

**А.Н. СЕРЕБРОВСКИЙ**

## **ПОДХОД К СОЗДАНИЮ БАЗЫ ЗНАНИЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ, ПРОГНОЗА И АНАЛИЗА СИТУАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ**

---

**Abstract:** *It is proposed the approach for creating knowledge base of the hybrid expert systems of the assessment and analysis on the objects "Storage of explosive things" type. These expert systems are intended for support of making decisions on prevention of possible fires and explosions.*

**Key words:** *knowledge base, cause factors, hybrid expert system of hazard assessment.*

**Анотація:** *Пропонується підхід до створення баз знань гібридних експертних систем оцінки, аналізу ситуацій на об'єктах типу "Сховища вибухонебезпечних предметів". Дані експертні системи призначені для підтримки прийняття рішень щодо запобігання можливих пожеж і вибухів.*

**Ключові слова:** *база знань, причинні фактори, гібридна експертна система оцінки небезпеки.*

**Аннотация:** *Предлагается подход к созданию баз знаний гибридных экспертных систем оценки, анализа ситуаций на объектах типа «Хранилище взрывоопасных предметов». Данные экспертные системы предназначены для поддержки принятия решений по предотвращению возможных пожаров и взрывов.*

**Ключевые слова:** *база знаний, причинные факторы, гибридная экспертная система оценки опасности.*

### **1. Введение**

Повышение безопасности хранилищ взрывоопасных предметов (ХВП) остается актуальной проблемой, о чем неопровержимо свидетельствуют взрывы в Артемовске, Новобогдановке, Лозовой. Необходимыми предпосылками успешного и своевременного предотвращения пожаров и взрывов являются отслеживание текущих ситуаций на ХВП; оценка степени их безопасности; прогнозирование возможности возникновения опасных событий, приводящих к пожару и взрыву; анализ причин возникновения ситуаций; оперативное принятие решений по предотвращению опасных событий. Традиционным эффективным средством решения этих задач являются автоматизированные системы анализа и прогноза риска, теоретической основой которых есть вероятностный анализ безопасности (ВАБ) [1–3]. Однако практика применения этой основы оставляет нерешенными многие проблемы, вызванные объективными трудностями формализации процессов зарождения техногенной опасности на объектах типа ХВП.

Одним из подходов, которые позволят решить задачи предотвращения опасных событий, является создание гибридных экспертных систем, расширяющих возможности традиционных систем анализа и прогноза риска, в которых применяется сочетание математических моделей (аналитических или статических) с неформализованными знаниями, полученными от экспертов. В данной работе рассматривается один из возможных подходов создания Базы знаний гибридной экспертной системы оценки и анализа ситуаций на объектах типа "Хранилище взрывоопасных предметов". Подобные экспертные системы предназначены для поддержки принятия решений по предотвращению возможных пожаров и взрывов на объектах повышенной опасности.

### **2. Структура и режимы гибридной экспертной системы (ГЭС) оценки и анализа ситуаций на объектах типа ХВП**

Минимальный комплекс ГЭС состоит из базы данных (БД), базы знаний (БЗ), компонента приобретения знаний, компонента обновления данных о текущих ситуациях (мониторинг) и решателя (интерпретатора).

База данных предназначена для хранения исходных данных о текущих ситуациях, возникающих на объектах типа ХВП. База знаний предназначена для долгосрочных данных, описывающих причинные факторы опасности и их влияния на возможные ситуации на объектах типа ХВП. Компонент приобретения знаний автоматизирует процесс наполнения ГЭС знаниями, осуществляемый пользователем-экспертом, совместно с инженером по знаниям. Решатель, используя исходные данные о конкретных ситуациях и знаниях о причинных факторах опасности и их влияниях на нее, решает задачи оценки опасности, анализа и выработки вариантов решений по предотвращению пожаров и взрывов на объектах типа ХВП. ГЭС работает в двух режимах: приобретения знаний и решения задач (называемый также режимом консультации или режимом использования ГЭС).

В режиме приобретения знаний эксперт и инженер по знаниям, используя компонент приобретения знаний, формирует долгосрочные данные следующих типов:

- знания о событиях, возможных на ХВП, и логических связях между ними;
- знания о причинных факторах опасности, их относительной роли и влиянии на возникновение нежелательных событий;
- знания о диагностических шкалах, которые используются для интерфейса между конечным пользователем и экспертной системой;
- знания о возможных вариантах решений предотвращения развития техногенной опасности и связях между ситуациями, возможными на ХВП, и вариантами решений.

