

## Функциональный анализ связей в системе «риск-опасность» и использование термодинамического подхода в теории безопасности

Г.В. АВЕРИН, А.В. ЗВЯГИНЦЕВА

Донецкий национальный технический университет

Выполнен функциональный анализ связей в системе риск-опасность. Показано, что применение термодинамического подхода в теории безопасности позволяет установить ряд закономерностей, характерных для опасных процессов в техносфере.

Виконано функціональний аналіз зв'язків у системі ризик-небезпека. Показано, що застосування термодинамічного підходу в теорії безпеки дозволяє установити ряд закономірностей, характерних для небезпечних процесів у техносфері.

The functional analysis of connections in «risk – hazard» system was carried out. It is shown, that application of the thermodynamic approach in the theory of safety allows to establish a number of regular dependencies, which are typical for dangerous processes in a technosphere.

Стремительно развивающиеся в современном мире процессы глобализации и технического прогресса привели к появлению новых вызовов в области безопасности. Среди них особое место занимают техногенные угрозы и опасности, которые всегда сопровождают любую человеческую деятельность.

В настоящее время в Украине возрастает внимание к проблемам экологической и промышленной безопасности. Государством принят ряд новых законов, растет понимание важности этого направления и то, что современные техногенные угрозы и опасности имеют совершенно иной характер и масштаб, чем прежде.

Теория безопасности является сравнительно молодой наукой, использующей системный подход при анализе опасных процессов и рисков их последствий [1 – 7]. Однако несмотря на бурное развитие многих направлений, ряд методологических вопросов теории безопасности проработан слабо. Ещё в работе В. Маршала [1] отмечается, что в теории безопасности одно из наиболее существенных затруднений в обсуждении проблемы опасности и риска связано с отсутствием аналитического подхода. Это во многом объясняется тем, что опасности могут существовать во многих формах и проявлять свой разрушительный потенциал разными способами.

В теории безопасности техногенных систем сегодня важное место отводится методологии анализа риска, суть которой заключается в идентификации потенциальных опасностей и оценке соответствующих им рисков воздействий на человека, окружающую природную среду и материальные ценности.

Большинство определений риска сводятся к тому, что риск – это вероятность реализации потенциальной опасности, вызванной воздействием внешних факторов и деятельностью человека, которая приводит к возникновению негативных последствий. В количественном плане риск характеризуется условной вероятностью нанесения вреда человеку (биосистеме) и вероятностью наступления неблагоприятных событий и нередко выражается в виде уравнения (1). Данное уравнение применяется для оценки различных угроз во многих областях теории безопасности [1-6].

$$R(j) = \sum_{i=1}^m W_j(I_i) \cdot P_j(I_i), \quad (1)$$

где  $W_j(I_i)$  - условная вероятность нанесения вреда человеку (биосистеме) в случае реализации опасности величиной  $I_i$  при наступлении неблагоприятных событий  $j$ ;  $P_j(I_i)$  - вероятность реализации опасности  $I_i$  при наступлении неблагоприятных событий  $j$ ;  $m$  – число возможных опасностей одного класса.

Таким образом риск, являясь интегрирующим понятием, служит мерой значимости и вероятности реализации опасности для того или иного воздействия. С термодинамической точки зрения риск является одной из важных вероятностных категорий. Чаще всего, в отличие от термодинамической вероятности, риск определяется математической вероятностью. Он характеризует особые состояния сложной системы, которые по показателям безопасности выделяют на множестве реально возможных состояний. Таким образом, риск представляется вероятностью воздействия при реализации сложного (опасного) состояния на фоне осуществления более простых (безопасных) и более вероятных состояний системы.

Опасность, являясь в свою очередь, важной категорией теории безопасности, обычно рассматривается как совокупность факторов, оказывающих негативное воздействие на человека, общество или экосистему, в результате которого им может быть причинен какой-либо вред. В данном случае опасность можно определить как совокупность параметров, характеризующих множество опасных состояний системы, определенным образом выделенных по значениям этих параметров из общего множества состояний.

