

УДК 502.5:303.732.4

ОПАСНОСТЬ И РИСК КАК ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСОБЫХ СОСТОЯНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМ

Аверин Г.В., д.т.н., проф., Звягинцева А.В., к.т.н., доц.

Донецкий национальный технический университет

83001 г. Донецк, ул. Артема, 58

E-mail: Averin@cs.dgtu.donetsk.ua; Zviagintseva@cs.dgtu.donetsk.ua

Розглянуті можливості побудови теорії небезпеки і ризику екологічних і техногенних систем на основі застосування структурно-логічної схеми побудови моделей, прийнятої в термодинаміці.

Ключові слова: теорія небезпеки, ризик, структурно-логічні схеми, техногенні системи.

Considered possibilities of construction of theory of danger and risk of the ecological and technogenic systems on the basis of application of structurally-logical chart of the construction of models, accepted in thermodynamics.

Key words: theory of danger, risk, structurally-logical charts technogenic systems.

Введение. Теория безопасности является системной наукой, использующей комплексный подход при анализе опасных процессов [1–6]. Однако, несмотря на развитие многих направлений, ряд методологических вопросов теории безопасности проработан крайне слабо. Ещё в работе В. Маршала [1] отмечается, что в безопасности систем одно из наиболее существенных затруднений в обсуждении проблемы опасности и риска связано с отсутствием общей теории, использующей аналитические методы. Построение любой теории основано на систематизации экспериментальных данных, установлении базовых эмпирических закономерностей, а также разработке методологии, применяющей математический аппарат. Сегодня существует ряд общепризнанных положений, обобщение которых помогает продвинуться в решении теоретических проблем безопасности систем.

Анализ предыдущих исследований. За последние десятилетия основная масса работ исследователей была посвящена изучению опасности различных химических веществ и вызываемых ими негативных последствий – токсикологических, радиационных и тепловых, острых и смертельных поражений, связанных со взрывами, пожарами, ударными волнами и т.п. Много внимания уделялось также опасности различных природных катаклизмов – землетрясениям, цунами, наводнениям, ураганам и т.д. В этой области накоплен обширный экспериментальный материал. В теории безопасности систем существуют понятия опасности и риска, которые тесно связаны между собой.

Опасность, являясь основной категорией при рассмотрении проблем безопасности, обычно рассматривается как объективно существующая возможность негативного воздействия на общество, личность, природную среду, в результате которого им может быть причинен какой-либо ущерб или вред. В работах [4,7,8] приведены наиболее распространенные определения опасности. Из анализа определений следует, что опасность можно рассматривать как некоторое особое состояние природной или техногенной системы. Количественное измерение уровня опасности обычно основано на оценке риска.

Риск – вероятность возникновения неблагоприятных эффектов или негативных последствий у объекта через действие вредных или опасных факторов окружающей среды. Наиболее распространенные определения риска обобщены в [4] и даны в [7,8]. В общем случае можно считать, что риск представляет собой вероятность реализации особых состояний системы, определенных как опасные состояния.

Эмпирические закономерности формирования опасных процессов. Основные эмпирические закономерности в области опасности и риска заключаются в следующем.

1. Любая опасность может характеризоваться целым рядом параметров, определяющих опасный фактор. В простейшем случае опасность характеризуется одним количественным

показателем (I) и временем действия опасного фактора (t). Время как опасный параметр воздействия присутствует практически во всех случаях реализации опасности.

При термических воздействиях на человека, связанных с действием теплового излучения, в качестве основного показателя опасности используют тепловой поток [3,6], в свою очередь, при воздействиях факторов взрыва – избыточное давление во фронте ударной волны; при токсических поражениях – концентрацию вредного вещества; при радиационных поражениях – дозу облучения и т.д. Время действия для различных факторов опасности разное: от миллисекунд при взрывах до десятков лет при химических воздействиях, связанных с загрязнением среды.

