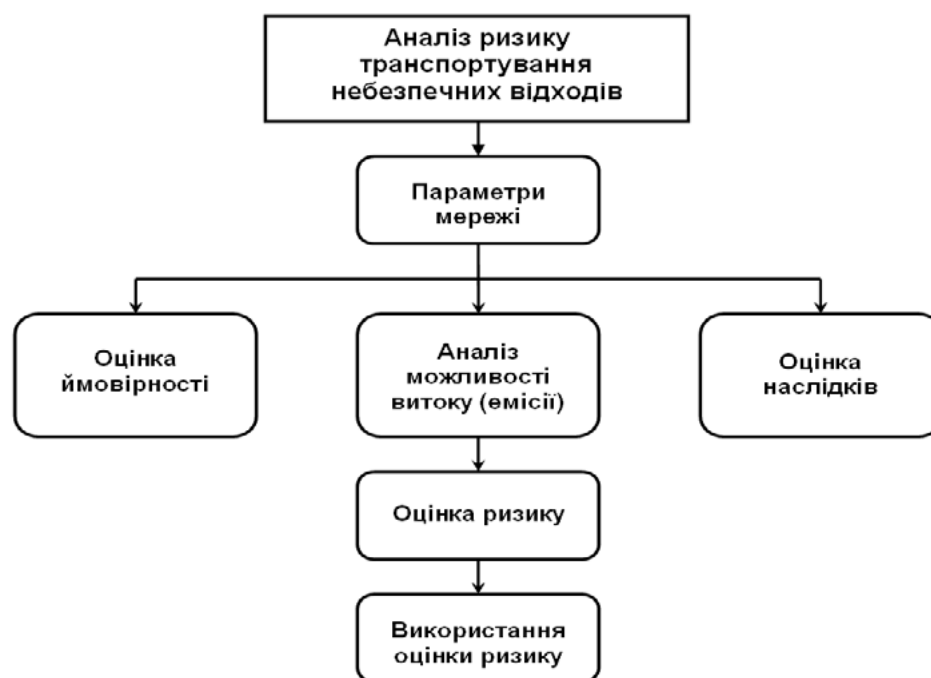


Рис. 2. Методологія оцінки ступеня ризику

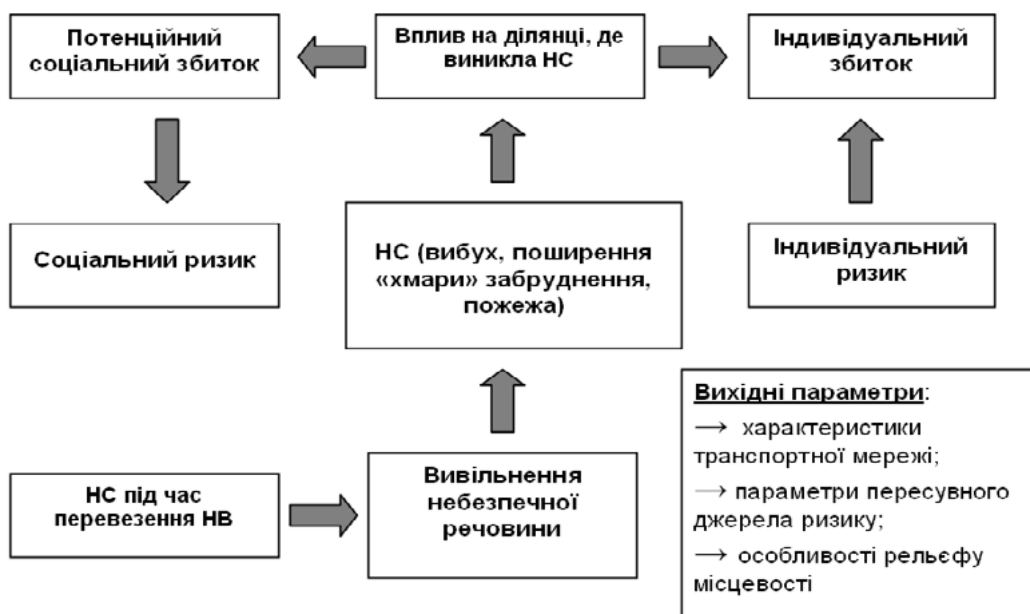


Рис. 3. Модель оцінки ступеня ризику

Таблиця 2

**Фаза попередження і зниження ризику (превентивні заходи)**

Передзагрозна фаза			
Ідентифікація ризику	Зменшення	Передача ризику	Підготовленість
Оцінка небезпеки (частота, величина і місце виникнення)	Робота з фізичного/структурного зменшення	Страховання і перестраховання суспільного і приватного майна	Системи раннього попередження і комунікаційні системи
Оцінка вразливості (населення і майна)	Планування землекористування і будівельні правила	Інструменти фінансового ринку	Планування на випадок надзвичайних ситуацій (комунальні підприємства)
Оцінка ризику (функція небезпеки і вразливості)	Економічні стимули	Приватизація комунального обслуговування з правилами безпеки	Мережі реагування на надзвичайні випадки (місцеві та національні)
Моніторинг і прогнозування небезпеки (ГІС, картографування)	Освіта, навчання і занепокоєння ризиками і запобігання	«Фонди нещастя» (національний або локальний рівень)	Укриття та плани евакуації