За последние 20–25 лет основная масса работ исследователей была посвящена анализу опасностей различных химических веществ и вызываемых ими последствий – токсикологических, радиационных и тепловых воздействий, острых поражений, связанных с взрывами и пожарами и т.д. В этой области накоплен обширный количественный и качественный экспериментальный материал. В свою очередь, во многих областях техногенной деятельности человека, отличающихся различными классами опасностей, сформированы свои положения и общепринятые подходы. Однако, в общей методологии теории безопасности при анализе опасности и риска за последнее десятилетие выработан ряд общепризнанных положений (гипотез).

1. Основное положение заключается в том, что риск ( $R$ ) связан с опасностью ( $I$ ), которая может быть измерена или подходящим образом количественно определена [1, 2], то есть риск можно представить как вероятностное распределение, зависящее от опасности:

$$R = R(I), \quad (2)$$

2. Многие опасности обладают свойством аддитивности (возможно с определенным весом  $\beta_i$ ). Отсюда следует, что:

$$I = \beta_1 \cdot I_1 + \beta_2 \cdot I_2, \text{ или, в общем случае:} \quad (3)$$

$$I = \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot I_i, \quad (4)$$

где  $I_i$  – количественный показатель  $i$ -той опасности.

В вопросе о том, какую величину следует принимать за количественный показатель опасности  $I_i$  пока нет полной ясности. Для оценки опасностей одного класса при анализе риска применяют разные показатели – физические параметры опасностей ( $Q$ ) и их логарифмы, коэффициенты опасности ( $HQ$ ) и логарифмы коэффициентов опасности, пробит-функции, которые зависят от физических параметров опасности  $Q$  и времени  $T$  ( $Pr ob = \alpha + \beta_1 \lg Q + \beta_2 \lg T$ ) или только от коэффициента опасности ( $Pr ob = \alpha + \beta \cdot \lg HQ$ ), различные количественные показатели, определенные экспериментальным путем, и т.д.

3. При ранжировании опасностей применяется пороговый принцип с использованием тех или иных порогов воздействий. Обычно характеристика риска развития опасных эффектов проводится на основе расчета коэффициента опасности:

$$HQ_i = Q_i / P_i, \quad (5)$$

где  $P_i$  – порог (уровень) безопасного воздействия  $i$ -той опасности одного класса, заданный в тех же единицах, что и физический показатель опасности  $Q_i$ .

В мировой практике используется большое число порогов (уровней) безопасного воздействия: при действии химических опасностей – это референтные дозы и концентрации ( $RfD$  и  $RfC$ ), предельно допустимые концентрации ( $ПДК$ ), уровни минимального риска ( $MRL$ ); при оценках в области пожаро- и взрывоопасности – пороговые массы или энергии опасных веществ; в области радиационной безопасности – дозовый порог и т.д. Некоторые виды опасных воздействий (канцерогенное действие вредных веществ, стохастическое действие ионизирующих излучений и т.д.) не имеют порога действия. Считается, что риск развития опасных эффектов для таких опасностей пропорционален дозе на всем диапазоне воздействий.

4. Пороговый принцип и положение об аддитивности опасностей позволяют при измерении кумулятивных опасностей пользоваться различными аддитивными индексами. Обычно, индекс опасности рассчитывается по формуле [4-8]:

$$HI = \sum_{i=1}^m HQ_i. \quad (6)$$

В различных областях теории безопасности применяются различные методы, которые основаны на тех или иных индексах опасности и используются при установлении риска различных видов воздействий на население или персонал. Примерами таких показателей являются индекс Доу [6], который применяется при оценке рисков пожароопасности и взрывоопасности (Dow Fire and Explosion Index), коэффициент пороговой массы опасных веществ [3, 7, 8], используемый при оценках опасности объектов повышенной опасности, индексы опасности токсикологических воздействий [5] и т.д.