2. Во многих областях теории безопасности применяется понятие комплексного показателя опасности, который называется пробитом [3,5,9]. Данный показатель эмпирически определяется как

$$Pr ob = a_g + b_{1g} \cdot \ln I + b_{2g} \cdot \ln t . \quad (1)$$

Использование показателя опасности в виде (1) связано с эмпирической закономерностью, которая характерна для действия многих опасностей (химических и радиационных поражений, воздействий взрывов, пожаров и т.п.). Суть закономерности заключается в том, что произведение количественного показателя опасности, возведенного в степень, на длительность воздействия - величина постоянная для определенной категории негативного эффекта g , т.е. определенной вероятности состояния системы:

$$I^k \cdot t = const , \quad (2)$$

где k – показатель, характеризующий определенный вид опасных процессов.

3. Риск возникновения опасного события или ущерба объекту является вероятностной категорией, в связи с чем в этой области справедливы основные положения теории вероятности. Как вероятность реализации сложного события риск связан с опасностью, которая может быть измерена или подходящим образом количественно определена, а также со временем, которое характеризует длительность воздействия опасных факторов [1-6]:

$$R = f(Pr ob(I, t)) , \quad (3)$$

где $f(y)$ – интегральная функция вероятностного распределения.

4. При ранжировании опасностей одного класса часто применяется пороговый принцип, определяющий безопасную границу опасного процесса, которая, в свою очередь, индикаторно определяет переход системы в опасное состояние:

$$HI_i = I_i / P_i , \quad (4)$$

где P_i – порог (уровень) воздействия i -той опасности определенного класса, заданный в тех же единицах, что и показатель опасности I_i .

В свою очередь, многие тождественные опасности одного класса обладают свойством аддитивности. При оценке опасностей данные положения позволяют пользоваться различными аддитивными индексами. Обычно индекс опасности рассчитывается по формуле [3,5-7]:

$$HI = \sum_{i=1}^m HI_i . \quad (5)$$

Примерами этого являются индекс Доу [6], который применяется при оценке рисков пожароопасности и взрывоопасности, коэффициент пороговой массы опасных веществ [3,7], используемый при оценках опасности объектов повышенной опасности, индексы опасности

токсикологических воздействий [5], пороговые уровни выбросов вредных веществ в атмосферный воздух и т.д.

5. Обработка экспериментальных данных, характеризующих опасные процессы, позволила выработать общую методику анализа опасностей. Построение эмпирических моделей риска обычно проводится в координатах пробит- $\ln I$ или пробит- $\ln t$. Чаще всего инверсное преобразование рисков в пробит-функции выполняется с учетом уравнения (6), определяющего функцию нормального распределения:

6.

$$R(\text{Pr } ob_i) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{-\infty}^{\text{Pr } ob_i} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (6)$$

Подобное преобразование при обработке данных позволяет получить линейные уравнения в системе “риск-опасность” для многих опасных процессов. Кроме (6), используются также и другие распределения. Методика подобной обработки данных учитывает закономерность, свойственную многим случайным процессам и имеющим тот или иной вид вероятностного распределения.

Например, в методологии оценки риска здоровью и жизни людей при воздействии химических веществ широко используют логарифмически-нормальное распределение вида (1) и (6). В свою очередь, распределение Пуассона применяют при исследовании рисков отказов оборудования, возникновения пожаров, производственных аварий, природных катастроф типа тайфунов, смерчей; распределения Вейбулла, Парето – при исследовании землетрясений, наводнений, извержений вулканов, крупных техногенных катастроф, катастрофических пожаров; гамма-распределение – при изучении риска смертельного травматизма, числа промышленных аварий и т.д.