Таблиця 3

**Фаза відновлення після загрози**

Післязагрозна фаза	
Аварійне реагування	Відновлення і реконструкція
Гуманітарна допомога	Відновлення і реконструкція пошкодженої критичної інфраструктури
Прибирання, поточні ремонти, і відновлення послуг	Управління макроекономікою і бюджетом (стабілізація і захист соціальних витрат)
Оцінка пошкоджень	Регенерація порушених секторів (експорт, туризм, сільське господарство тощо)
Мобілізація ресурсів	Об'єднання компонентів зменшення загрози через реконструкційну діяльність

Модель ураховує величину збитків та ймовірність летальних випадків.

Оцінка ступеня ризику – це структурований процес, що впливає із взаємодії між такими компонентами: 1) транспортна мережа (у цьому разі автострада); 2) динамічне джерело ризику (автотранспортний засіб); 3) зона ураження.

**Безпечні технології ТНВ.** Із погляду безпечних технологій ТНВ пропонуються такі потенційні напрями досліджень: переспрямування маршрутів навколо головних міст, оскільки ризик терористичних атак зробив дуже небажаним маршрут транспортних засобів (особливо поїздів) через густонаселені міста; зміни в моделюванні ризиків подій; зміни в методології планування маршруту; встановлення на всіх транспортних засобах, що перевозять НВ, глобальних навігаційних систем і обладнання зв'язку, які дають змогу точно відслідковувати шлях транспортних засобів, і також запровадити системи оперативного прийняття рішень.

**Управління ризиком під час ТНВ.** Наявність можливості виникнення надзвичайних ситуацій потребує процесу управління ризиком, який включає прийняття вирішальних логістичних рішень, які посиляються, наприклад, на організацію операцій аварійного реагування. Фактично логістичні рішення про планування маршрутів перевезення небезпечних речовин і про аварійне реагування повинні бути об'єднані [2].

Планування маршрутів перевезення небезпечних матеріалів є критичним рішенням для зменшення ризику транспортування. Переспрямування цих маршрутів транспортування, особливо отруйних речовин, зокрема пестицидів, із небезпекою інгаляції подалі від населених районів набуло значної уваги в останні роки як засіб зниження ризику. Чіткі стратегії, процедури й управління ризиком під час ТНР дадуть змогу точно ідентифікувати небезпечні матеріали і мінімізувати ризики.

Також необхідно розробляти інтегровані системи управління безпекою для здійснення заходів, які зменшують уразливість, і попереджувальних заходів, які зменшують небезпеку [8].

Незважаючи на серйозну занепокоєність, ймовірність аварії під час ТНВ, спричиненої терористичною атакою, зростає, тому висувуються такі дві додаткові цілі: моделювати параметри ризику і розробляти методи для обчислення ризику транспортування, ефективно сформулювати і вирішити проблему маршруту ТНВ так, щоб ризик був міні-

мізований без необґрунтованого збільшення вартості транспортування.

Процес управління ризиком ТНВ включає низку вирішальних логістичних рішень, що зводяться до планування ТНВ та організації дій аварійного реагування. Однак, оскільки наслідки нещасного випадку з небезпечними матеріалами можуть бути величезними, дослідники віддають перевагу моделюванню ризику, пов'язаного з небезпечним вантажем, щоб запропонувати різні методи проектування оптимальних маршрутів, які являють собою компроміс між вартістю транспортування та ймовірністю надзвичайної ситуації (НС).

Ключові елементи управління ризиком розділені на дві фази: фаза до НС (передзагрозна) і фаза після неї (післязагрозна). Передзагрозна фаза включає ідентифікацію ризику, зниження ризику, передачу ризику і підготовленість; післязагрозна фаза передбачає аварійне реагування, відновлення та реконструкцію. У табл. 2 ключові компоненти управління ризиком безпеки розділено на дії, необхідні під час передзагрозної фази, і дії, необхідні під час післязагрозної фази.

