

УДК 614.8:519.2:504.05

ПОПОВ О.О.

ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», м. Київ

ПРОГНОЗУВАННЯ АВАРІЙНОГО РИЗИКУ

В статті розглядаються методи оцінки аварійного ризику від техногенних об'єктів для навколишнього середовища і здоров'я населення. Розглянуто питання визначення величини збитку від аварії на потенційно небезпечному об'єкті. Наведено загальну схему прогнозування оцінок аварійного ризику.

Вступ

Кожен техногенний об'єкт має певний рівень небезпеки для людини та навколишнього природного середовища. Питання полягає в рівні небезпеки. У випадку, якщо суспільство з тих чи інших причин незгодне миритися з небезпекою, яка породжується техногенним об'єктом, виникає необхідність вибору дій, спрямованих на зниження рівня небезпеки. Прийнятний рівень небезпеки може бути досягнутий різними шляхами. Так, рівень небезпеки може бути знижений шляхом цілеспрямованої зміни технології, шляхом використання більш небезпечних для людини та природного середовища матеріалів, шляхом віддалення виробничих об'єктів від населених пунктів тощо. Ці способи істотно різні, в тому числі – за економічною ефективністю. У зв'язку з цим, загальна проблема забезпечення екологічної безпеки передбачає аналіз істотного рівня небезпеки, що породжується техногенним об'єктом; при необхідності – аналіз варіантів зниження рівня небезпеки та вибір варіантів, які відповідають існуючим у суспільства можливостям [1, 2].

Постановка задачі

Необхідною умовою коректного аналізу небезпеки та умовою коректного (в ідеальному випадку – оптимального) вибору способів її зниження, є кількісне вираження рівня потенційної небезпеки. Загальноприйнятою кількісною оцінкою рівня потенційної небезпеки є оцінки ризику. Різноманіттю прояву небезпеки відповідає різноманітття оцінок ризику, що знайшло відображення в їх класифікації. В залежності від режиму функціонування об'єкта, який породжує небезпеку, виділяють оцінки ризику, пов'язані зі штатним режимом функціонування техногенного об'єкта та оцінки ризику, пов'язані з аварією на об'єкті. Останні називаються оцінками аварійного ризику. Виділення оцінок аварійного ризику в окрему категорію, в загальному випадку, носить умовний характер і відображає кількісну сторону. Зазвичай рівень аварійної небезпеки значно вище рівня небезпеки, пов'язаного з об'єктом, який функціонує в штатному режимі. У зв'язку з цим, оцінки аварійного ризику, як правило, характеризують верхню границю рівня потенційної небезпеки, що породжується техногенним об'єктом [3, 4].

Вирішення задачі

Оцінки ризику класифікують за ознакою, хто чи що сприймає небезпеку, тобто є реципієнтом ризику. Виділяють оцінки ризику відносно стану здоров'я людини та оцінки ризику відносно стану навколишнього природного середовища. Оцінки ризику також можуть бути диференційовані по відношенню до типу аварії, по відношенню до джерел небезпеки і т.д.

Аналіз рівня небезпеки пов'язаний на співставленні оцінок ризику з його допустимими значеннями. В якості допустимих величин ризику зазвичай вибирають значення,

співрозмірні з фоновими величинами. В деяких державах прийнятий так званий стандарт безпеки, який законодавчо встановлює допустимий рівень оцінок ризику [8].

Аналіз розподілу оцінок ризику по території дозволяє виділити зони, які відповідають різним рівням небезпеки. Районування території за рівнем потенційної небезпеки дозволяє приймати стратегічні рішення по забезпеченню безпеки життєдіяльності. Зокрема, – дозволяє на основі об'єктивних показників вирішити питання про межі зон захисних заходів навколо об'єктів підвищеної небезпеки. Динаміка розповсюдження небезпеки по території, динаміка зміни оцінок ризику визначає послідовність дій в умовах надзвичайних ситуацій [5].

Вибір способів зниження рівня небезпеки базується на вирішенні задачі мінімізації деякої цільової функції. Наприклад, доведення рівня небезпеки до певної величини за мінімальний час чи при мінімальних матеріальних витратах. Останній випадок відповідає принципу економічної ефективності заходів, які спрямовані на зменшення ризику. Фактично, при виборі способу зниження рівня небезпеки вирішується обернена задача: за заданим рівнем небезпеки визначають заходи, які необхідні для досягнення заданого рівня небезпеки.

