

## ПРОЦЕДУРА ПЕРЕДАЧИ ЗНАНИЙ В СФЕРЕ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОТ ЭКСПЕРТА В КОМПЬЮТЕРНУЮ ПРОГРАММУ

Н.С. Попов, Н.В. Лузгачева, А. Хайри

*Кафедра «Природопользование и защита окружающей среды»,  
ГОУ ВПО «ТГТУ»; agape86@mail.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гапановой*

**Ключевые слова и фразы:** формализация знаний; функция принадлежности; экспертиза безопасности; экспертная система.

**Аннотация:** Предложена процедура передачи знаний экспертов в базу знаний компьютерной экспертной системы. Введены понятия объектов экспертизы и их категорий. Предложены алгоритмы построения функций принадлежности для объектов различных категорий. Обоснована связь функции принадлежности и штрафной функции за факторы опасности при экспертизе промышленных предприятий. Приведены примеры из руководства компании Dow Chemical, подтверждающие работоспособность процедуры.

---

Экспертные системы (ЭС) относятся к классу интеллектуальных компьютерных систем, способных осуществлять мыслительные операции в функциональных областях знаний, производить логически обоснованные выводы и заключения по задачам, не имеющим четких алгоритмов решений. Ядром ЭС являются знания – совокупность сведений и фактов, способных поддерживать логику задач анализа и синтеза, возникающих в процессе принятия решений. Знания ЭС могут приобретаться различными путями, каждый из которых предусматривает перенос компетентности от некоторого информационного источника в программу [1–4].

Традиционный способ передачи знаний от специалистов к ученикам связан с затратами времени и средств на их обучение и практическую стажировку. Нахождение эффективных способов получения знаний от экспертов и придание им формы, удобной для обработки на компьютере, оказывается крайне важной задачей, поскольку ее решение позволяет существенно удешевить и воспроизводство знаний, и их применение в ЭС [5].

Особую сложность процесс передачи знаний приобретает в тех случаях, когда речь идет о «гуманитарных» и сопоставимых с ними системах, характеризующихся нечеткими переменными состояниями. К ним можно отнести и системы техногенной безопасности, оперирующие не только количественными значениями параметров, но и качественными – уровнями шума, запаха, тумана, вибраций и т.п. [6]. Для человеческого мозга работа с такими системами, в которых фигурируют нечеткие (лингвистические) переменные, вполне органична. Каким же образом мозг человека воспринимает и обрабатывает нечеткую информацию, а на ее основе принимает решения – на сегодня вопрос открытый. Данный феномен чаще всего объясняют наличием у человека интуиции и опыта, позволяющих фильтро-

вать малоценную информацию, различать качественные изменения в ситуациях и производить сложные логические построения в пользу правильных, в целом, вариантов решений.

В случаях переноса знаний от экспертов в ЭС конструкторы пытаются выстраивать такие алгоритмы, которые способны организовывать и детализировать смысл лингвистических переменных, вплоть до фиксации отдельных значений и форм.

На рис. 1 представлены четыре возможных источника получения знаний: общедоступных – из справочников, учебников и научной литературы; системных – методом имитационного испытания адекватных математических моделей; специализированных – на основе проведения научных экспериментов с объектами исследования; индивидуальных – получаемых от экспертов.

Неоспоримо то, что все названные источники информации имеют собственное значение при разработке ЭС, однако, наибольший интерес представляют знания, получаемые от экспертов – то есть профессионалов в интересующей сфере деятельности, постоянно оценивающих и классифицирующих поступающую информацию и использующих свои способы интерпретации знаний. В этой связи цели данной работы связаны с процедурой переноса знаний от эксперта в компьютерную программу ЭС с помощью функций принадлежности.

Процедуру считывания знаний формализуем следующим образом. Введем нечеткое подмножество  $X$  переменных  $x_i$  (объектов экспертизы) в интересующей области знаний  $X$ . Состав объектов и их число определяет конструктор или инженер по знаниям из функциональной области работы ЭС. Относительно  $x_i$  первоначально известно мало информации. В основном это могут быть понятия и определения, а также некоторые простейшие свойства. Подмножество  $X$ , в общем случае, является бесконечномерным, однако, в некоторых практических ситуациях будем считать его состоящим из конечного числа объектов, поскольку экспертиза всегда предполагает существенные затраты времени и средств.

