

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 фазификации описывался соответствующей лингвистической переменной с треугольными функциями принадлежности (TFN). Для определения риска при заданных степени и важности элемента риска на этапе дефазификации 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 задачи

Элементы риска могут быть разделены на разные качественные или лингвистические классы. Одной только качественной классификации, которая описывает степень риска, недостаточно для объяснения влияния элементов риска, поскольку важность (значимость) элементов риска — также ключевой элемент в определении величины сложного риска в полном эксплуатационном цикле системы. В [4, 5] предложено систему ранжирования с 11 уровнями, по которой могут быть классифицированы степень и значимость риска. Каждый качественный уровень $N = 1, 2, \dots, 11$ (и для степени, и для значимости риска) можно рассматривать как значение лингвистической переменной, которое может быть выражено треугольным нечетким числом (TFN). Чтобы определить риск заданной степени и значимости, эти два фактора должны быть перемножены

$$\text{Риск} = \text{степень риска} \times \text{значимость риска}.$$

Для определения произведения степени и значимости используется нечеткая математика. Произведение двух TFN — также нечеткое число. На этапе дефаззификации для получения значения риска используется центроидный метод [6], где:

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

Предложенная методология представляет трехшаговую процедуру, которая использует теорию нечетких множеств и иерархический анализ, чтобы оценить сложный или кумулятивный экологический риск на разных уровнях.

Полученные результаты

Методология была применена для оценки риска производства серной кислоты контактным методом с использованием в качестве сырья колчедана, который сжигают в печах с кипящим слоем. Модель сложного риска включает экологические риски и риски для человеческого здоровья. В результате анализа производства серной кислоты, состава сырья и наличия в нем разных примесей, состава и характера выбросов данного производств, а также путей влияния на окружающую среду и человека, была построена иерархическая структура сложного экологического риска этого производств. Конечный сложный риск включает два главных элемента — экологический риск (X_1) и риск для человеческого здоровья (X_2) на втором уровне элементов риска. Каждый элемент второго уровня делится на два элемента первого уровня, например, экологический риск разделен на эко-токсикологический риск (X_{11}) и эко-материальный риск (X_{12}), и аналогично риск для здоровья человека разделен на токсикологический (X_{21}) и (X_{22}) связанный с безопасностью риск. Элементы первого уровня разделены на основные элементы риска, например, эко-токсикологический риск разделен на экологический риск, связанный с газовыми выбросами оксидов серы и аэрозолями серной кислоты (X_{111}), связанный с тяжелыми металлами (X_{112}) и другими выбросами (X_{113}). Эко-материальный риск разделен на загрязнение водоемов (X_{121}), подавление роста и гибель растительности (X_{122}), пылевидную природу отходов, которые могут вызвать дыхательные заболевания (X_{123}) и загромождения территорий твердым огарком (X_{124}). Так же элемент токсичности для человеческого здоровья на первом уровне разделен на три основных элемента риска: токсичность испарений сернистого ангидрида (X_{211}), канцерогенное влияние испарений и пыли, в состав которых входят тяжелые металлы (X_{212}) и попадание токсичных веществ в организм человека через пищевые продукты (X_{213}). Риск для человеческого здоровья, связанный с проблемами безопасности, разделен на аварийные выбросы (X_{221}), нормальный режим эксплуатации (X_{222}), разрушение конструкций и повышение коррозионного износа металлов (X_{223}). Каждому элементу риска назначаются вес, который вычисляются с использованием МАИ. Веса элементов риска определяются из матриц парных сравнений. Парные сравнения элементов риска на каждом уровне иерархии размещаются в обратносимметричной матрице [4]. Для нашей модели было составлено семь обратносимметричных матриц парных сравнений. Парно сравнивались элементы риска низшего уровня иерархии по силе влияния на элемент риска высшего уровня иерархии. Потом для полученных матриц

был определен собственный вектор с наибольшим собственным значением. Веса, полученные с помощью МАИ, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Веса, 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 $L(r_{kjb}, i_{kjb}, n)$ (где $n = 1, 2, \dots, 7$). Таким образом, матрицу нечеткой оценки $F(X_{11})$ можно формировать следующим образом:

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

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 центроиды:

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

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»