

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНІКА

УДК 658.383:621.391:681.518

Р. Риахи;

Ю. А. Безносик, к. т. н., доц.;

Л. Н. Бугаева, к. т. н., доц.;

Г. А. Статюха, д. т. н., проф.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ И ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Разработана методология оценки составного риска различной экологической деятельности и источников загрязнения. Оценка риска вычисляется как произведение степени риска r и степени значимости i . Оба фактора r и i выражены 11-уровневым масштабом качества, который определен в треугольных нечетких числах (TFN). Для группировки элементов риска была разработана модель составного риска трехступенчатой иерархической структуры. Для группировки использовался метод анализа иерархии (МАИ). Разработанная методология применяется к исследованию составного экологического риска производства серной кислоты. Предложенный подход реализован в пакете Fuzzy Logic Toolbox среды MatLab.

Введение

Риск — это один из возможных способов выражения неопределенности при оценке поведения системы. В последнее время, риск оценивается как в технических, так и экономических задачах. Большинство методик оценивает скалярный или однокомпонентный риск. В то время при выборе альтернатив, следует учитывать разные риски. Т. е. каждой альтернативе в реальном мире может быть сопоставлен многокомпонентный или векторный риск. Причем для большей части его компонентов трудно выбрать числовую меру. Когда система включает разные элементы риска с неопределенными источниками и величинами, то ее часто нельзя обработать математически точно, что характерно особенно на начальной фазе принятия решения.

Традиционно риск некоторого исхода определяют как произведение его вероятности на его величину. В большинстве технических задач, информация о вероятностях элементов риска может быть задана с высокой степенью неопределенности, поэтому на наш взгляд целесообразно использовать нечеткий подход. Этот подход доказал свою эффективность в информационных технологиях, управлении, оценке экологических ситуаций и во многих других приложениях. При оценке величин элементов риска, риск можно рассматривать в терминах лингвистических переменных: «очень высокий», «высокий», «очень низкий», «низкий» и т. д. Теория нечетких множеств эффективно справляется с этим типом неопределенности, и лингвистические переменные могут использоваться в ходе экспертного оценивания.

Основная цель представленного исследования состоит в разработке иерархической модели сложного экологического риска технологического производства и определении величины этого риска. Предлагаемая методика оценки использует нечеткое экспертное оценивание и метод анализа иерархий. В этом исследовании, значение риска определялось двумя факторами: его степенью r и важностью i . Каждый из этих факторов на этапе фаззификации описывался соответствующей лингвистической переменной с треугольными функциями принадлежности (TFN). Для определения риска при заданных степени и важности элемента риска на этапе дефаззификации использовался центроидный метод [1, 2]. Затем была разработана собственно иерархическая модель многокомпонентного риска. Для определения приоритетов (весов) разных элементов риска использовался метод анализа иерархии (МАИ) [3]. Предложенная трехступенчатая процедура оценки агрегированного показателя риска была реализована в программной системе и апробирована при оценке риска нескольких вариантов схемы производства серной кислоты.

Постановка задачі

Елементи ризику можуть бути розділені на різні якісні або лінгвістичні класи. Однією тільки якісною класифікацією, яка описує ступінь ризику, недостатньо для пояснення впливу елементів ризику, оскільки важливість (значимість) елементів ризику — також ключовий елемент в визначенні величини складного ризику в повному експлуатаційному циклі системи. В [4, 5] запропоновано систему ранжування з 11 рівнями, по якій можуть бути класифіковані ступінь і значимість ризику. Кожен якісний рівень $N = 1, 2, \dots, 11$ (і для ступеня, і для значимості ризику) можна розглядати як значення лінгвістичної змінної, яке може бути виражено трикутним нечітким числом (*TFN*). Щоб визначити ризик заданої ступеня і значимості, ці два фактори повинні бути перемножені

$$\text{Ризик} = \text{ступінь ризику} \times \text{значимість ризику}.$$

Для визначення добутку ступеня і значимості використовується нечітка математика. Добуток двох *TFN* — також нечітке число. На етапі дефазифікації для отримання значення ризику використовується центроїдний метод [6], де:

$$g(r, i) = \int_a^b x \mu_{N_r \otimes N_i}(x) dx / \int_a^b \mu_{N_r \otimes N_i}(x) dx. \quad (1)$$

Запропонована методологія представляє трьохетапну процедуру, яка використовує теорію нечітких множин і ієрархічний аналіз, щоб оцінити складний або кумулятивний екологічний ризик на різних рівнях.