Объекты  $x_i$  на начало экспертизы рассматриваются как лингвистические, но в результате ее проведения могут оказаться и четко определенными. Будем различать четыре категории объектов  $x^v$ :

–  $v = 1$ : «точечные» лингвистические переменные  $x^1$ , характеризующие свойства системы в категориях цветности, запаха, звука, концентрации, давления, температуры и т.д. Такие переменные необходимы для описания, например, состояния экосистем, химических реакторов, поведения группы людей и т.п.;

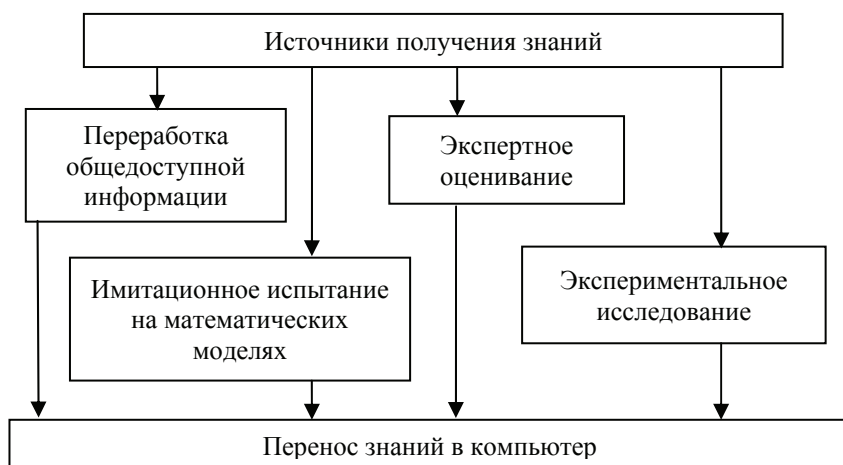


Рис. 1. Возможные способы получения знаний для экспертных систем

–  $v = 2$ : «пространственные» переменные  $x^2(\varepsilon, \xi, \eta)$ , выражающие состояние системы в известных координатах пространства  $\varepsilon, \xi$  и  $\eta$ . Семантика этих объектов может быть такой же, как и для точечных, однако, состояния системы здесь меняются при удалении от «нулевых» значений  $x(\varepsilon_0, \xi_0, \eta_0)$ . Введение пространственных переменных объясняется, например, задачами оценки ущерба или потерь в зонах аварии, имеющей координаты  $\varepsilon_0, \xi_0$  и  $\eta_0$ ;

–  $v = 3$ : «нестационарные» переменные  $x^3(t_j)$ , характеризующие состояния системы в конкретные моменты времени  $t_j, j = \overline{1, m}$ . Семантика этих переменных остается такой же, как и для точечных, но их полезность проявляется в динамических задачах. Например, в анализе процессов неустойчивого поведения реакторов, изменения качества продукции, прочности материалов и т.д.;

–  $v = 4$ : «распределенные» лингвистические переменные  $x^4(\varepsilon, \xi, \eta, t)$ , являющиеся обобщением объектов  $v = 1, 2, 3$ , необходимость введения которых объясняется, например, использованием ГИС-технологий в работе ЭС.

Последовательность экспертизы объектов  $x^v$  приведена на рис. 2. Инженер по знаниям разрабатывает и реализует сценарий интерактивной работы с экспертом (с помощью опросников, интервьюирования, мозгового штурма и других приемов). По этому сценарию все объекты  $I = x_i^v \in X, i = \overline{1, n}$ , последовательно анализируются экспертом в целях сообщения о них полезных для ЭС знаний, например свойств и отношений с другими объектами. По результатам экспертизы выдается заключение, смысловые элементы которого инженер по знаниям формализует в виде, удобном для работы компьютера.