5. Принято в теории анализа риска, что риски при малых значениях ( $R \ll 1$ ) складываются, то есть:

$$R = \sum_{i=1}^m R(I_i). \quad (7)$$

При больших значениях рисков ( $0 \ll R < 1$ ) суммарные (кумулятивные) риски определяются в соответствии с правилом умножения вероятностей, где в качестве множителей выступают значения, характеризующие вероятность отсутствия риска [4, 5]:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R(I_i)). \quad (8)$$

В теории анализа риска также считается, что функции рисков  $R(I_i)$  качественно одинаковы (описываются одинаковыми функциональными зависимостями) для опасностей одного класса.

Зависимость (8) является более общей, так как при малых рисках ( $R \leq 0,01 \div 0,02$ ) тождественно равна уравнению (7), если отбросить члены более высокого порядка малости.

5) Экспериментальная обработка исключительно обширного объема токсикологических данных для различных вредных химических веществ, а также количественных данных для воздействий, связанных со взрывами, пожарами и радиационными поражениями, позволила принять гипотезу о представлении распределения (2) в виде  $S$ -образной функции, которая обычно моделируется экспоненциальным или логарифмически-нормальным распределением, распределением Вейбулла, логистическим или двойным показательным распределением и т.д.

Например, в существующей методологии оценки риска здоровью и жизни людей при воздействии химических веществ в настоящее время широко используют логарифмически-нормальное распределение вида:

$$R(Pr ob_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr ob_i} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (9)$$

где верхний предел интегрирования является так называемой пробит-функцией ( $Pr ob_i$ ), отражающей связь между вероятностью поражения и поглощенной (воздействовавшей) дозой (концентрацией). Для её вычис-

ления обычно используется логарифмическая зависимость вида [3, 5]:

$$Pr ob_i = a_i + b_i \cdot \ln(C^n \cdot \dot{O}), \quad (10)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  – константы, характеризующие специфику и меру опасности воздействия конкретного вредного вещества;  $n$  – параметр зависимости “концентрация-время”, специфичный для каждого химического вещества;  $C$  – концентрация. При постоянном времени воздействия ( $T=const$ ) в различных токсикологических экспериментах пробит-функция представляется в виде:

$$Pr ob_i = \alpha_i + \beta_i \cdot \lg C, \quad (11)$$

где  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – параметры, зависящие от токсикологических свойств вещества для различных категорий воздействий. В данном виде в координатах  $Pr ob - \lg C$  обычно и обрабатывают экспериментальные данные при установлении уровней безопасного воздействия для вредных химических веществ [9, 10].

Уравнение, аналогичное (9), только при других видах пробит-функций и поражающих факторах, используется в разных областях теории безопасности: в пожаро- и взрывобезопасности, при радиационных поражениях, в случае анализа производственного и бытового травматизма и т.д. [3, 6].

В области оценки риска здоровью и жизни людей при воздействиях химических веществ для моделирования S-образных функций кроме логарифмически-нормального распределения (9) используется также логистическое и двойное показательное распределение вида [11]:

$$R(Pr ob_i) = \frac{\exp(\alpha \cdot Pr ob_i)}{1 + \exp(Pr ob_i)} \quad (12)$$

$$R(Pr ob_i) = 1 - \exp(-\alpha \cdot \exp(\beta \cdot Pr ob_i)), \quad (13)$$

где пробит-функция  $Pr ob_i$  определяется согласно уравнения (10).

Функции (9), (10), (11) при обработке экспериментов одинаково хорошо описывают опытные данные, однако зависимость (9) используется значительно чаще, так как она более доступна при проведении статистического анализа.

В других областях при оценке вероятности развития неблагоприятных эффектов и возникновения опасных событий также широко используются различные виды вероятностных распределений, например распределение Пуассона – при исследовании рисков пожаров, производственных аварий, природных катастроф типа тайфунов, смерчей; распределения Вейбулла, Парето – при исследовании землетрясений, наводнений, извержений вулканов, крупных техногенных катастроф с тяжелыми последствиями, катастрофических пожаров; гамма-распределение – при изучении риска смертельного травматизма, числа промышленных аварий и т.д.

Таким образом, приведенные выше данные свидетельствуют о наличии важных закономерностей, характерных для многих опасных процессов в техносфере и окружающей природной среде.

