

УДК 004.89:614.841.4

**О.Н. Землянский**, магистр, Акад. пожарной безопасности им. Героев Чернобыля, г. Черкасы,  
**В.Е. Снитюк**, д-р техн. наук, доц., Черкасский гос. технол. ун-т

## **ПРИНЦИПЫ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ БАЗИС РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

*О.М. Землянський, В.Є. Снитюк. Принципи і елементний базис реалізації технологій прогнозування надзвичайних ситуацій в умовах невизначеності.* Розглянуто проблеми, що супроводжують процеси прийняття рішень при прогнозуванні екологічних та техногенних катастроф. Виконано класифікацію відповідних задач та запропоновано використання технологій “м’яких обчислень” для їх розв’язання. Вказано на необхідність об’єктивізації експертних висновків та застосування ідей і принципів теорії катастроф.

*О.Н. Землянский, В.Е. Снитюк. Принципы и элементный базис реализации технологий прогнозирования чрезвычайных ситуаций в условиях неопределенности.* Рассмотрены проблемы, сопровождающие процессы принятия решений при прогнозировании экологических и техногенных катастроф. Выполнена классификация соответствующих задач и предложено использование технологий “мягких вычислений” для их решения. Указано на необходимость объективизации экспертных выводов и применение идей и принципов теории катастроф.

*O.N. Zemlyanskiy, V.E. Snytyuk. Principles and element basis of forecasting technologies realization for emergency situations in the conditions of uncertainty.* The problems accompanying decision making processes in forecasting of ecological and technogenic accidents are considered. Classification of corresponding problems is executed and use of “Soft Computing” technologies for their solving is offered. The necessity of objective expert conclusions and application of accidents theory ideas and principles are specified.

Индустриализация современного мира, рост техногенной нагруженности современных предприятий, кадровый дефицит, стремление к более высокой норме прибыли, уменьшение внимания к безопасности жизнедеятельности и охране труда являются причинами увеличения количества аварий и катастроф различного характера. Существующая система преодоления по-

следствий техногенных и экологических катастроф, традиционно ограниченная рамками МЧС, функционирует и направлена на борьбу с последствиями чрезвычайных ситуаций. Такая ориентированность зачастую позволяет уменьшить материальный ущерб и в редких случаях предотвратить человеческие жертвы. В ситуациях, когда сложно осуществить управляющее воздействие на первоисточник аварии, существует необходимость прогнозирования аварийных ситуаций и разработки сценариев возможных действий как сотрудников предприятий, так и населения, и аварийно-спасательных служб.

В связи с изложенным актуальными являются задачи, которые на макроуровне можно разделить на три класса. К первому классу относятся задачи прогнозирования развития различного рода процессов, которые в силу определенного стечения обстоятельств могут привести к авариям. Задачи второго класса решаются или имеют непосредственное отношение к моменту возникновения аварии и предполагают определение масштабов аварии, последствий и принятия решений об их преодолении. Определения зоны поражения, концентрации вредных веществ во всей зараженной зоне, осуществление прогноза дальнейших действий составляют основное содержание задач третьего класса.

Каким образом осуществляется решение указанных задач? В первую очередь, применяются таблицы, в которых указаны нормативные значения параметров веществ, составляющих опасность для окружающей среды, вообще, и человека, в частности. Далее на основании разработанных методик и формул рассчитываются площади заражения и концентрации вредных веществ. Важно понимать, что распространение опасных веществ в воде, в воздухе и на почве имеет совершенно разную природу, и для описания соответствующих процессов рационально применять различный математический аппарат.

Таким образом, к недостаткам современных технологий оценки последствий техногенных и экологических катастроф можно отнести:

— отсутствие единого подхода к разработке методологии и практическому внедрению технологий, учитывающих как непрерывную динамику окружающей среды, так и определенный волюнтаризм лица, принимающего решения;

— отсутствие методики предотвращения аварий и катастроф и прогнозирования чрезвычайных событий;

— недостаточное внимание разработке технологий определения зараженности почвы и водного бассейна, а также их взаимозаражения и взаимовлияния;

— отсутствие элементов сценарного анализа [1] и, как следствие, принятие решения по факту аварии в критических условиях, когда лицо, принимающее решения, ощущает всю глубину ответственности и под ее влиянием совершает ошибки.