Проиллюстрируем перенос знаний от эксперта в компьютер с помощью функции принадлежности на примерах, характерных для Руководства по классификации индексов взрыво- и пожароопасности, разработанного в компании Dow Chemical [7]. Пусть нечеткое множество  $X = \{(x^v, \mu_x(x^v))\}$  определяется математически как совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов  $x^v$  множества  $X$  и соответствующих степеней принадлежности  $\mu_x(x^v)$ , или непосредственно в виде функции  $\mu_x: X \rightarrow [0, 1]$ . Функция  $\mu_x$  является исчерпывающей характеристикой  $X$ , означающей, что переход от полной принадлежности объекта классу к полной его непринадлежности в общем случае происходит не скачком, а постепенно, и при этом принадлежность выражается числом из интервала  $[0, 1]$ . В частных случаях полной определенности имеем  $\mu_x(x^v) = 0$ , либо  $\mu_x(x^v) = 1$ .

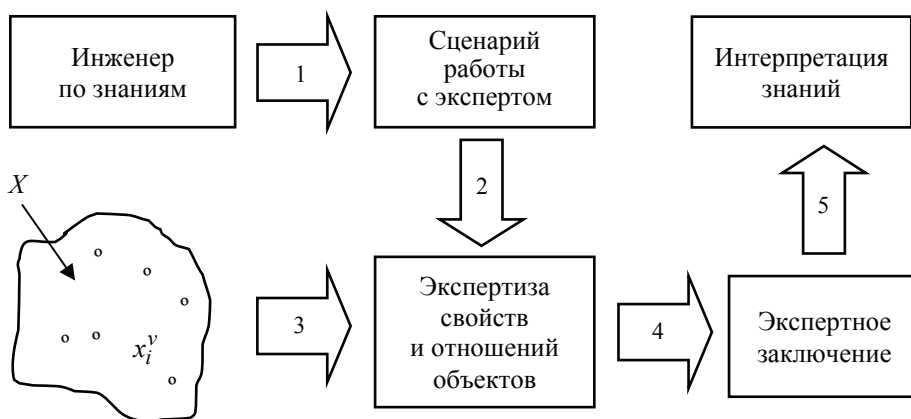


Рис. 2. Организация экспертизы объектов

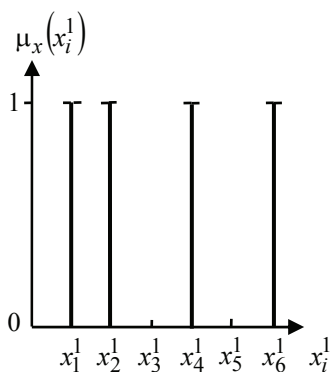
С этих достаточно простых ситуаций и рассмотрим действия эксперта. Будем полагать, что экспертиза проводится либо на этапе проектирования химического производства, либо на этапе проведения аудита безопасности его функционирования. В обеих задачах необходимо прежде всего обеспечить выполнение законов и инструкций, касающихся надежности конструктивных и функциональных элементов производства, для чего заранее составляют опросники (контрольные списки) всех проверяемых элементов и систем. Примером может служить контрольный список мероприятий по предупреждению взрыво- и пожароопасности на химических объектах [7], по сути своей и образующий подмножество  $X$ .

Эксперты компании оценивают безопасность химического производства по 12 категориям, среди которых: размещение, устройство пожарной защиты, электроснабжение, канализация, складирование материалов, заполнение зон инертным газом и др. По всем  $i$ -м объектам каждой категории эксперт оценивает достаточность предполагаемых мер защиты. Так для категории «пожарная защита» проверяется наличие гидрантов, клапанов, огнетушителей, систем сигнализации и другого оборудования. Результаты экспертизы в этом случае протоколируются в бинарном варианте «есть»/«нет» или «удовлетворительно»/«неудовлетворительно».

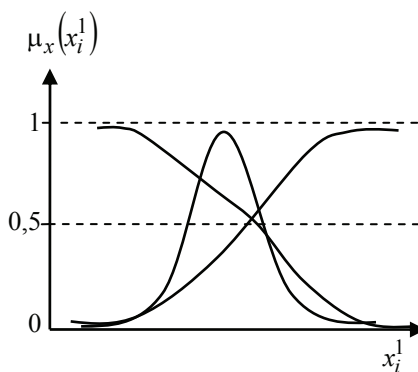
На рис. 3 показаны «результаты» экспертизы некоторых обязательных пожарозащитных мероприятий. Однозначная удовлетворенность эксперта наличием (или рабочим состоянием) объектов  $x_i^1$  и приводит к значениям  $\mu_x(x_i^1) = 1$  для номеров  $i = 1, 2, 4, 6$ , тогда как неудовлетворенность – к значениям  $\mu_x(x_i^1) = 0$ ,  $i = 3, 5$ .