Отримані результати

Методологія була застосована для оцінки ризику виробництва серної кислоти контактним методом з використанням як сировини колчедана, який сжигают в печах з киплячим шаром. Модель складного ризику включає екологічні ризики і ризики для людського здоров'я. В результаті аналізу виробництва серної кислоти, складу сировини і наявності в ній різних домішок, складу і характеру викидів даного виробництва, а також шляхів впливу на навколишнє середовище і людину, була побудована ієрархічна структура складного екологічного ризику цього виробництва. Кінцевий складний ризик включає два головні елементи — екологічний ризик (X_1) і ризик для людського здоров'я (X_2) на другому рівні елементів ризику. Кожен елемент другого рівня ділиться на два елементи першого рівня, наприклад, екологічний ризик розділений на еко-токсикологічний ризик (X_{11}) і еко-матеріальний ризик (X_{12}), і аналогічно ризик для здоров'я людини розділений на токсикологічний (X_{21}) і (X_{22}) пов'язаний з безпекою ризик. Елементи першого рівня розділені на основні елементи ризику, наприклад, еко-токсикологічний ризик розділений на екологічний ризик, пов'язаний з газовими викидами оксидів сірки і аерозолями серної кислоти (X_{111}), пов'язаний з важкими металами (X_{112}) і іншими викидами (X_{113}). Еко-матеріальний ризик розділений на забруднення водойм (X_{121}), придушення росту і загибель рослинності (X_{122}), пожегоопасну природу відходів, які можуть викликати дихальні захворювання (X_{123}) і загрозою територій твердим відходом (X_{124}). Так же елемент токсичності для людського здоров'я на першому рівні розділений на три основні елементи ризику: токсичність випарів сернистого ангідриду (X_{211}), канцерогенне вплив випарів і пилу, в склад яких входять важкі метали (X_{212}) і потрапляння токсичних речовин в організм людини через їжу (X_{213}). Ризик для людського здоров'я, пов'язаний з проблемами безпеки, розділений на аварійні викиди (X_{221}), нормальний режим експлуатації (X_{222}), руйнування конструкцій і підвищення корозійного зносу металів (X_{223}). Кожному елементу ризику присвоюється вага, який обчислюється з використанням МАІ. Ваги елементів ризику визначаються з матриць парних порівнянь. Парні порівняння елементів ризику на кожному рівні ієрархії розміщуються в обернено-симетричній матриці [4]. Для нашої моделі було складено сім обернено-симетричних матриць парних порівнянь. Парно порівнювалися елементи ризику нижчого рівня ієрархії за силою впливу на елемент ризику вищого рівня ієрархії. Потім для отриманих матриць був визначений власний вектор з найбільшим власним значенням. Ваги, отримані з допомогою МАІ, наведені в табл. 1.

Весы, полученные методом анализа иерархии из векторов приоритетов

Определение	W3(k)	W2(k, j)	W1(k, j, i)	Значение
Экологический риск	W3(1)			0,3333
Эко-токсикологический риск		W2(1,1)		0,6000
SO ₂ , SO ₃ , аэрозоли H ₂ SO ₄			W1(1,1,1)	0,5357
Тяжелые металлы			W1(1,1,2)	0,3572
Другие выбросы			W1(1,1,3)	0,1071
Эко-материальный риск		W2(1,2)		0,4000
Загрязнение водоемов			W1(1,2,1)	0,4546
Подавление роста и гибель растительности			W1(1,2,2)	0,3031
Частицы, вызывающие респираторные заболевания			W1(1,2,3)	0,1514
Загромождение территорий твердым огарком			W1(1,2,4)	0,0909
Человеческий риск	W3(2)			0,6667
Токсикологическое влияние на человека		W2(2,1)		0,6000
Испарения сернистого ангидрида			W1(2,1,1)	0,5526
Канцерогенное влияние частиц			W1(2,1,2)	0,0791
Попадание токсичных веществ в организм			W1(2,1,3)	0,3683
Связанный с безопасностью человеческого здоровья		W2(2,2)		0,4000
Аварийные выбросы			W1(2,2,1)	0,2225
Нормальный режим эксплуатации			W1(2,2,2)	0,4411
Разрушение конструкций вследствие коррозии			W1(2,2,3)	0,3364