В общем случае выбор теоретически обоснованного количественного показателя опасности при оценке риска воздействий исключительно важен.

Предположим, что в качестве количественной меры опасности можно принять некоторую величину  $Pr ob$ , для которой выполняется свойство аддитивности:

$$Pr ob = Pr ob_1 + Pr ob_2. \quad (14)$$

В первом случае на основе апробированных на практике подходов в качестве величины  $Pr ob$  примем с учетом закономерности (6) индекс опасности  $HI$ .

Для обоснования величины  $Pr ob$  во втором случае используем принятый в термодинамике подход, суть которого заключается в наложении функциональных ограничений на переменные сложной системы за счет обобщения основных системных закономерностей, характеризующих исследуемый процесс или объект. Будем считать, что величина  $Pr ob$  является основным свойством системы, находящейся в опасном состоянии, и однозначно определяется термодинамическими параметрами (температурой, давлением и концентрацией).

Покажем возможность использования термодинамического подхода на примере анализа опасности загрязнения атмосферы вредными веществами, многие из которых с определенными допущениями можно считать идеальными газами.

Интенсивность воздействия опасного вещества на человека или другой биологический объект определяется его концентрацией и временем действия. Поэтому при одинаковом времени действия ( $T=const$ ) различных концентраций вещества вредный эффект будет определяться исключительно содержанием опасного компонента в атмосферном воздухе.

Предположим, что в атмосферном воздухе при нормальных условиях находится некоторый вредный идеальный газ с концентрацией  $\tilde{N}_{i0}$ , при этом его опасность характеризуется количественным показателем  $Pr ob_{i0}$ . В данном случае интерес представляет изменение состояния только опасного компонента как термодинамической системы.

Данная система в изотермическом процессе переходит в состояние с концентрацией вредного вещества равного  $\tilde{N}_i$ , опасность которого характеризуется количественным показателем  $Pr ob_i$ . Термодинамическое состояние системы связано с энтропией ( $S$ ), которая является экстенсивной функцией и, как другие термодинамические функции, обладает свойством аддитивности. Изменение энтропии идеального газа в процессе изменения термодинамического состояния при  $m = const$  равно согласно [12, 13]:

$$S_i - S_{i0} = r_i \cdot \ln\left(\frac{\mathcal{G}_i}{\mathcal{G}_{i0}}\right) = -r_i \cdot \ln\frac{C_i}{C_{i0}}, \quad (15)$$

где  $\mathcal{G}$  – удельный объем,  $r_i$  – газовая постоянная вещества.

Таким образом, изменение концентрации газа в таких системах будет приводить к одновременному изменению энтропии и опасности системы. Это дает

основание полагать, что энтропия и опасность вредного компонента - величины взаимосвязанные, причем обладающие свойством аддитивности, то есть:

$$\Delta Prob = \varphi(\Delta S); \quad Prob_i = \varphi(S_i), \quad (16)$$

$$\Delta S = S_s - S_{s0}, \quad (17)$$

откуда, в предположении, что существует универсальная функция связи “опасность-энтропия”  $Prob = \varphi(S)$ , получим:

$$\varphi(S_s - S_{s0}) = \varphi(S_s) - \varphi(S_{s0}). \quad (18)$$

Дифференцируя данное соотношение по  $S_s$  и  $S_{s0}$ , можно показать, что функциональная связь (18) обеспечивается при условии, когда

$$\Delta Prob = A \cdot \Delta S + B. \quad (19)$$

Постоянная  $B$  определяется из аддитивных свойств соотношений (16) и (17) и равна нулю.

Учитывая, что с ростом энтропии в данном процессе (например, при уменьшении концентрации опасного газа) опасность системы должна уменьшаться получим, что количественный показатель опасности должен быть пропорционален энтропии системы с обратным знаком, то есть:

$$Prob = -A \cdot S, \quad A > 0. \quad (20)$$

Согласно (20), величина  $Prob$  пропорциональна значению неэнтропии, представляющей, как известно, качество энергии.