6. Оценка риска воздействий опасных факторов часто ведется по категориям негативных эффектов или ущербов. При токсикологическом действии веществ – это хроническое, острое или смертельное воздействия; при тепловых поражениях – ожоги различной степени тяжести или гибель; при радиационных поражениях – степень лучевой болезни; при землетрясениях, пожарах или наводнениях – характер разрушений или категория количества погибших и т.д. Например, в токсикологии применяют так называемые модели категорийной регрессии для оценки тяжести различных видов опасных и вредных эффектов [9], основанные на зависимости (1). В данном уравнении величины b_{1g} и b_{2g} принимаются постоянными для всех видов негативных эффектов (например, слабый, умеренный и выраженный вредные эффекты). Величина a_g задается для определенного эффекта константой, причем $a_1 > a_2 > a_3$ при увеличении тяжести вида эффекта.

Цель работы. Развитие аналитических методов в теории опасности и риска.

Материал и результаты исследования. Принятая в данной статье методология исследования основана на использовании логической схемы термодинамического метода.

Развитие термодинамического метода или аналогичных ему подходов в других областях знаний является актуальной задачей при изучении сложных систем. Однако метод термодинамики не должен буквально переноситься в новую область исследований, идейно должна использоваться только структурно-логическая схема построения моделей.

В настоящее время большое внимание уделяется изучению сложных систем. Подавляющее большинство физических, экологических, экономических и социальных систем относятся к категории сложных. В процессе смены состояний любой сложной системы происходит последовательное изменение её параметров во времени. При этом практически все системы могут находиться либо в опасном, либо в безопасном состоянии. Опасность состояния системы определяется по значениям параметров, которые могут превышать или не достигать заданных пороговых значений, а возможно также попадать в определенный нежелательный диапазон.

Таким образом, безопасное состояние системы – это множество состояний, при которых значения всех параметров соответствуют заданным требованиям. В свою очередь, опасное состояние системы – множество состояний, при которых значение хотя бы одного параметра не соответствует требованиям, заданным по показателям безопасности.

Исходя из сказанного выше, будем в дальнейшем использовать следующий понятийно-категорийный аппарат в области безопасности систем.

Опасный фактор – физические, химические, биологические компоненты и явления живой и неживой природы, ресурсы или условия окружающей среды, способные вызвать неблагоприятные эффекты и негативные последствия у объектов воздействия при реализации опасности.

Воздействие – действие опасного фактора окружающей среды на уровне, создающем неблагоприятные эффекты и негативные последствия у реципиентов.

Объект воздействия – реципиенты, на которые воздействует опасный фактор окружающей среды.

Окружающая среда – совокупность природных, экономических, социальных, техногенных и других условий, в которых находится объект воздействия.

Опасная система – концептуальная совокупность окружающей среды, формирующей опасность, и объекта воздействия, находящегося под действием опасного фактора среды, который с течением времени обеспечивает появление у данного объекта неблагоприятных эффектов и негативных последствий.

При системном подходе риск характеризует особые состояния сложной системы, которые по показателям безопасности разделяют на множестве реально возможных состояний. Другими словами, риск представляется вероятностью реализации сложного (опасного) состояния на фоне осуществления более простых (безопасных) и более вероятных состояний системы. После этого пояснения можно дать следующее определение риска с учетом предмета исследования общей теории систем.

Риск – вероятность существования особых состояний сложной системы, при которых у объекта воздействия под действием опасного фактора возникают неблагоприятные эффекты и негативные последствия.

В таком понимании процессов развития сложной системы вероятность состояния системы можно определить по методу Эйнштейна. В этом случае под вероятностью состояния понимают отношение длительности существования определенного k -ого опасного состояния t_k к общей длительности наблюдения t при условии, что общая длительность наблюдений чрезвычайно велика:

$$W_k = \frac{t_k}{t}. \quad (7)$$

Данный подход широко используется при осуществлении “пассивных” экспериментов, когда существует возможность длительного наблюдения за поведением сложной системы на n объектах. При этом статистически возможно появление опасных состояний с негативными последствиями, которые могут контролироваться при наблюдении. Этот подход определения вероятностей широко используется в экологических, социальных и экономических науках, а также в промышленной и экологической безопасности.