Оценка сложного риска была выполнена с использованием трехступенчатой процедуры. Оценки критериев риска являются лингвистическими переменными $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$, и L_7 . Эти лингвистические переменные были определены как «чрезвычайно низкий», «очень низкий», «низкий», «нормальный», «высокий», «очень высокий» и «чрезвычайно высокий», соответственно. Этим лингвистическим переменным присвоены TFN со следующими функциями принадлежности:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= (0, 0, 1/6); & \mu_{L_1}(x) &= \begin{cases} 1 - 6x, & 0 \leq x < \frac{1}{6}; \\ 0, & 0,1 \leq x \leq 1; \end{cases} \\
 L_n &= ((n - 2)/6, (n - 1)/6, n/6); & \mu_{L_n}(x) &= \begin{cases} 0, & 0 \leq x < \frac{n-2}{6}; \\ 6x - (n - 2), & \frac{n-2}{6} \leq x < \frac{n-1}{6}; \\ n - 6x, & \frac{n-1}{6} \leq x \leq \frac{n}{6}, \\ 0, & \frac{n}{6} \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (2) \\
 & & & (n = 2, 3, 4, 5, 6) \\
 L_7 &= (5/6, 1, 1); & \mu_{L_7}(x) &= \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq \frac{5}{6}; \\ 6x - 5, & \frac{5}{6} \leq x \leq 1. \end{cases}
 \end{aligned}$$

Центры масс (центроиды) вышеупомянутых семи качественных шкал в восходящем порядке — $L_G(1) = 0,056, L_G(2) = 0,167, L_G(3) = 0,333, L_G(4) = 0,500, L_G(5) = 0,667, L_G(6) = 0,834$ и $L_G(7) = 0,944$, соответственно. Пусть $L_n = \{L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7\}$ — набор значений, ранжирующих риск по каждому элементу. Матрица нечеткой оценки для элементов риска первого уровня может быть установлена для X_{11}, X_{12}, X_{21} и X_{22} . Например, для $X_{kj} = X_{11}$, включаемые элементы риска — X_{111}, X_{112} и X_{113} и соответствующие оценки риска — $g(r_{111}, i_{111}), g(r_{112}, i_{112}), g(r_{113}, i_{113})$. Величина каждого $g(r_{kji}, i_{kji})$ была оценена по иерархической модели составного экологического риска технологического производства, а затем использовалась для оценки $L(r_{kji}, i_{kji}, n)$ (где $n = 1, 2, \dots, 7$). Таким образом, матрицу нечеткой оценки $F(X_{11})$ можно формировать следующим образом:

$$F(X_{1i}) = \begin{vmatrix} L(r_{11i}, i_{11i}, 1)L(r_{11i}, i_{11i}, 2) \dots L(r_{11i}, i_{11i}, 7) \\ L(r_{112}, i_{112}, 1)L(r_{112}, i_{112}, 2) \dots L(r_{112}, i_{112}, 7) \\ L(r_{113}, i_{113}, 1)L(r_{113}, i_{113}, 2) \dots L(r_{113}, i_{113}, 7) \end{vmatrix} \begin{matrix} X_{111} \\ X_{112} \\ X_{113} \end{matrix} \quad (3)$$

Точно так же матрицы нечеткой оценки $F(X_{12})$, $F(X_{21})$ и $F(X_{22})$ можно формировать для соответствующих элементов X_{12} , X_{21} и X_{22} . Теперь составная оценка экологического риска первой стадии может быть получена для элемента X_{11} следующим образом:

$$[S(1, 1, 1), \dots, S(1, 1, 7)]_{1 \times 7} = [W1(1, 1, 1), W1(1, 1, 2), w1(1, 1, 3)]_{1 \times 3} \times F(X_{11})_{3 \times 7}, \quad (4)$$

где

$$S(1, 1, n) = \sum_{i=1}^3 W1(1, 1, i) \times L(r_{11i}, i_{11i}, n), \quad n = 1, 2, \dots, 7. \quad (5)$$

Поэтому, $S1(1, 1) = [S(1, 1, 1), S(1, 1, 2), \dots, S(1, 1, 7)]$ может быть обозначен как вектор составного экологического риска первой стадии для элемента X_{11} . Аналогично $S1(1, 2)$, $S1(2, 1)$, и $S1(2, 2)$ — векторы составного экологического риска первой стадии для элементов первого уровня, X_{12} , X_{21} и X_{22} , соответственно. Оценки на второй и на третьей стадии выполняются аналогично.

Оценка конечного составного экологического риска (X) может быть дефаззифицирована методом центриды:

$$\text{конечный составной риск} = R = \sum_{n=1}^7 L_G(n) \times S3(n). \quad (6)$$

Предложенный метод программно реализован в среде Matlab с использованием пакета Fuzzy Logic ToolBox.