Основні методи прогнозування

Визначальне співвідношення для прогнозування оцінок ризику може бути представлено у вигляді [1, 4]:

$$\text{Оцінка ризику} = \sum_z (\text{Частота } z\text{-го процесу}) \times (\text{Збиток при } z\text{-ому процесі}) \quad (1)$$

Оцінка аварійного ризику, за визначенням, включає дві компоненти. Перша компонента характеризує частоту (ймовірність) виникнення та розвитку аварійного сценарію. Друга компонента оцінки аварійного ризику характеризує величину збитку, обумовленого аварією. Кількісна характеристика рівня небезпеки, яка виражена в оцінці ризику, визначається відносно конкретного реципієнта ризику та конкретної міри збитку. Для аналізу зручно виділяти умовні оцінки аварійного ризику, які відображають наслідки конкретної аварії на об'єкті. Наприклад, умовна оцінка аварійного ризику при гіпотетичній пожежі на об'єкті.

Зазвичай під величиною збитку розуміється чи ймовірність нанесення збитку (наприклад, ймовірність захворювання раком легень, ймовірність загибелі представників певного виду флори і т.д.), чи математичне сподівання величини збитку (математичне сподівання відносної кількості захворілих, математичне сподівання відносної кількості загиблих представників певного виду флори і т.д.). У відповідності з визначенням величини збитку дається трактування оцінки ризику.

Введемо позначення: P_z – ймовірність z -го аварійного процесу, U_k^z – збиток, що прогнозується від аварії. Вираз для оцінки аварійного ризику R , який характеризує рівень небезпеки в деякій точці (r, φ) , має вигляд:

$$R(r, \varphi) = \sum_z P_z \cdot W^z(r, \varphi), \quad (2)$$

де оцінка умовного аварійного ризику, яка пов'язана з z -ою аварією,

$$W^z(r, \varphi) = \sum_k v_k \cdot U_k^z(r, \varphi). \quad (3)$$

Оцінка умовного аварійного ризику характеризує прогнозовані наслідки аварії конкретного типу. В загальному випадку прогнозовані наслідки аварії, і, відповідно, величини збитку U_k^z , залежать від кліматичних умов (температури, швидкості вітру, його напрямку та ін.). Тому у вираз (3) входить ймовірність v_k прояву k -го набору кліматичних характеристик навколишнього середовища.

Оцінка умовного аварійного ризику W^z є характеристикою рівня небезпеки, яка породжується техногенним об'єктом, при умові, що аварійна ситуація розвивалась за

визначеним сценарієм. В залежності від виду аварійного впливу та способу його передачі будуються конкретні вирази для оцінки умовного аварійного ризику.

Конкретизуємо вид аварійного впливу та елемент абіотичного середовища, через яке вплив передається реципієнту ризику – людині. В окремому випадку токсичного впливу на людину через атмосферне повітря при реалізації конкретного сценарію аварійної ситуації вираз (3) має вигляд:

$$W^z(r, \varphi) = \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{t_a} dt \int_0^{V_{max}} dV \int_{T_{min}}^{T_{max}} \mu(\alpha) \lambda(V) \cdot \left(\sum_i P(V \in \delta V | d_i) \right) \overline{\eta(t)} \chi(T) U(r, \varphi, d_i, t, \alpha, V, T) dT, \quad (4)$$

де $\mu(\alpha)$ – щільність розподілу ймовірностей напрямку вітру, які визначаються кутом α ; $\lambda(V)$ – щільність розподілу ймовірностей значень швидкості вітру V ; $P(V \in \delta V | d_i)$ – ймовірність того, що при швидкості вітру $V \in \delta V$ стан стійкості атмосфери відноситься до класу стійкості d_i ; $\overline{\eta(t)}$ – щільність розподілу ймовірностей невинного випадання опадів у вигляді дощу; t_a – часовий інтервал токсичного впливу при передачі впливу через атмосферне повітря; $\chi(T)$ – щільність розподілу ймовірностей значень температури атмосферного повітря; $U(r, \varphi, d_i, t, \alpha, V, T)$ – функція, яка характеризує збиток при реалізації конкретного аварійного сценарію. Введена полярна система координат (r, φ) з початком в центрі джерела небезпеки.