Для нечеткого объекта ситуация существенно усложняется. Рассматривая количественные или качественные значения  $x_i^v$ ,  $v = 1$ , эксперт определяет – какие из  $i$ -х значений условно сказать «хорошие», а какие «плохие». Интерпретация таких размытых представлений об объекте  $x_i^1$  возможна с помощью функций  $\mu_x$  конкретного вида, способных не только выразить мнение эксперта относительно нечеткости  $x_i^1$ , но и перенести это мнение в компьютерную программу ЭС. Примеры таких функций приведены на рис. 4.

Обычно значениям  $\mu_x$  в работах по теории размытых множеств [8, 9] не придают физического смысла, так как он в практических приложениях всегда индивидуален. В некоторых задачах теории безопасности  $\mu_x$  полезно рассматривать и



**Рис. 3. Оценка состояния системы пожарной безопасности по  $i$  объектам  $x_i^1$  контрольного списка**



**Рис. 4. Примеры функций принадлежности нечетких объектов классу**

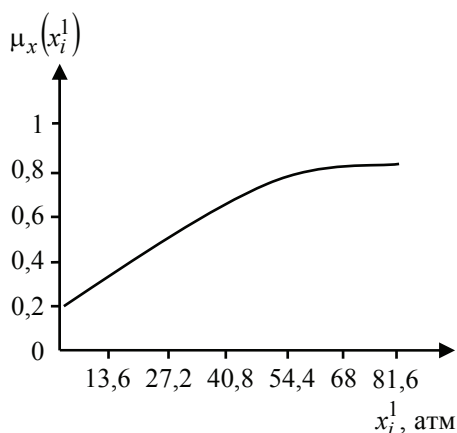


Рис. 5. Штрафная функция за превышение атмосферного давления  $x_i^1$

с позиций «штрафной функции» за принадлежность или непринадлежность  $x^v$  рассматриваемому классу. Для «хороших» значений эксперт устанавливает незначительный штраф (а значит  $\mu_x \rightarrow 0$ ), тогда как для «плохих» он его увеличивает (и в этом случае  $\mu_x \rightarrow 1$ ). При этом эксперт подразумевает, что «хорошие» значения в отличие от «плохих» не способствуют развитию аварийной ситуации. Полезность двойственной трактовки  $\mu_x$  в следующем: формализация нечеткости на основе функции принадлежности предполагает использование алгебры нечетких множеств, тогда как рассмотрение  $\mu_x$  с позиции штрафной функции

допускает использование традиционных математических операций, свойственных упорядоченным четким множествам.

В работе [7] штрафная функция за увеличение давления в аппарате свыше атмосферного соответствует виду на рис. 5. Аналогичную форму имеют и штрафные функции за наличие конкретных объемов горючих твердых, жидких и газообразных веществ в хранилищах. В ходе проведения экспертизы специалисты могут прийти к заключению о необходимости рассмотрения не одного, а нескольких вариантов ситуации, что означает введение семейства функций  $\mu_x$ . В такой ситуации вместо нечеткого подмножества  $X$  будем рассматривать подмножество  $X^\alpha = \{x, \mu_x^\alpha(x), \alpha\}$ , состоящее из упорядоченных троек: элементов  $x$  универсального множества  $X$ , соответствующей степени принадлежности  $\mu_x^\alpha(x)$  и параметра  $\alpha$ , от которого зависит выбор функции принадлежности.

Данную ситуацию можно отождествить с примером оценки возможного ущерба производству в результате аварийного высвобождения определенного количества энергии  $x_i$  из аппарата, где параметром  $\alpha$  является показатель опасности той или иной единицы технологического оборудования [7]. В этом примере  $\mu_x$  приобретает смысл функции потерь. Иллюстрация семейства  $\mu_x^\alpha$  дана на рис. 6.