Для рассматриваемого примера были получены результаты, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Получение оценки сложного экологического риска

Элемент риска	Элементы	$g(r, i)$	$W1()$	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7
X_{111}	$F(X_{111})$	0,4250	0,5357	0	0	0,4500	0,5500	0	0	0
X_{112}	$F(X_{112})$	0,3050	0,3572	0	0,1700	0,8300	0	0	0	0
X_{113}	$F(X_{113})$	0,0650	0,1071	0,6100	0,3900	0	0	0	0	0
X_{121}	$F(X_{121})$	0,1250	0,4546	0,2500	0,7500	0	0	0	0	0
X_{122}	$F(X_{122})$	0,0650	0,3031	0,6100	0,3900	0	0	0	0	0
X_{123}	$F(X_{123})$	0,0250	0,1514	0,8500	0,1500	0	0	0	0	0
X_{124}	$F(X_{124})$	0,0650	0,0909	0,6100	0,3900	0	0	0	0	0
X_{211}	$F(X_{211})$	0,1850	0,5526	0	0,8900	0,1100	0	0	0	0
X_{212}	$F(X_{212})$	0,0350	0,0791	0,7900	0,2100	0	0	0	0	0
X_{213}	$F(X_{213})$	0,2550	0,3683	0	0,4700	0,5300	0	0	0	0
X_{221}	$F(X_{221})$	0,0850	0,2225	0,4900	0,5100	0	0	0	0	0
X_{222}	$F(X_{222})$	0,1550	0,4411	0,0700	0,9300	0	0	0	0	0
X_{223}	$F(X_{223})$	0,1250	0,3364	0,2500	0,7500	0	0	0	0	0
Уровень I	Элементы	—	$W2()$	$S1(k, j, 1)$	$S1(k, j, 2)$	$S1(k, j, 3)$	$S1(k, j, 4)$	$S1(k, j, 5)$	$S1(k, j, 6)$	$S1(k, j, 7)$
X_{11}	$S1(1, 1, n)$	—	0,600	0,0653	0,1025	0,5375	0,2946	0,0000	0,0000	0,0000
X_{12}	$S1(1, 2, n)$	—	0,400	0,4827	0,5173	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
X_{21}	$S1(2, 1, n)$	—	0,600	0,0625	0,6815	0,2560	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
X_{22}	$S1(2, 2, n)$	—	0,400	0,2240	0,7760	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Уровень II	Элементы	—	$W3()$	$S2(k, 1)$	$S2(k, 2)$	$S2(k, 3)$	$S2(k, 4)$	$S2(k, 5)$	$S2(k, 6)$	$S2(k, 7)$
X_1	$S2(1, n)$	—	0,333	0,2323	0,2684	0,3225	0,1768	0,0000	0,0000	0,0000
X_2	$S2(2, n)$	—	0,667	0,1271	0,7193	0,1536	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Сложный риск	Элементы	—	—	$S3(1)$	$S3(2)$	$S3(3)$	$S3(4)$	$S3(5)$	$S3(6)$	$S3(7)$
X	$S3(n)$	—	—	0,1621	0,5690	0,2099	0,0589	0	0	0
Центроиды	$L_G(n)$	—	—	0,0552	0,1667	0,3333	0,5000	0,6667	0,8333	0,9448
Риск	R	0,2032	—	—	—	—	—	—	—	—

Выводы

Разработана методология определения сложного риска при разных источниках и путях влияния на экологию, которая легко адаптируется для любого технологического процесса. Оценка риска была определена как произведение степени риска (r) и значимости (i). Факторы риска r и i были разложены по многоуровневой, качественной схеме масштабирования. Качественные уровни риска были выражены треугольными нечеткими числами. Разработана трехуровневая модель сложного риска. При группировке элементов риска оценка весов компонентов риска производилась с использованием метода анализа иерархий.

В рассмотренном случае были использованы только риски окружающей среды: экологические и человеческие. Аналогичным образом в иерархическую структуру модели сложного риска могут быть включены экономические, технические, социальные и другие риски, что расширит границы применения подхода и его практическую значимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 167 с.
2. Yager R. A general class of fuzzy connectives // Fuzzy Sets and Systems. — 1980. — N. 4. — P. 235—242.
3. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
4. Статюха Г. О., Безносик Ю. О., Бугаева Л. М. Інтелектуальні системи прийняття рішень при дослідженні та проектуванні хіміко-технологічних процесів. — К.: Політехніка, 2004. — 416 с.
5. Lee H. M. Applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development // Fuzzy Sets and Systems. — 1996. — V. 79. — P. 323—336.
6. Sadiq R., Husain T. A fuzzy methodology for an aggregative environmental risk assessment: a case study of drilling waste. Environmental Modelling & Software. — 2005. — N 20. — P. 33—46.

Риахи Реза — аспирант; *Безносик Юрий Александрович* — доцент; *Бугаева Людмила Николаевна* — доцент; *Статюха Геннадий Алексеевич* — заведующий кафедрой.

Кафедра кибернетики химико-технологических процессов, Национальный технический университет «Киевский политехнический институт»