Функція збитку U виражає ймовірність нанесення збитку реципієнту ризику в точці (r, φ) . Зокрема, для аварій із вивільненням високотоксичних речовин в якості функції збитку для стану здоров'я людини може бути прийнята ймовірність летального результату. Вид функції збитку зазвичай встановлюється в спеціальних експериментах. При токсичному впливі U залежить від токсодози D за час токсичного впливу t_0 :

$$D(r, \varphi, d_i, t_0, \alpha, V, T) = \int_0^{t_0} c^n(r, \varphi, d_i, t, \alpha, V, T) dt, \quad n = const. \quad (5)$$

В наш час велика увага приділяється величинам збитку, який визначається через ймовірність захворювань. Наприклад, при впливі на людину газоподібних канцерогенних речовин – ймовірність захворювання раком легень.

Оцінка умовного ризику характеризує наслідки конкретної аварії а, як випливає з (4), не може перевищувати одиниці. По змісту оцінка локального ризику відповідає прогнозованій ймовірності ураження реципієнта ризику в конкретній точці (r, φ) без засобів захисту. Тобто оцінка локального ризику – іманентна характеристика точки місцевості по відношенню до рівня небезпеки, яка пов'язана з техногенним об'єктом.

Після оцінок локального аварійного ризику, пов'язаного з техногенним об'єктом, може бути представлено на карті місцевості. При цьому виділяють зони, які відповідають різним рівням R^* . Зони виділяються умовою $R(r, \varphi) > R^*$. Площа зон визначається у відповідності з картою району розміщення об'єкта. Якщо вводиться до розгляду декілька рівнів ризику, то забезпечується диференціація прогнозуючої області ураження за рівнем потенційної небезпеки. Розмір області характеризується ефективним радіусом R_{ef} . Оцінка умовного аварійного групового ризику в точці $(r, \varphi) \in \Omega$

$$W_g^z(r, \varphi) = M \psi(r, \varphi) W^z(r, \varphi), \quad (6)$$

де ψ – щільність розподілу людей по зоні ураження Ω , яка відповідає умові нормування $\int \psi(r, \varphi) d\Omega = 1$; M – загальна чисельність людей в області Ω .

Оцінка групового (популяційного) ризику характеризує рівень потенційної небезпеки в точці (r, φ) , з врахуванням розподілу реципієнтів ризику по області ураження Ω . Оцінка відповідає ймовірності ураження реципієнта ризику в результаті z -ої аварії в точці (r, φ) .

Рівень аварійної небезпеки, який пов'язаний з конкретною аварією та віднесений до деякої території, характеризується інтегральною оцінкою умовного аварійного ризику $W_L^z(\Omega)$ та інтегральною оцінкою умовного аварійного групового ризику $W_G^z(\Omega)$:

$$W_L^z(\Omega) = \int_{\Omega} W^z(r, \varphi) d\Omega, \quad (7)$$

$$W_G^z(\Omega) = \int_{\Omega} W_g^z(r, \varphi) d\Omega \quad (8)$$

В окремому випадку область інтегрування $(r, \varphi) \in \Omega$ може включати всю область ураження.

Оцінка $W_L^z(\Omega)$ характеризує прогнозовані наслідки конкретної аварії на території Ω . Її значення не залежить від розподілу населення по зоні ураження Ω , а визначається іманентними характеристиками об'єкта та аварії. І в цьому змісті оцінка зазвичай використовується для співставлення наслідків аварій різних типів, різних техногенних об'єктів відносно їх рівнів небезпеки.

Оцінка $W_G^z(\Omega)$ відповідає прогнозованому числу уражених реципієнтів ризику при конкретній аварії на території, що виділена за певною ознакою. Наприклад, цією оцінкою можна характеризувати рівень потенційної небезпеки від конкретної аварії в межах населеного пункту. Дану величину можна інтерпретувати як прогнозовану кількість жертв в населеному пункті при конкретній аварії на об'єкті.