Другая возможность оценки вероятности состояния системы основана на проведении “активных” экспериментов, когда появление опасных состояний в обычных условиях практически невозможно. В этом случае изучают поведение ряда одинаковых по общим показателям объектов в искусственно созданных опасных условиях окружающей среды и сравнивают это поведение с поведением группы таких же объектов в обычных условиях (сравнение с контрольной группой или фоном):

$$W_k = \frac{n_k}{n}, \quad (8)$$

где n_k – число объектов, у которых наблюдаются неблагоприятные эффекты в опасных условиях, n – общее число объектов в опыте. Этот подход широко используется в токсикологии, медицине, теории надежности, экологической безопасности и т.д.

Так как обычно при подсчете вероятностей состояний рассматривается весьма большое число тождественных сложных систем одного класса (n), то определенные k -ые состояния на всем множестве опасных и неопасных состояний отображаются точками в $n \times t$ -мерном пространстве. При этом состояние системы определяется m параметрами. Каждая точка характеризуется набором определенных значений этих параметров, и этой точке устанавливается в соответствие вероятность W_k , экспериментально определенная согласно уравнений (8) или (9) по всем n системам. Все события в этом случае образуют полную группу несовместных событий, т.к. $\sum_{k=1}^n W_k = 1$. Оценка вероятности W_k проводится динамически во времени

при выбранных значениях количественного показателя I_i до достижения системами определенной статистически значимой категории эффекта g .

Например, в токсикологии при оценке воздействий подобный опыт проводится следующим образом.

Выбираются определенные концентрации вредного вещества C_1, C_2, \dots, C_j . В боксах создаются условия для поддержания воздушной среды с такими же концентрациями вещества. В каждый бокс помещается группа живых объектов (крысы, мыши, кролики и т.д.). Периодически во времени оценивается количество объектов, у которых возникают устойчивые неблагоприятные эффекты определенной степени тяжести. При этом рассматриваются следующие категории тяжести эффекта: “нет эффекта”, “слабый эффект”, “умеренный эффект”, “выраженный эффект”. Параллельно для оценки фоновых уровней может проводиться опыт с контрольной группой животных в нормальных безопасных условиях окружающей среды. Это позволяет опытным путем оценить вероятности состояний по всему фазовому пространству выбранного ансамбля систем.

Общий термодинамический метод [10], лежащий в основе исследования взаимодействий системы с окружающей средой, предполагает, что каждому взаимодействию особого рода приводится в соответствие некоторая физическая величина – координата состояния (x_k). Общему покою системы отвечает постоянство координат состояния. Соответствующей координате отвечает одна степень свободы системы. Каждому воздействию данного рода и, следовательно, каждой координате, устанавливаются в соответствие также некоторую физическую величину – потенциал взаимодействия (P_k). Равенство потенциалов внешней среды и системы является необходимым и достаточным условием для равновесия. В условиях неравновесного взаимодействия потенциалы внешней среды и системы имеют различные значения. Таким образом, изменение координаты при воздействии возможно только при наличии разности потенциалов. В каждом термодинамическом состоянии система обладает строго определенными свойствами и этому состоянию отвечает совокупность вполне определенных значений потенциалов и координат, которые являются, в свою очередь, параметрами состояния системы.

Соответствующие координаты и потенциалы в виде уравнения $dE_k = P_k dx_k$ определяют конкретный вид переносимой энергии и входят в закон превращения и сохранения энергии в качестве параметров. В качестве фундаментального закона термодинамики основное уравнение изменения внутренней энергии (U) системы представляется через потенциалы и координаты в следующем виде:

$$dU = \sum_{k=1}^n P_k dx_k . \quad (9)$$

При выводе термодинамических уравнений в качестве координат используются объем, масса, энтропия, в качестве потенциалов – давление, химический потенциал, температура. Координаты обычно являются аддитивными величинами. Потенциалы в такой трактовке, в отличие от обычных термодинамических потенциалов (энергии, энтальпии, свободной энергии), не являются аддитивными величинами.