В режиме использования ГЭС решаются задачи:

- мониторинга ситуаций на ХВП;
- оценки степени опасности ситуаций, возникающих на ХВП;
- анализа возникших ситуаций для выявления наиболее значимых причинных факторов опасности и наиболее вероятных опасных событий;
- подбор вариантов решений предотвращения опасности, наиболее релевантных для возникшей ситуации.

В данной работе предлагается подход к созданию первых двух разделов БЗ (из указанного перечня). Остальные разделы ГЭС будут рассмотрены в дальнейших работах.

### **3. Знания об опасных событиях и их связях**

Эксперт, формируя БЗ, исходит из требования о необходимости описания всех событий, которые в той или иной степени могут влиять на возникновение пожаров и взрывов на ХВП. В этом отношении накоплен значительный фактический материал, сконцентрированный в виде справочных источников и ГОСТов [4–6]. На этом этапе эксперт, по сути, заимствует готовые знания для применения к объектам типа ХВП.

Связи между событиями описываются с помощью моделей Дерева событий (ДС) и Дерева отказов (ДО). В модели ДС пожар (взрыв) рассматривается как заключительное (конечное) событие в цепочке предшествующих событий, одно из которых считается иницирующим (исходное событие), а другие – поддерживающими или превентирующими развитие опасности (промежуточные события). ДС описывает взаимосвязь между исходными и промежуточными

событиями, с одной стороны, и конечными событиями, пожар (взрыв), с другой. ДС может быть представлено совокупностью возможных цепочек событий от исходного к одному из конечных, некоторые из которых, являются пожарами (взрывами). Для большого класса процессов развития техногенной опасности можно допустить, что развитие опасности описывается марковским процессом [7]. Тогда вероятность цепочки событий, приводящей к пожару, определяется выражением

$$P(\Pi) = P(A_0) \prod_{i=1}^n P_{A_{i-1}}(A_i), \quad (1)$$

где  $P(\Pi)$  – вероятность пожара (взрыва);

$P(A_0)$  – вероятность исходного события цепочки;

$P_{A_{i-1}}(A_i)$  – условная вероятность промежуточного события  $A_i$  при условии выполнения предшествующего события цепочки.

Модель ДО устанавливает связь между нежелательными элементарными (базисными) событиями, с одной стороны, и опасным (верхним) событием, с другой. Верхними событиями ДО могут быть исходные или промежуточные события ДС, а также пожар и взрыв. Базисные события (БС) соединены в ДО логическими операциями, формирующими промежуточные элементы ДО. Самый верхний по уровню иерархии промежуточный логический элемент ДО представляет собой верхнее событие ДО.

Оценку вероятности возникновения верхнего события ДО можно вычислить, используя правила булевой алгебры:

$$A = S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_k, \quad (2)$$

$$S_g = a_{g_1} \cap a_{g_2} \cap \dots \cap a_{g_l}, \quad (3)$$

где  $A$  – верхнее событие ДО;

$S_g$  ( $g = 1, \dots, k$ ) – минимальные сечения БС. (Минимальное сечение – комбинация наименьшего числа БС, достаточных для возникновения верхнего события ДО);

$a_{g_l}$  ( $l = 1, \dots, l_g$ ) – базисные события, входящие в сечение  $S_g$ .

Вероятность возникновения верхнего события ДО определяется выражением [8]

$$P(A) = \sum_{g=1}^k \prod_{l=1}^{l_g} P(a_{g_l}). \quad (4)$$

Модели ДО и ДС являются основными моделями ВАБ.

Задачами эксперта и инженера по знаниям является выявление связей между верхними и базисными событиями ДО, между исходными и конечными событиями ДС. Результат формируется в виде графических представлений ДО и ДС на бумаге. Роль компоненты приобретения знаний – реализовать интерфейс, с помощью которого графические образы ДО и ДС получают внутреннее представление в БЗ.

После ввода в БЗ модели ДО и ДС могут отображаться на дисплее и редактироваться [1]. Наконец, после окончательного ввода ДО и ДС в БЗ автоматически создается дизъюнктивно-нормальная форма этих моделей [9], которая также сохраняется в БЗ.

#### **4. Знания о причинных факторах, влияющих на вероятность возникновения нежелательных событий, приводящих к пожарам и взрывам**

Выделяются следующие классы факторов, влияющих на пожаровзрывоопасность на ХВП [10]:

- техническое состояние инженерных и технологических сооружений, технических средств, используемых при погрузочных работах, транспортировке, пожаротушении, охране ХВП;
- состояние пожаровзрывоопасных предметов и материалов, а также тары, используемой при их хранении;
- факторы, характеризующие технологию хранения;
- факторы, причиной которых является персонал ("человеческий фактор") [12];
- внешние факторы.