Принимая во внимание уравнение (15), получим для величины  $Prob_i$  следующее соотношение:

$$Prob_i = \alpha_{*i} + \beta_{*i} \cdot \ln I_i. \quad (21)$$

Здесь  $\alpha_{*i}$  - постоянная ( $\alpha_{*i} = -AS_{i0}$ ), которая характеризует “начало отсчета” – условную опасность  $Prob_{i0}$ , соответствующую условно принятой концентрации  $\tilde{N}_{i0}$ ;  $\beta_{*i}$  - фактор наклона ( $\beta_{*i} = Ar_i$ ), определяющий индивидуальные опасные свойства вещества;  $I_i$  - коэффициент опасности или загрязнения

$$(HQ_i = \frac{C_i}{C_{i0}}, \quad C_{i0} = RfC_i \text{ или } q_i = \frac{C_i}{C_{i0}}, \quad C_{i0} = \dot{I}\dot{A}\dot{E}_i).$$

Зависимость (21) является одним из видов пробит-функции, где коэффициенты  $\alpha_{*i}$  и  $\beta_{*i}$ , характеризующие опасные свойства вещества, могут быть найдены только на основе опытных данных. Известно, что пробит-функции широко применяются при анализе токсикологических данных в области острых и подострых химических воздействий вредных веществ.

Теперь рассмотрим две идеальные термодинамические системы равных объемов при одинаковых температурах, отличающихся различными давлениями и концентрациями одного и того же вредного вещества. Опасность систем характеризуется количественными

показателями  $Prob_1$  и  $Prob_2$ , при этом справедливо соотношение аддитивности опасности, количественно измеренной в пробитах ( $Prob$ ) вида (14). Примем допущения, что изменение энтропии в необратимом процессе смешения газа  $\Delta S_{ci}$  во много раз меньше по сравнению с изменением энтропии в процессе его изотермического расширения от концентраций  $\tilde{N}_i$  до  $\tilde{N}_{s0}$  ( $\Delta S_{ci} \ll \Delta S$ ). Это справедливо, если концентрации  $C_i$  близки между собой и  $C_s \gg C_{0s}$ . В этом случае количественным показателем аддитивной опасности будет пробит-функция, полученная из условия определения энтропии общей системы при изменении состояний газа в изотермическом процессе от концентрации  $\tilde{N}_i$  до концентрации  $C_{i0}$  [13, 14]:

$$Prob(I_1, I_2) = \alpha_{*i} + \beta_{*i} \cdot \frac{I_1 \cdot \ln I_1 + I_2 \cdot \ln I_2}{I_1 + I_2}, \quad (22)$$

Таким образом, как видно из приведенных выше результатов, количественный показатель опасности  $Prob_i$  может быть связан с коэффициентом опасности  $HQ_i$  или аналогичной ему величиной на основе использования тех или иных гипотез и допущений.

Для определения зависимости, характеризующей в общем виде связь риск-опасность, воспользуемся следующими предположениями.

Пусть выполняется свойство аддитивности опасности вида (14), при этом будем считать, что для кумулятивных рисков справедливо также равенство (8), а величина  $Prob$  в общем виде зависит от величин  $I_i$ , то есть:

$$R(Prob) = R(Prob_1) + R(Prob_2) - R(Prob_1) \cdot R(Prob_2). \quad (23)$$

Дифференцируя (23) по  $I_1$  и  $I_2$  и преобразуя полученные зависимости, будем иметь следующее нелинейное дифференциальное уравнение для определения кумулятивного риска как функции, аддитивной опасности  $Prob$ :

$$\frac{d^2 R}{d Prob^2} + f(I_1, I_2) \frac{dR}{d Prob} + \frac{1}{1-R} \left( \frac{dR}{d Prob} \right)^2 = 0. \quad (24)$$

$$\text{Здесь } f(I_1, I_2) = \frac{\partial^2 Prob}{\partial I_1 \cdot \partial I_2} \cdot \left( \frac{\partial Prob}{\partial I_1} \cdot \frac{\partial Prob}{\partial I_2} \right)^{-1}.$$