Законы термодинамики, а также уравнение сохранения энергии (9), дополненные методами определения термодинамической вероятности и целым рядом эмпирических закономерностей и уравнений состояний, образуют математический аппарат термодинамики. Теоретической базой большинства дифференциальных уравнений термодинамики является теория дифференциальных пфаффовых форм [10,11].

Возможность применения термодинамического метода в нефизических областях научных исследований можно показать на примере изучения токсикологических воздействий.

Уравнение состояния токсикологической системы. Рассмотрим систему, включающую опасную среду, которая содержит вредный газ, и объект воздействия – живые организмы. Теория опасности и риска такой системы должна формулироваться на основе получения уравнений состояния. Примем гипотезу о существовании параметра состояния (s), определяющего уровень опасности при воздействии. Эта гипотеза имеет фундаментальное значение и подлежит проверке опытом. Будем считать, что величина s является мерой опасности, заданной в относительных величинах, для которой логическим аналогом в термодинамике является температура.

Известно, что в термодинамике есть относительная величина, которая является параметром состояния системы и определяет уровень нагрева тела. Все эксперименты в области термодинамики тем или иным образом касаются измерений температуры. Уровень нагрева тела является относительной величиной, т.к. термодинамические шкалы температур привязываются к определенным реперным точкам. Построение линейных температурных шкал основано на применении метода двух точек. Например, в стоградусной термодинамической шкале (шкале Цельсия) точка кипения воды при атмосферном давлении принимается за 100°C, а точка плавления льда – за 0°C. Шкалы температур бывают различны, например: Цельсия (°C), Фаренгейта (°F), Ренкина (°Ra), Реомюра (°R), абсолютная шкала температур Кельвина (K). Реперные точки выбираются, исходя из факта изменения качества системы, в термодинамике – это изменения фазового состояния. Из применения шкал температур следует, что все термодинамические воздействия системно оцениваются по уровню нагрева тела с помощью относительной величины, которая называется температурой. Эта величина комплексно определяет существование воздействий на систему и их уровень. Постоянное значение температуры указывает на отсутствие любых воздействий и постоянство всех других параметров системы. Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что температура представляет собой количественный показатель, который характеризует при воздействиях переход системы в другое качество по факту изменения фазовых состояний.

Примем данную логическую схему для введения показателя уровня опасности.

Численная величина температуры измеряется с помощью термометров, применение которых основано на факте, что два соприкасающихся тела через некоторое время приходят к состоянию теплового равновесия и принимают одинаковую температуру. В свою очередь, если живой объект поместить в опасную среду, то по истечении определенного времени у него возникают неблагоприятные эффекты, тем опаснее, чем опаснее окружающая среда. В термометрии, если термометр, приводимый в соприкосновение с различными телами, дает одно и то же показание, то говорят, что эти тела имеют одинаковую температуру. В свою очередь, в токсикологии опасность среды “измеряют” с помощью особых “термометров” – живых об-

ъектов, в качестве которых чаще всего выступают белые мыши и крысы. Данные “термометры” можно градуировать по неблагоприятным эффектам на основе токсикологических экспериментов. Поэтому, если такой “термометр”, помещенный в различные вредные газы, будет давать одинаковое показание (будет наблюдаться одинаковый негативный эффект), то можно говорить, что среды имеют одинаковую опасность. При этом отметим, что понятие эффекта носит в токсикологии комплексный характер и обычно учитывает целый ряд показателей и характеристик организма. Оценка уровня опасности среды, кроме этого, носит вероятностный характер, поэтому обычно изучают данные по группе живых объектов. Это связано с тем, что неопределенность экспериментальных данных в токсикологии более выражена, чем в термодинамике.