Если решение принимается коллективом экспертов, то оно, безусловно, более объективно, но необходимо учитывать разноуровневую компетентность лиц, участвующих в этом процессе.

Хотя процессы распространения опасных веществ имеют непрерывный характер, и из-за этого их, чаще всего, описывают дифференциальными уравнениями, необходимо учитывать условия внешней среды. Следствием такого учета будет представление соответствующих процессов дифференциальными уравнениями с гибридными функциями или, из-за сложности решения первых и слабоструктурированности самих процессов, с использованием технологий искусственного интеллекта [2].

Рассмотрим задачи прогнозирования техногенных и экологических катастроф. Без ограничения общности будем считать, что объект, представляющий потенциальный источник опасности, является неподвижным. Обозначим его  $\Omega$ , внутренние процессы  $\Omega-P$ , внешние воздействия —  $Q$ . Таким образом, имеем некоторую информационную модель, на которой показано, что объект  $\Omega$  находится в сфере влияния систем различной природы, в большинстве случаев, имеющих иерархическую структуру и осуществляющих взаимовлияние (рис. 1).

Предположим, что объект  $\Omega$  может быть поврежден или разрушен в результате продолжительного воздействия внутренних, внешних факторов или их композиции. Если это не так, то имеет место случайная авария или катастрофа, вызванная быст-

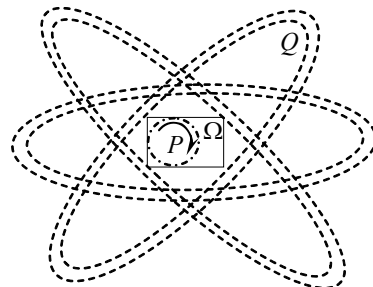


Рис.1. Объект  $\Omega$  и его окружение

рым воздействием другой системы, не имеющей непосредственного отношения к объекту  $\Omega$  и релевантным системам. Обычно такое воздействие имеет механическую природу. Пусть внутренние факторы являются элементами множества  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , внешние воздействия — элементами множества  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ . Очевидно, что количество и факторов, и внешних воздействий значительно больше, но такой состав множеств  $P$  и  $Q$  определяется значимостью их составляющих. Упростим задачу и предположим, что авария или катастрофа возможна при критическом значении одного или нескольких элементов из множества  $Q$ .

В таком случае возникает задача идентификации зависимости

$$K_j = f_j(t, \xi_j), \quad (1)$$

где  $K_j$  — концентрация опасного вещества,

$\xi_j$  — обозначение группы факторов, оказывающих влияние на динамику  $K_j$ ,  $j = \{1, 2, \dots, m\}$ .

Если внешнее воздействие, вызывающее катастрофические последствия, не является единичным, то имеют место задачи определения

$$K_{j_1} \vee K_{j_2} \vee \dots \vee K_{j_k} = K_{кр}^\vee, \quad (2)$$

$$K_{j_1} \wedge K_{j_2} \wedge \dots \wedge K_{j_k} = K_{кр}^\wedge,$$

где

$$K_{кр}^\vee = \max \{K_{j_1}, K_{j_2}, \dots, K_{j_k}\} > K_{кат}, \quad (3)$$

$$K_{кр}^\wedge = \min \{K_{j_1}, K_{j_2}, \dots, K_{j_k}\} < K_{кат},$$

при таких ограничениях

$$\begin{aligned} \max_l K_{j_l} &< K_{max}, \\ \min_l K_{j_l} &> K_{min}, \quad l = \overline{1, k}. \end{aligned} \quad (4)$$

В (4)  $K_{min}$ ,  $K_{max}$  — предельно возможные значения параметров внешней среды. Необходимым условием решения задач (2)...(4) является поиск зависимостей концентрации от времени и воздействующих факторов. Именно зависимости типа (1) позволяют осуществить анализ типа “А если  $t = t^*$  и  $\xi_j \in \Theta_j$ , то  $K_j = K^*$ ”, где  $\Theta_j$  — некоторая область изменения значений факторов. Однако, в подавляющем большинстве случаев получить зависимости (1) и решить задачи (2)...(4) оказывается невозможно. Причинами этого являются отсутствие необходимых данных; влияние факторов, которые априори не принадлежат множеству учитываемых; значительные колебания значений одного из факторов, не позволяющие установить уровень его влияния на степень концентрации опасного вещества и т.п.