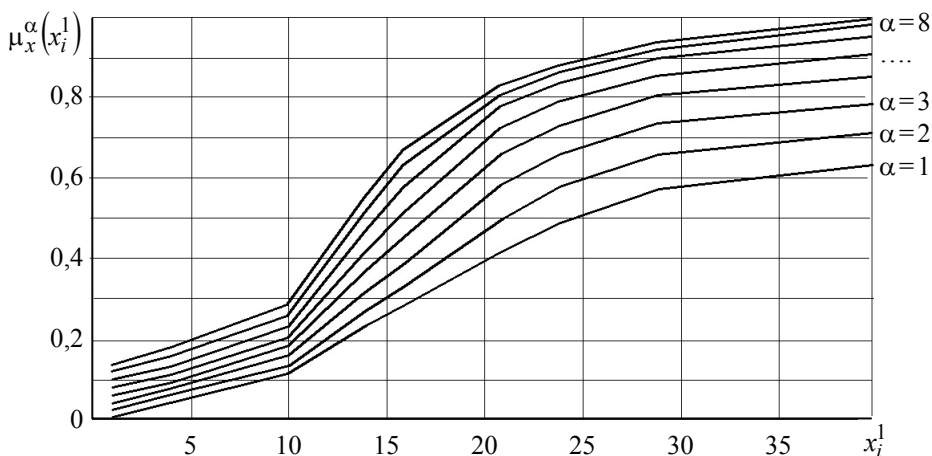


Рис. 6. Семейство функций  $\mu_x^\alpha$  как результат проведения экспертизы

Если эксперт испытывает недостаток знаний об объекте  $x_i^v$ , это может привести к необходимости рассмотрения вероятностно-нечеткого множества, определяемого рандомизированной функцией принадлежности  $\hat{\mu}_x : X \times \Omega \rightarrow [0, 1]$ , где  $\Omega$  – вероятностное пространство [10]. Таким образом удастся учитывать наличие случайной погрешности при экспертном оценивании функции принадлежности, хотя при этом возникает задача проверки заключений эксперта на статистическую устойчивость.

В работе [7] множество подобных ситуаций связано с назначением штрафных коэффициентов за наличие в технологических процессах экзо- и эндотермических реакций токсичных веществ, за возможность взрыва пыли, разгерметизации оборудования и т.п.

Примеры рандомизированных функций принадлежности  $\hat{\mu}_x$  показаны на рис. 7.

Для объектов  $x^v$ ,  $v=2$ , функция принадлежности зависит от пространственных координат. Примером такой функции в [7] является штрафная функция за использование в технологических процессах пожароопасного оборудования. Расстояние  $x_i^2$  от вероятного места утечки горючего вещества до точки всасывания его с воздухом в пожароопасное оборудование эксперты оценили штрафными функциями  $\mu_x$ , показанными на рис. 8, где кривая 1 характерна для высвобождения горючего вещества с температурой, равной точке вспышки, а кривая 2 – выше его точки кипения.

Для решения задач безопасности производства на этапе его функционирования используются объекты  $x^v$ ,  $v=3$ , функция принадлежности которых (штрафа) зависит от времени. В качестве  $x^3$  могут рассматриваться: концентрация, температура, давление и другие переменные состояния технологического процесса. Задавая форму  $\mu_x$ , эксперт штрафует скорость изменения  $x_i^3$  за дискретный промежуток

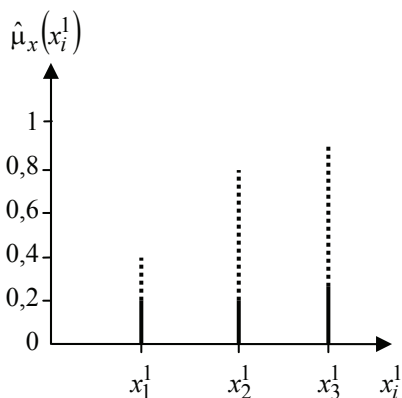


Рис. 7. Функции принадлежности  $\mu_x$  для объектов:

- $x_1^1$  – эндотермической реакции;
- $x_2^1$  – токсичных материалов;
- $x_3^1$  – опасных единиц оборудования.
- ..... – диапазоны погрешностей