При цьому комплексна програма управління ризиком взаємодіє з усіма цими компонентами: вона є інтегрованою, міжгалузевою мережею інституцій, які пов'язані з вищезгаданими фазами зниження ризику та відновлення після безпеки. Крім того, діяльність, яка потребує підтримки, є стратегія і планування, реформування правових та законодавчих основ, механізмів координації, посилення участі інституцій, національні плани дій та інституційний розвиток. За ідеального управління ризиком пріоритетними є ризики з найбільшими втратами і найбільшою ймовірністю виникнення, а ризики з нижчою ймовірністю виникнення і меншими втратами управляються в порядку убування.

**Головні висновки.** Обґрунтовано моделі техногенно-антропогенних ризиків під час транспортування небезпечних відходів, якими є, зокрема, пестицидні препарати, інші ХЗЗР та небезпечні вантажі. При цьому перевезення таких НР може супроводжуватися відповідними катастрофічними наслідками як для людей, так і для довкілля у цілому. Встановлено, що потенційну загрозу, а також величину цих наслідків можна оцінити кількісно з певною ймовірністю. У результаті ці ризики можна спрогнозувати, управляти ними й уживати відповідних управлінських рішень та заходів щодо попередження загроз або їх усунення як під час передзагрозної, так і післязагрозної фаз.

## Література

1. Качинський А.Б. Антропогенні навантаження та екологічна безпека в системі «Пестициди – навколишнє середовище – здоров'я населення на основі аналізу ризику». Київ, 1994. 30 с. (Препринт / Національний Інститут стратегічних досліджень; № 26).
2. Качинський А.Б. Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращення. Київ : НІСД, 2001. 312 с.
3. Екологічна безпека Вінниччини : монографія / О.В. Мудрак ; за заг. ред. О.В. Мудрака. Вінниця : Міська друкарня, 2008. 456 с.
4. Управління та поводження з відходами. Технології знезараження непридатних пестицидів : навчальний посібник / В.Г. Петрук та ін. Вінниця : ФОП Рогальська, 2012. Ч. 1. 265 с.
5. Про приєднання України до Базельської конвенції про контроль за транскордонними перевезеннями небезпечних відходів та їх видаленням : Закон України 01.07.1999 № 803-XIV URL: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/803-14>. (дата звернення: 15.11.2018).
6. Bell M.G.H. Mixed Route Strategies for the Risk-Averse Shipment of Hazardous. *Materials, Networks and Spatial Economics*. 2006. Vol. 6. P. 253–265.
7. Alp E. Risk-based transportation planning practice: overall methodology and a case example. *INFOR*. 1995. № 33. P. 4–19.
8. Erkut E., Ingolfsson A. Transport risk models for hazardous materials: revisited. *Operations Research Letters*. 2005. № 33(1). P. 81–89.
9. Erkut E., Ingolfsson A. Catastrophe avoidance models for hazardous materials route planning. *Transportation Science*. 2000. № 34. P. 165–179.
10. ReVelle C., Cohon J., Shobrys D. Simultaneous siting and routing in the disposal of hazardous wastes. *Transportation Science*. 1991. Vol. 25, № 2. P. 138–145.
11. Harwood D.W., Viner J.G., Russell E.R. Procedure for developing truck accident and release rates for hazmat routing. *Journal of transportation engineering*. 1993. № 119. P. 189–199.
12. Турчик П.М., Сушинська М.М., Нагорна К.В. Екологічна безпека та розрахунок ризиків транспортування пестицидних препаратів на основі теорії нечітких множин. *III Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. ст., м. Вінниця, 21–24 вересня 2011 р. Вінниця, 2011. Т. 1. С. 108–111.
13. Ранський А.П., Петрук Р.В., Турчик П.М. Розрахунок екологічного ризику під час утилізації фосфоровмісних пестицидних препаратів. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2012. № 2(10). С. 65–68.
14. Турчик П.М., Петрук В.Г. Методи оцінювання екологічних ризиків при транспортуванні небезпечних речовин. *IV Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю* : зб. наук. ст., м. Вінниця, 25–27 вересня 2013 р. Вінниця, 2013. С. 149–151.
15. Оцінювання ризиків для соціоекосистем під час перевезення небезпечних відходів / П.М. Турчик та ін. *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Спеціальний випуск до IX НПК «Сучасні проблеми збалансованого природокористування»*. 2014. С. 144–146.
16. Турчик П.М., Петрук В.Г., Бабенко І.В. Количественный расчет экологических рисков транспортировки опасных отходов. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист* : матер. Всеукр. НПК з міжн. участю, м. Черкаси, 9–10 жовтня 2015 р. Черкаси, 2015. С. 557–560.
17. Турчик П.М., Гурба Д.П. Розрахунок транспортного ризику процесу перевезення небезпечних відходів. *I МНПК студентів, магістрантів та аспірантів «Галузеві проблеми екологічної безпеки»* : матер. міжнар. конф., м. Харків, 22 жовтня 2015 р. Харків. 2015. С. 20–22.