Общее количество факторов, не считая человеческого фактора, превышает 50 [11].

Задачей эксперта является: окончательно установить перечень факторов, влияющих на пожаровзрывоопасность и сделать описание возможных значений факторов [13].

Роль компонента приобретения значений сводится к автоматизации загрузки следующих сведений:

- возможных значений качественных факторов (термы значений и соответствующие им оценки в баллах);
- границ диапазонов, на которые разбиты возможные значения количественных факторов и соответствующие им оценки в баллах;
- описаний термов (или диапазонов), соответствующих нормальному и критическому значениям фактора.

#### **5. Знания об относительной роли (значимости) факторов в возникновении пожара (взрыва)**

Рассмотрим следующие возможные случаи:

- в распоряжении эксперта имеется статистика, в которой отображено участие причинного фактора в возникновении пожара (взрыва);
- отсутствуют статистические сведения об участии фактора в возникновении пожара (взрыва).

В первом случае задача эксперта и инженера по знаниям состоит в сборе для каждого фактора  $X_i$  статистических данных по частоте пожаров при наличии фактора ( $F^1(1)$ ) и частоте пожаров при его отсутствии ( $F^1(0)$ ).

Далее включается компонент приобретения знаний, который выполняет:

- расчет показателя значимости по Бирнбауму [7]:

$$Z^i = F^1(1) - F^1(0), \quad i = \overline{1, n}; \quad (5)$$

– нормирование показателей значимости по Бирнбауму (получение относительных значимостей):

$$V_i = Z^i : \sum_{i=1}^n Z^i ; \quad (6)$$

– возвращение на экран эксперта полученных проранжированных относительных значимостей факторов  $V_i$ ;

– загрузку полученных относительных значимостей в БЗ (по указанию эксперта).

В случае отсутствия статистики о роли фактора при пожаре имеются две возможности для действия эксперта:

– установить "прямые" экспертные оценки значимостей факторов, ориентируясь на свой опыт;

– применить "гибридную" технологию.

"Гибридная" технология в данном случае представляет собой следующие действия.

Эксперт проводит парные сравнения факторов по критерию их участия в возникновении пожара по правилам Метода анализа иерархий [14].

Результатом является матрица парных сравнений. На этом участие эксперта заканчивается.

Роль компоненты приобретения знаний на данном шаге сводится к следующему:

– организация диалога с экспертом при вводе им матрицы парных сравнений (МПС);

– автоматическая проверка степени несогласованности МПС, которая может возникнуть вследствие противоречивости оценок эксперта;

– возвращение эксперту или инженеру по знаниям на экран несогласованной МПС для оперативной корректировки и поддержки диалога с экспертом до получения полностью согласованной МПС;

– решение задачи определения собственных значений МПС (результат –  $C_1, C_2, \dots, C_n$ );

– расчет относительных значимостей факторов:

$$V_i = C_i : \sum_{i=1}^n C_i , \quad (7)$$

где  $n$  – число факторов;

– возвращение на экран эксперта полученных проранжированных значимостей факторов;

– загрузка полученных значимостей в БЗ (по указанию эксперта).

## 6. Знания о влиянии факторов на возникновение БС

Влияние факторов на вероятность БС описывается с помощью функций влияния (ФВ) [15]. ФВ фактора на БС есть соответствие между возможными значениями фактора и условными вероятностями возникновения БС при условии, что все остальные факторы принимают значения своих норм.

Сформировать ФВ фактора  $X_j$  на БС "а" означает установить для каждого возможного значения  $x(t)$  фактора  $X_j$  определенную оценку вероятности возникновения БС "а" в ситуации,

когда  $X_j = x_i$ , а все остальные факторы принимают значения своих норм. Источниками формирования ФВ являются:

- данные статистики;
- результаты испытаний, обработанные с помощью моделей отказов [16,17];
- экспертные оценки.

Формирование ФВ имеет свои проблемы:

– во многих случаях данных статистики о вероятностях БС недостаточно для формирования ФВ по всему спектру значений факторов;

– модели отказов используются только в случаях, когда БС являются отказами технических элементов и узлов. Кроме того, не всегда реально можно проводить испытания при всех интересующих значениях факторов;

– эксперты, даже квалифицированные в предметной области и хорошо знающие проблему, часто затрудняются в установлении конкретных оценок вероятностей БС, хотя достаточно уверенно делают сравнительные оценки возможностей возникновения БС при различных отдельных значениях фактора.