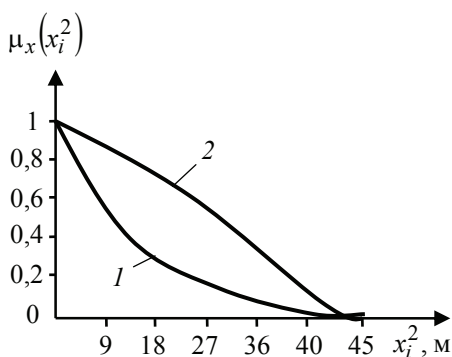


Рис. 8. Штрафная функция  $\mu_x(x_i^2)$  за появление утечки на  $i$ -м расстоянии от пожароопасного оборудования

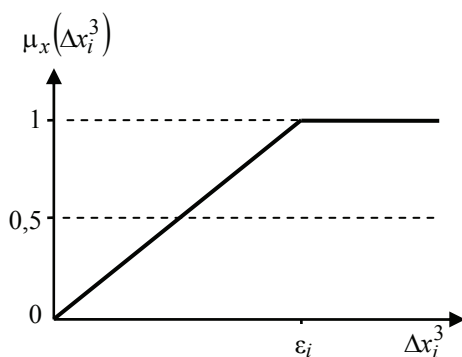


Рис. 9. Функция  $\mu_x$  для контроля за динамикой процессов

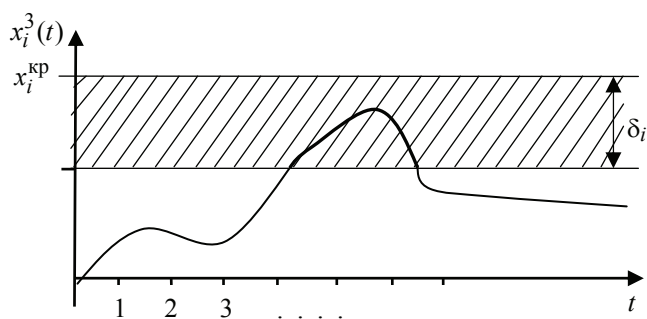


Рис. 10. Штраф за критический уровень изменений

времени. Обозначим  $\Delta x_i^3 = \max_t |x_i^3(t+1) - x_i^3(t)|$ ,  $t = 0, 1, 2, \dots$ . Если  $\Delta x_i^3(t+1) \leq \varepsilon_i$ , где  $\varepsilon_i$  – допустимый пошаговый уровень изменений, то значения  $\mu_x(x_i^3)$  могут быть описаны линейной функцией. В противном случае возможная скорость изменения переменной  $x_i^3$  опасно велика, и штраф  $\mu_x(x_i^3) = 1$ . Аналитическая функция принадлежности имеет вид

$$\mu_x(x_i^3) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon_i} \Delta x_i^3, & \text{при } \Delta x_i^3 < \varepsilon_i; \\ 1, & \text{при } \Delta x_i^3 \geq \varepsilon_i. \end{cases}$$

Пример такой функции показан на рис. 9.

Критический уровень значения переменной  $x_i^3$  определяется условием  $|x_i^3(t) - x_i^{\text{кр}}(0)| \leq \delta_i$ , где  $\delta_i$  – допустимый запас отклонения  $x_i^3$  от критического (аварийного) значения  $x_i^{\text{кр}}$ . Если такое опасное отклонение возможно, то  $\mu_x(x_i^3) = 1$  (рис. 10).

Основываясь на вышеизложенном, процедуру передачи знаний от эксперта в компьютерную программу ЭС формализуем следующим образом:

- 1) вводится класс объектов  $x_i^v \in X$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;
- 2) определяется категория объектов  $v = 1, 2, 3, 4$ ;
- 3) организуется процедура ознакомления эксперта с объектами  $x^v$  в соответствии со сценарием;
- 4) оформляется протокол экспертизы;
- 5) выбирается вид функции принадлежности  $\mu_x$ , адекватный результатам экспертизы;
- 6) разрабатывается алгоритм обработки приобретенных знаний.

Данная процедура была использована при разработке экспертной системы оценки взрыво- и пожароопасности химических производств [11].

#### Список литературы

1. Построение экспертных систем : пер. с англ. / под ред. Ф. Хейеса-Рота, Д. Уотермана, Д. Лената. – М. : Мир, 1987. – 441 с.
2. Уотерман, Д. Руководство по экспертным системам : пер. с англ. / Д. Уотерман. – М. : Мир, 1989. – 388 с.