Перетворення оцінок умовного ризику W в оцінки ризику R , у відповідності з (2), здійснюється сумуванням оцінок умовного ризику з відповідними ваговими множниками. Сумування розповсюджується на оцінки умовного ризику за всіма можливими аваріями чи за аваріями визначеного типу. В практичних розрахунках враховуються тільки найбільш зачущі за наслідками аварії.

Важливою характеристикою рівня небезпеки, яка породжується об'єктом, є максимальне число летальних результатів. Характеристика може відноситись до певної аварії N_{let}^z та в цілому до об'єкту N_{let} :

$$N_{let}^z = \max_{\Omega} \int M\psi(r, \varphi) U(r, \varphi, d_i, t, \alpha, V, T) d\Omega, \quad (9)$$

$$N_{let} = \max\{N_{let}^z\}. \quad (10)$$

Кліматичні параметри у виразі (9) відповідають максимальному ефекту ураження. В окремому випадку, для хімічної аварії, якщо під областю Ω розуміється територія населеного пункту, то напрямок вектора швидкості вітру відповідає напрямку від об'єкта до населеного пункту. Решта кліматичних параметрів знаходяться з розв'язання задачі пошуку максимальної кількості уражених реципієнтів ризику в області Ω .

Загальна схема прогнозування рівня небезпеки

Як впливає з визначення оцінок ризику, рівень небезпеки визначається частотним фактором аварійного процесу та величиною збитку, нанесеного реципієнту ризику при аварії. Частотний фактор можна визначити через добуток ймовірностей власне аварійного процесу та реалізації умов, в яких розвивається аварійний процес, якщо умови впливають на наслідки. Наприклад, наслідки хімічної аварії зазвичай залежать від кліматичних характеристик (напрямку вектора швидкості вітру, температури і т.д.). Тому в частотний фактор одним із співмножників входить ймовірність того, що напрямок вітру відповідає напрямку від місця аварії до точки знаходження реципієнта ризику.

У випадку аварії на об'єкті можливі різні види впливу на реципієнтів ризику. Кожен вплив породжує певну величину збитку. В загальному випадку, аварія призводить до комбінованого впливу на реципієнтів ризику. Збиток від комбінованого впливу не дорівнює сумі збитків від складових впливу. Тому виділяють області, в яких домінує той чи інший вплив, та збиток розраховують від домінуючого впливу.

Зв'язок між рівнем впливу та величиною збитку зазвичай визначають із експериментальних даних. Наприклад, для багатьох токсичних речовин відома експериментально встановлена залежність між величиною токсичної дози, яка отримується реципієнтом ризику, та рівнем ураження (ймовірністю загибелі). У випадку баричного впливу використовують зв'язок між ймовірністю ураження та величиною надлишкового тиску на фронті ударної хвилі і т.д. В свою чергу, рівень впливу на реципієнта ризику в деякій точці простору розраховують на основі математичних моделей переносу маси, енергії та імпульсу від місця аварії до точки знаходження реципієнта ризику. Початкові значення цих факторів, які впливають на реципієнтів ризику, випливають з результатів моделювання аварійного процесу. Загальна схема прогнозування оцінок аварійного ризику включає:

1. Математичне моделювання аварійного процесу, в результаті якого розраховують характеристики джерел небезпеки (значення маси, енергії, імпульсу, несанкціоноване вивільнення яких є суттю аварійного процесу) [1].

2. Математичне моделювання розповсюдження аварійного впливу (моделювання переносу маси, енергії, імпульсу від місця аварії до точки знаходження реципієнта ризику). Наприклад, у випадку хімічної аварії – математичне моделювання розповсюдження токсичних речовин в атмосфері. В результаті приходять до польових характеристик (поле токсичних доз), які відповідають величині впливу в кожній точці зони ураження [6].

3. Прогнозування просторово-часових розподілів аварійних впливів на реципієнтів ризику та подальший розрахунок полів збитків. Наприклад, у випадку токсичного впливу це може бути прогнозування поля токсичних доз, які впливають на реципієнтів ризику, та подальший розрахунок полів збитків [7].