В таких случаях было бы полезным учитывать опыт экспертов. Формальный аппарат для исчисления заключений экспертов составляют модели и методы теории нечетких множеств [3, 4]. В нашем случае базовой моделью является система нечетких продукционных правил

$$\text{Если } q_1 \in A_1^1 \ \& \ q_2 \in A_2^1 \ \& \dots \ \& \ q_m \in A_m^1, \text{ то } K_j \in B_j^1,$$

$$\text{иначе, если } q_1 \in A_1^2 \ \& \ q_2 \in A_2^2 \ \& \dots \ \& \ q_m \in A_m^2, \text{ то } K_j \in B_j^2, \quad (5)$$

.....,

$$\text{иначе, если } q_1 \in A_1^M \ \& \ q_2 \in A_2^M \ \& \dots \ \& \ q_m \in A_m^M, \text{ то } K_j \in B_j^M,$$

где  $A_i^l$  — нечеткие множества с соответствующими функциями принадлежности [5, 7, 8],

$$i = \overline{1, m},$$

$$l = \overline{1, v},$$

$\nu$  — количество возможных комбинаций нечетких значений параметров, определяемых экспертами.

Показано, что системой (5) можно как угодно точно приблизить любую непрерывную функцию, если консеквент является аддитивным выражением [6]. Так, если имеет место логический вывод в форме Сугено, то выражение  $K_j \in B_j^d$  приобретает вид  $K_j = z_1^j + z_2^j + \dots + z_{w1}^j$ , где  $z_i^j$  — концентрация опасного вещества, полученного из  $i$ -го источника.

Таким образом, система (5) позволяет осуществить прогнозирование и сценарный анализ, поскольку подставляя значения параметров  $(q_1^0, q_2^0, \dots, q_m^0)$  в (5), получим искомое значение концентрации опасного вещества  $K_j^0$ . Система (5) отображает опыт одного эксперта и результат, получаемый с ее использованием, зачастую является смещенным, представляющим интерес только для предварительного заключения. Для объективизации результатов прогнозирования (5) может быть обобщено. В таком случае система выражений типа (5) представляет выводы коллектива экспертов.

Еще одним аспектом аварий и катастроф является то, что во многих случаях процессы, к ним приводящие, развиваются во времени. Существуют такие моменты времени, после которых катастрофа становится неизбежной. Как пример достаточно представить концентрацию вредных веществ в воде. До определенного уровня она считается допустимой, но превышение этого уровня становится катастрофой и причиной человеческих жертв. В то же время такие процессы не просто остановить, поскольку даже при прекращении опасного производства рост концентрации вредных веществ некоторое время продолжается. В связи с этим рационально учитывать общие положения теории катастроф [7]. Динамика соответствующего процесса представлена на рис. 2. Точками обозначены следующие события:  $A$  — концентрация достигла опасного уровня и необходимо проводить мероприятия по ее уменьшению;  $B$  — точка, предвещающая катастрофу, поскольку в момент времени  $t_B$  катастрофу остановить, в большинстве случаев, невозможно вследствие инерционности процесса роста концентрации опасного вещества;  $C$  — точка катастрофы, после которой рост концентрации вещества имеет форму квадратичной или экспоненциальной зависимости.

Осуществляя формирование базы данных и идентификацию зависимости (5), необходимо учитывать, что процессы на участках  $(0, t_A)$ ,  $(t_A, t_B)$ ,  $(t_B, t_C)$ ,  $(t_C, \dots)$  имеют размытый характер. Учет соответствующих особенностей и опыт экспертов, воплощенный в функциях принадлежности системы (5), позволяют осуществлять управляющие воздействия с целью предотвращения катастроф. Заметим, что задачи первого типа, т.е. прогнозирование аварий и катастроф, в современной научной литературе почти отсутствуют.

В отличие от них, задачи определения масштабов аварии или катастрофы, расчета зоны возможного заражения широко представлены различного рода методиками. В то же время они ориентированы на расчет размеров и площади зоны заражения, времени подхода облака зараженного воздуха к определенному объекту, времени поражающего действия и возможных потерь, исходя из таблиц, содержащих значения различного рода поправочные коэффициенты. Известно, что зона химического заражения рассчитывается, исходя из схемы (рис. 3).