В работе [15] предлагается подход приобретения знаний о ФВ, основанный на комбинированном использовании указанных выше источников и Метода анализа иерархий (МАИ) [14].

#### *Постановка задачи*

Рассмотрим один из факторов  $X \in \{X_j\}$ , возможные значения которого  $\{x_i\}$  ( $i = \overline{1, n}$ ). Допустим, что априори известно значение ФВ фактора  $X$  при  $X = x_1$ . Обозначим его  $f(x_1)$ . Стоит задача: определить все остальные значения ФВ фактора  $X$ , используя мнение эксперта о сравнительной эффективности влияния фактора  $X$  при его различных значениях.

Эксперт выполняет попарные сравнения значений фактора  $X$  по критерию степени его влияния на вероятность БС « $a$ » [14].

Результатом всех парных сравнений является матрица парных сравнений (МПС). В МПС могут содержаться противоречивые экспертные оценки, т.е. внутренняя несогласованность. После того, как МПС составлена, она проверяется на согласованность аналогично тому, как это описано в п. 5.

Полученная МПС обладает тем свойством, что ее собственный вектор характеризует приоритетность (по своему влиянию на БС « $a$ ») возможных значений фактора  $X$ . Вычисление собственного вектора МПС выполняется по стандартным алгоритмам линейной алгебры.

Обозначим компоненты вычисленного вектора  $\eta_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ). Каждая компонента характеризует приоритетность соответствующего значения фактора  $X$  по критерию влияния на возникновение БС « $a$ ».

Логично сделать предположение: вероятность возникновения БС « $a$ » под влиянием фактора  $X$  (при прочих равных условиях) пропорциональна приоритету влияния фактического значения фактора  $X$ . Покажем это на примере. Допустим, что вычислены приоритеты возможных

значений фактора  $X: \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ . Выберем два различных значения фактора  $X: x_\alpha$  и  $x_\beta (1 \leq \alpha, \beta \leq n)$ . Тогда вероятность БС « $a$ » при  $X = x_\beta$  будет больше вероятности БС « $a$ » при  $X = x_\alpha$  во столько раз, во сколько приоритет  $\eta_\beta$  больше  $\eta_\alpha$ , т.е.

$$P_{X=x_\beta}(a) = P_{X=x_\alpha}(a) * \frac{\eta_\beta}{\eta_\alpha} . \quad (8)$$

В частности, при  $\alpha = 1, \beta = i$

$$P_{X=x_i}(a) = P_{X=x_1}(a) * \frac{\eta_i}{\eta_1} . \quad (9)$$

В терминах функций влияния выражение (9) имеет вид

$$f(x_i) = f(x_1) * \frac{\eta_i}{\eta_1} . \quad (10)$$

Последнее выражение позволяет сформировать ФВ для всех значений фактора  $X$ , основываясь при этом на одном априорно известном значении  $f(x_1)$ , которое назовем “опорным” значением (ОЗ). Таким образом, мы решили поставленную задачу.

Существенной особенностью ОЗ является то, что оно не обязательно должно соответствовать нормальному значению фактора. При установлении ОЗ следует исходить из требования: “Опорное значение функции влияния должно быть максимально достоверным среди всех ее значений”. Например, если из данных статистики вероятность возникновения некоторого БС более достоверна при критическом значении фактора  $X$ , чем при нормальном, то в качестве ОЗ следует принимать вероятность БС при критическом значении фактора  $X$ .

Таким образом, описанный процесс приобретения знаний о влиянии причинных факторов на вероятности возникновения БС представляет собой сочетание следующих типов процедур:

а) оценка относительной важности отдельных значений факторов по критерию влияния на вероятность возникновения различных БС, результатом которых являются матрицы парных сравнений;

б) проверка согласованности матриц парных сравнений;

в) расчет собственных векторов матриц;

г) установление опорных значений функций влияния;

д) вычисление значений функций влияния согласно выражению (10).

Процедура “а” реализуется экспертом, использующим диалоговый интерфейс ввода и корректировки МПС.

Процедура “б” выполняется по четким вычислительным алгоритмам [14].

Процедура «в» выполняется по стандартным алгоритмам линейной алгебры.