Рассмотрим простейший случай, когда количественный показатель опасности выбирается в виде коэффициента опасности (коэффициента загрязнения)  $Prob_i = I_i$ , а суммарная опасность характеризуется индексом опасности  $HI$  согласно (6). В этом случае в уравнении (24) имеем  $f(I_1, I_2) = 0$  и решение для функции риска при краевых условиях  $I = 0 \quad R = 0$  и  $I \rightarrow \infty \quad R \rightarrow 1$  представляется экспоненциальным распределением [14]:

$$R = 1 - \exp(-\alpha \cdot Prob). \quad (25)$$

Пусть количественный показатель опасности  $Prob_i$  выбирается в виде пробит-функции (21), а показателем аддитивной опасности величина  $Prob(I_1, I_2)$  вида (22).

Можно показать, что при близких значениях величин  $I_1$  и  $I_2$  ( $I_1 \approx I_2 \approx I$ ) функция  $f(I_1, I_2) \approx -\frac{2}{\beta_{*i}}$ . В этом случае решение уравнения (24) для функции риска при краевых условиях  $Prob \rightarrow -\infty$   $R \rightarrow 0$  и  $Prob \rightarrow \infty$   $R \rightarrow 1$  представляется двойным показательным распределением вида:

$$R = 1 - \exp\left(-\alpha \cdot \frac{\beta_{*i}}{2} \cdot e^{\frac{2}{\beta_{*i}} Prob}\right). \quad (26)$$

Тогда зависимость функции риска от величины  $I$  имеет вид распределения Вейбулла:

$$R = 1 - \exp\left(-\alpha \cdot \frac{\beta_{*i}}{2} \cdot e^{\frac{2\alpha_{*i}}{\beta_{*i}} \cdot I^2}\right). \quad (27)$$

Если сделать предположение, что коэффициент  $A$  в соотношении (20) зависит от времени действия вредного вещества и определяет категорию воздействия (хроническое, рефлекторное, подострое, острое, и т.д.) для определенных видов токсикологических экспериментов [5, 10], то возможно провести обобщение результатов токсикологических экспериментов для различных видов воздействий.

Таким образом, полученные результаты подтверждают эмпирически установленный в области теории безопасности факт, что с ростом уровня любой опасности вероятность её реализации резко уменьшается, стремясь к нулю. Полученные данные позволяют на основе эмпирических F/N-диаграмм [1] “количество несчастных случаев (аварий) – частота событий” провести обобщение различных видов опасных событий в техносфере.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Маршал. Основные опасности химических производств. М.: Мир. – 1989. – 672 с.
2. Дж. Хенли, Х. Кумамото. Надежность технических систем и оценка риска. М.: машиностроение. 1984. – 528 с.
3. П.Г. Белов. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. М.: Академия, 2003. – 507 с.
4. А.Б. Качинський. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи. К., 2003. -472 с.
5. Г.Г. Онищенко, С.М. Новиков, Ю.А. Рахманин, С.Л. Авалиани, К.А. Буштуева. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.:НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
6. Н.П. Тихомиров, И.М. Потравный, Т.М. Тихомирова. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками. М.: Юнити-Дана. 2003. – 350 с.
7. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування об'єктів підвищеної безпеки. К.: Основа, 2003. – 191 с.
8. Директива Совета ЕС 96/82/ЕС. О сдерживании опасностей крупных аварий, связанных с опасными веществами/Совет Европейского союза: Женева, 1996. – 22 с.
9. А.В. Киселев, К.Б. Фридман. Оценка риска здоровью. Подходы к использованию в медико-экологических исследованиях и практика управления качеством окружающей среды. С.-П: Дейта. 1997. – 100 с.
10. Временные методические указания по обоснованию предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. М. 1989. – 110 с.
11. CatReg Software. User Manual. Environmental Protection Agency/ Office of research and Development Washington. April 2000.
12. В.А. Кирилин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. Техническая термодинамика. М.:Энергия. 1974. – 448 с.
13. Н.В. Карякин. Основы химической термодинамики. М.: Академия. 2003. – 464 с.
14. Э. Камке. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука. 1976. – 576 с.

пост. 30.12.05