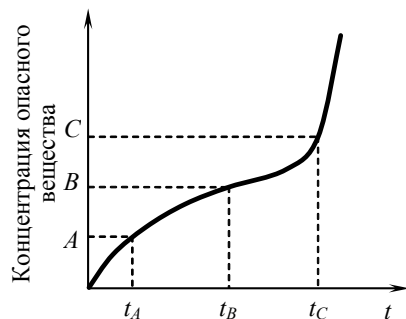


Рис. 2. Динамика концентрации опасного вещества

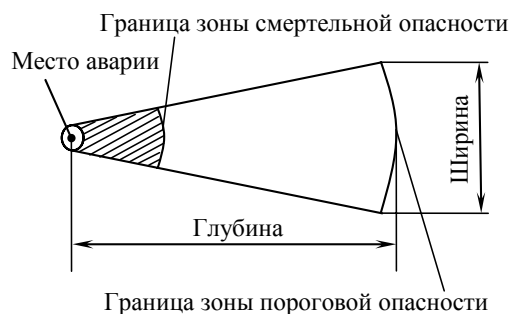


Рис. 3. Зона химического заражения

Все методики расчетов базируются на этой схеме. В большинстве практических ситуаций соответствующие результаты не будут отображать реальное послеаварийное состояние.

Это связано с неполным учетом факторов, оказывающих влияние на концентрацию опасных веществ, в частности, рельеф местности и его характер могут быть причиной увеличения или уменьшения концентрации. Еще одной причиной является изменение характера погодных условий и характера аварии. В таком случае получим схему (рис. 4), использование которой позволит уточнить результаты предварительных расчетов (на схеме рисунка 3).

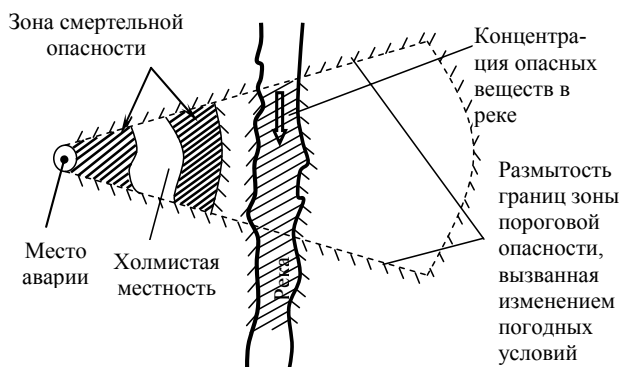


Рис. 4. Уточненная зона химического заражения

Рисунок 4 является всего лишь приблизительной схемой для определения последствий аварии. Можно предложить два способа определения концентрации опасного вещества в рассматриваемой зоне. Первый из них базируется на идентификации зависимости

$$K_j = F_j(x, \varphi, P, Q), \quad (6)$$

где  $x$  и  $\varphi$  — полярные координаты точки, в которой определяем концентрацию,

$P$  — внутренние факторы, которые интегрируют в себе показатели, связанные с объектом и местом аварии,

$Q$  — факторы внешнего воздействия (погодные условия, рельеф и т.п.).

Задавая значения указанных параметров можно получить значение концентрации опасного вещества в любой точке.

Второй способ заключается в интеграции экспертных оценок с помощью системы (5). Присутствующие нечеткие множества позволяют учесть размытость границ как зоны смертельной опасности, так и зоны пороговой опасности.

Построение моделей (5) и (6) необходимо осуществлять в пассивном режиме, т.е. при отсутствии катастроф. Для этого необходима ретроспективная информация, которая содержит либо параметры уже состоявшихся аварий, либо оценки экспертов. Очевидно, что такие данные не “покрывают” всю область заражения, поэтому получить и (5), и (6) можно с помощью обучения. Так, для модели (6) оптимальным представлением является прямосвязная нейронная сеть, а для моделей типа (5) — нейро-нечеткие сети типа TSK или ANFIS [8]. Выбор той или иной нейросетевой архитектуры определяется типом исходных данных, предполагаемых результатов и задачи.