4. Розрахунок частотного фактору, який включає: прогнозування ймовірності виникнення аварійних ситуацій; розрахунок частот прояву кліматичних характеристик (таких як напрямок та швидкість вітру, температура, наявність опадів і т.д.); частоту прояву кліматичних характеристик розраховують на основі статистичної обробки матеріалів спостережень за кліматом.

5. Прогнозування полів оцінок аварійного ризику у відповідності з полем збитку та з врахуванням відповідних значень частотного фактору.

Виконання розрахунків за представленою схемою висуває вельми високі вимоги до всіх компонентів системи прогнозування рівня небезпеки: до математичних моделей, до алгоритмів, до програм. Достовірність прогнозування, що вимагається для унікальних та потенційно небезпечних виробництв, висуває високі вимоги до достовірності вихідних даних, до продуктивності обчислювальної системи. Вирішення задачі управління ризиком вимагає на порядок більше ресурсів, ніж вирішення задачі прогнозування ризику. Крім того, необхідно врахувати, що вимоги до достовірності прогнозування мають тенденцію до зростання. У зв'язку з цим, розв'язання задач прогнозування та управління ризиком можливе з використанням проблемно-орієнтованого сервера, який підтримує процес паралельних обчислень.

Прогнозування рівня небезпеки спирається на математичне моделювання переносу субстанції (енергії, маси, імпульсу) в аварійних і поставарійних процесах. Рівняння математичної моделі переводяться в дискретну алгебраїчну форму. Дискретні алгебраїчні рівняння описують розрахункову модель, яка, якщо її перевести в послідовність машинних команд, дає програму моделювання для комп'ютера. Після цього програма та комп'ютер

дозволяють досліджувати еволюцію модельної системи у розрахункових експериментах [6, 7].

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Учебное пособие в 6 книгах. Книга 6 / [под ред. В.А. Котляревского]. – М. : Изд-во АСВ, 2003. – 406 с.
2. Алымов В.Т. Техногенный риск: Анализ и оценка : [учебное пособие для вузов] // В.Т. Алымов, Н.П. Тарасова. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 118 с.
3. Каменева І.П. Методи визначення екологічного ризику за атмосферним фактором / І.П. Каменева, О.О. Попов, А.В. Яцишин, В.О. Артемчук // Моделювання та інформаційні технології. – К. – 2009. – Вип. 53. – С. 23–32.
4. Лисиченко Г.В. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління / Г.В. Лисиченко, Ю.Л. Забулонов, Г.А. Хміль. – К. Наук. думка, 2008. – 542 с.
5. Попов О.О. Визначення зони впливу потенційно небезпечного енергетичного об'єкту / О.О. Попов // Матеріали XXVIII Щорічної науково-технічної конференції „Моделювання”, 15-16 січня 2009 р. : тези допов. – К. : ПІМЕ ім. Г.Є Пухова НАН України, 2009. – С. 48–50.
6. Попов О.О. Математичне моделювання розповсюдження техногенного забруднення від підприємств паливної енергетики / О.О. Попов // Збірник наукових праць ПІМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – К. – 2009. – Вип. 51. – С. 73–84.
7. Яцишин А.В. Комп'ютерні засоби прогнозування техногенних навантажень на атмосферу / А.В. Яцишин, О.О. Попов, В.О. Артемчук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – К. – 2009. – Вип. 5/2 (41). – С. 33–36.
8. Яцишин А.В. Методы и технологии анализа рисков для здоровья на основе данных мониторинга / А.В. Яцишин, І.П. Каменева, В.О. Артемчук, О.О. Попов // Материалы IV Международной научно-технической конференции «МОДЕЛИРОВАНИЕ-2012», Киев, 16-18 мая 2012 г. – С. 469–473.

Попов А.А.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙНОГО РИСКА

Рассматриваются методы оценки аварийного риска для окружающей среды и здоровья населения от техногенных объектов. Рассмотрены вопросы определения величины ущерба от аварии на потенциально опасном объекте. Приведена общая схема прогнозирования оценок аварийного риска.

Popov A.

PREDICTION THE EMERGENCY RISK

This paper reviews methods for assessing the emergency risk for the environment and public health from the technogenic objects. The questions of determining the amount of damages from the accident at the potentially dangerous object are considered. An overview of predicting the emergency risk assessments is presented.