Процедуры “г” включают в себя те же средства, которые используются для определения оценок вероятностей БС, а именно: использование данных статистики, модели отказов и экспертные оценки. Для каждого сочетания (БС, фактор) достаточно установить только одно ОЗ с тем, чтобы затем по описанной технологии определить все остальные значения ФВ. Подобная БЗ

дает возможность вычислить оценки вероятностей БС, возникающих под одновременным влиянием совокупности независимых факторов [18].

Таким образом, для каждой пары (фактор  $X_j$ , БС " $a^r$ ") в БЗ формируются  $n_j$  кортежей следующего вида:

$$(r, j, x_i, f_j^r(x_i)), \quad (11)$$

где  $r \in \{R\}$  – множество индексов БС;

$j \in \{J\}$  – множество индексов факторов, влияющих на БС;

$n_j$  – количество возможных значений фактора  $X_j$ ;

$x_i$  – одно из возможных значений  $X_j$ ;

$f_j^r(x_i)$  – значение функции влияния фактора  $X_j$  на БС " $a^r$ ", когда  $X_j = x_i$ .

## 7. Заключение

Предложен подход создания базы знаний (БЗ) гибридной экспертной системы (ЭС), оценивающей вероятности возникновения элементарных нежелательных событий (базисных событий).

БЗ содержит знания о причинных факторах опасности и об их влиянии на вероятности возникновения базисных событий.

Приобретение знаний носит гибридный характер и состоит из различного типа процедур: экспертных оценок относительной важности отдельных значений причинных факторов; вычислительных процедур расчета собственных векторов матриц парных сравнений, установления опорных значений функций влияния с использованием моделей отказов и статистических данных.

Значение предлагаемого подхода:

– гибридная технология снижает трудоемкость формирования БЗ за счет частичного перекладывания функций эксперта и инженера по знаниям (при формировании оценок о влиянии причинных факторов на вероятности возникновения базисных событий) на программный компонент приобретения знаний;

– повышает достоверность приобретаемых знаний за счет того, что парные сравнения, которые делает эксперт, выполняются под контролем программного компонента приобретения знаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Integrated Reliability and Risk Analysis System (IRRAS). Basic Training Course /NRC/-Washington. – 1995. – 720 p.
2. Швыряев Ю.В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций // Методика выполнения. – М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1992. – 264 с.
3. Хенли Э.Дж., Куамото Х. Надежность технических систем и оценка риска / Под ред. В.С. Сыромятникова. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
4. Справочник. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. – М., 1987. – 280 с.
5. ГОСТ 12.1.044. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – Введ. 01.01.91; Переизд. 01.01.96. <http://www.fireman.ru/bd/gost/12-1-044-89/12-1-044.html>.
6. ДСТУ 2272-93. Пожежна безпека. Терміни та визначення. ССБТ. – Введ. 15.02.09. – 8 с.
7. Вероятностный анализ безопасности атомных станций (ВАБ) / В.В. Бегун, О.В. Горбунов, И.Н. Каденко и др. – К.: НТУУ "КПИ", 2000. – 568 с.



8. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно сложных систем. – СПб.: Изд-во «Политехника», 2000. – 248 с.
9. Серебровский А.Н., Ситниченко Л.П., Пилипенко В.Г. Алгоритм формирования и минимизация логического представления дерева отказов // Математичні машини і системи. – 2009. – № 1. – С. 165 – 172.
10. Кузьменко Г.Є., Хомініч В.С. До питання управління безпекою військових об'єктів підвищеної небезпеки // Математичні машини і системи. – 2008. – № 3. – С. 131 – 140.
11. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. – Введ. 01.07.92.  
<http://www.fireman.ru/bd/gost/12-1-004/12-1-004.html>
12. David I. Gertman, Harold S. Blakman Human Reliability And Safety Analysis Data Handbook. – N-Y., 1995.
13. Серебровский А.Н. Экспертные системы оперативной оценки техногенной опасности // Математичні машини і системи. – 2007. – № 3. – С.139 – 144.
14. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 305 с.
15. Серебровский А.Н. Метод анализа иерархий при создании базы знаний экспертных систем техногенной опасности // Математичні машини і системи. – 2008. – № 3. – С. 62 – 67.
16. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
17. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Введ. 05.12.97. – 45 с.
18. Серебровский А.Н. О формировании баз знаний экспертных систем оценки техногенной опасности // VIII-я Международная конференция «Интеллектуальный анализ информации». – Киев, 2008. – С. 422 – 430.

*Стаття надійшла до редакції 10.03.2009*