Решение задач третьего класса (“послеаварийные задачи”) базируется на известных решениях предыдущих задач, с использованием Марковского принципа “Будущее зависит от настоящего и не зависит от прошлого”. Таким образом, определение концентрации опасного вещества в воздухе, на почве или в воде зависит от ее начального значения сразу же после аварии, или, в отдельных случаях, от максимального значения уровня концентрации вещества после аварии. Прогнозирование значений параметров зоны и характера заражения, как и в предыдущих задачах, может быть осуществлено с помощью моделей нечеткой логики и нейросетевых технологий.

Процесс получения моделей с оптимальными или приемлемыми значениями параметров структуры рационально осуществлять, используя эволюционные методы, например, генетические алгоритмы и эволюционные стратегии [9]. Их применение является обоснованным ввиду отсутствия данных о характере целевой функции, ее гладкости и других параметрах. Единственной априорной информацией являются начальные данные и предположения экспертов.

Значительное количество необходимых вычислений, их экспертно-ориентированный характер требуют создания специализированных информационно-вычислительных систем, в ко-

торых будут реализованы все перечисленные технологии. В базах данных такой системы должна содержаться информация о предыдущих катастрофах, а также экспертные выводы о потенциально опасных объектах и возможных последствиях аварий на них. Кроме таких данных, основным ее содержанием являются значения постоянных и динамических факторов. К первым относятся технологическое состояние объекта, технологичность процессов на объекте, время действия опасного вещества, размещение объекта, рельеф местности и др. Значения таких факторов в базе данных со временем практически не изменяются и являются константами. В отличие от них, значения динамических факторов изменяются во времени и требуют постоянной коррекции. К ним относятся температура опасного вещества, температура окружающей среды, влажность воздуха, наличие осадков, скорость и направление воздушных потоков.

Применение технологий “мягких вычислений” позволяет в полной мере учитывать опыт экспертов и получать более точные значения параметров заражения за счет привязки соответствующей задачи к конкретной ситуации. В то же время остаются и определенные проблемы применения такой технологии, в частности, сложность формализации задачи, определение ограничений на процесс ее решения, а также трудности сбора и формализации экспертных заключений.

Процессы принятия решений при прогнозировании чрезвычайных ситуаций, связанных с техногенными и экологическими катастрофами, происходят в условиях значительной неопределенности, вызванной отсутствием или недостаточностью исходных данных, их неоднозначностью, недостаточным уровнем информационно-аналитической поддержки. Значительный ущерб от аварий и катастроф указывает на необходимость разработки комплексной системы поддержки принятия решений, основу которой должны составлять технологии “мягких вычислений”, как наиболее соответствующие семантике экспертных заключений, и экспертный опыт, выраженный параметрами нечетких продукционных правил. Такая система позволит осуществлять упреждающее прогнозирование и, как следствие, осуществлять управляющие воздействия на производственные процессы.

## Литература

1. Згуровський, М.З. Сценарний аналіз як системна методологія передбачення / М.З. Згуровський // Систем. дослідж. та інформ. технології. — 2002. — № 1. — С. 7 — 38.
2. Волошин, О.Ф. Теорія прийняття рішень / О.Ф. Волошин, С.О. Мащенко. — К.: Київ. ун-т, 2006. — 304 с.
3. Bezdek, J.C. Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing / J.C. Bezdek // Springer Science+Business Media, Inc. — 2005. — 776 p.
4. Zadeh, L.A. Fuzzy logic, neural network and soft computing / L.A. Zadeh, // Communications of the ACM. — 1994. — Vol. 37, № 3. — P. 77 — 84.
5. Дюбуа, Д. Теория возможностей / Д. Дюбуа, А. Прад. — М.: Радио и связь, 1990. — 286 с.
6. Зайченко, Ю.П. Основы проектирования интеллектуальных систем / Ю.П. Зайченко. — К.: Слово, 2004. — 352 с.
7. Снитюк, В.С. Прогнозування. Моделі, методи, алгоритми / В.С. Снитюк. — К.: McLaut, 2008. — 364 с.
8. Арнольд, В.И. Теория катастроф / В.И. Арнольд. — М.: Физматлит, 1990. — 128 с.
9. Goldberg, D.E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning / D.E. Goldberg. — New York: Ad. Wesley, 1989. — 196 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Черкас. филол. ун-та Рябцев В.Г.

Поступила в редакцию 7 июня 2010 г.