3. Попов, Э.В. Экспертные системы : Решение неформализованных задач в диалоге в ЭВМ / Э.В. Попов. – М. : Наука, 1987. – 288 с.
4. Элти, Дж. Экспертные системы: концепции и примеры / пер. с англ. и предисл. Б.И. Шитикова / Дж. Элти, М. Кумбс. – М. : Финансы и статистика, 1987. – 191 с.
5. Левин, Р. Практическое введение в технологию искусственного интеллекта и экспертных систем с иллюстрациями на Бейсике / Р. Левин, Д. Дранг, Б. Эделсон. – М. : Финансы и статистика, 1990. – 239 с.
6. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Человеческий фактор в проблемах безопасности / науч. рук. изд. К.В. Фролов, Н.А. Махутов. – М. : Знание, 2008. – 688 с.
7. Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide / American Institute of Chemical Engineers. – 7th edn. – New York : Wiley-AIChE, 1994. – 83 p.
8. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. – М. : Наука, 1986. – 312 с.
9. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / под ред. Р.Р. Ягера. – М. : Радио и связь, 1986. – 408 с.
10. Hirota K. Concepts of Probabilistic Sets / K. Hirota // Proc. of IEEE Conference on Decision and Control, 1977. – P. 1361–1366.
11. Попов, Н.С. Оценка уровня пожаро- и взрывоопасности промышленных объектов. Методика. Программа. Примеры / Н.С. Попов, В.А. Лузгачев, Н.В. Лузгачева // Тамбов ; М. ; СПб. ; Баку ; Вена : Нобелистика, 2009. – 104 с.

---

## **The Procedure of Techno Security Expert Knowledge Transfer into Computer Expert System**

N.S. Popov, N.V. Luzgacheva, A. Khairy

*Department "Nature Management and Environment Protection", TSTU;  
agape86@mail.ru*

**Key words and phrases:** accessory function; expert system; knowledge formalization; safety expert examination.

**Abstract:** The paper proposes a procedure for transferring expert knowledge into the knowledge base of computer expert system. The concepts of expertise of objects and their categories are introduced. The algorithms for constructing accessory functions for different categories of objects are suggested. The connection between accessory function and penalty function for risk factors during the examination of industrial enterprises is substantiated. The examples of the Guide of Dow Chemical, confirming the efficiency of the procedure are given.

---

## **Prozedure der Wissensübergabe in der Sphäre der Technohensicherheit von Expert ins Computerprogramm**

**Zusammenfassung:** Es ist die Prozedure der Wissensübergabe der Experte in die Wissensbank des Computerexpertensystems vorgeschlagen. Es sind die Begriffe der Objekten der Expertise und ihrer Kategorien eingeführt. Es sind die Algorithmen des Baues der Funktionen der Zugehörigkeit für die Objekten der verschiedenen Kategorien



vorgeschlagen. Es ist die Verbindung der Funktion der Zugehörigkeit und der Strafenfunktion für die Faktoren der Gefahr bei der Expertise der industriellen Betriebe begründet. Es sind die Beispiele aus der Verwaltung der Dow Chemical Gesellschaft, die Arbeitsfähigkeit der Prozedure bestätigen, angeführt.

---

### **Procédure du transfert des connaissances dans la sphère de la sécurité technogène de l'expert dans un programme informatique**

**Résumé:** Est proposée la procédure du transfert des connaissances des experts dans la base de connaissances du système expert informatique. Sont introduites les notions des objets de l'expertise et de ses catégories. Sont proposés les algorithmes de la construction des fonctions de l'appartenance pour les objets de différentes catégories. Est argumenté le lien de la fonction de l'appartenance et de celle d'amende pour les facteurs de la sécurité lors de l'expertise des entreprises industrielles. Sont cités les exemples de la Direction de la compagnie Dow Chemical confirmant la capacité de travail de la procédure.

---

**Авторы:** *Попов Николай Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Природопользование и защита окружающей среды»; *Лузгачева Надежда Валерьевна* – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; *Хайри Абухали* – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность», декан факультета «Международное образование», ГОУ ВПО «ТГТУ».

---