Таким образом, показатель уровня опасности (s) также может быть относительной величиной и тоже должен привязываться к определенным реперным точкам. Без введения этой величины нельзя связать вероятность состояния опасной системы с параметрами системы на всей области определения воздействий, когда время и количественный показатель опасного фактора изменяются в широких пределах. Например, при определенных значениях времени и концентрации вредного вещества может быть получен смертельный эффект с вероятностью 5, 50 и 100%. В другой категории эффекта (например, хроническое воздействие, которое естественно менее опасное, чем смертельное) также можно наблюдать указанные вероятности, но при других временах воздействий и концентрациях вредного вещества. Кроме этого, для живых организмов смертность 50% наблюдается также при безопасных значениях концентраций вещества, но при среднем биологическом возрасте объекта данного вида. Поэтому для параметрического описания состояний всего ансамбля систем необходимо использовать три параметра, а именно величины t , I , s . При этом показатель опасности s будет характеризовать возможность перехода объекта при увеличении опасности среды в другое качество. Поскольку все параметры системы “равноправны” с точки зрения определения состояния системы, то уровень опасности будет однозначно определен уравнением состояния опасной системы:

$$F(I, t, s) = 0. \quad (10)$$

Таким образом, для решения задачи шкалирования опасности необходимо по аналогии с температурой ввести относительную шкалу опасности, для чего установить соответствие показателя s и определенных реперных точек. Например, при $t = 0$ и $I = 0$ принять $s = 0^\circ$ опасности, а для эталонного опасного вещества и значений t и I , при которых наблюдается определенный выраженный эффект, принять $s = 100^\circ$ или $s = 1000^\circ$. Все остальные вещества необходимо “привязать” по категориям эффектов к данной шкале опасности. Специфику и меру опасного воздействия различных веществ в данной шкале следует определить по экспериментальным данным, получаемым при использовании определенного вида “термометров” – белых мышей (крыс) как наиболее распространенных экспериментальных животных. Такая обработка данных позволит получить уравнение состояния для сложной системы, опасность которой связана с токсикологическими воздействиями.

Для анализа экспериментальных данных и построения шкалы опасности примем в качестве основной реперной точки область 50% смертности мышей при времени воздействия вредного вещества, равному двум часам, а за эталонное вредное вещество – монооксид углерода, опасность которого изучена наиболее полно.

Представим уравнение состояния вида (10) некоторой поверхностью в декартовой системе координат относительно параметров t , I , s . В общем случае эта поверхность, определяемая уравнением $s = Z(t, I)$, будет являться линейчатой поверхностью n -мерного порядка, т.к. образуются прямолинейными образующими, проходящими через точку ($t = 0, I = 0$).

Для монооксида углерода точке $s = 1000^\circ$ опасности соответствуют параметры воздейст-

вия $I = C = 2230 \text{ мг/м}^3$ и $t = 120$ мин, при которых наблюдается 50 % смертность мышей [12,13]. Уравнение $s = Z(t, I)$ удовлетворяет также следующим условиям:

а) если $t = 0$, то $s = 0$ при любых I ; (11)

б) если $I = 0$, то $s = 0$ при любых t ; (12)

в) если $t = 0$ и $I = 0$, то $s = 0$. (13)

В качестве количественного показателя I в данном случае выступает концентрация вредного вещества C .

Обобщая все вышесказанное, а также учитывая условия (11)–(13) и раскладывая $Z(t, I)$ в ряд Тейлора, получим уравнение состояния опасной системы в следующем виде:

$$s = Z(t, I) = B_1 \cdot t \cdot I + B_2 \cdot t^2 \cdot I + B_3 \cdot t \cdot I^2 + B_4 \cdot t^2 \cdot I^2 + \dots, \quad (14)$$

где B_i – постоянные коэффициенты.

Если ограничиться одним членом ряда в правой части равенства (14), то получим уравнение состояния опасной системы в приближенном виде:

$$t \cdot I = R \cdot s, \quad (15)$$

где константа $R = 1/B_1$ должна являться индивидуальной постоянной для определенного вида опасности (определенного вредного вещества).

Определим константу R для некоторых вредных веществ, используя экспериментальные данные по смертельным воздействиям [12, 13].

Например, при остром воздействии на мышей монооксида углерода в следующих концентрациях C_i : 5000, 4000, 2680, 2230, 1900 и 1780 мг/м³ (экспозиция $t_0 = 2$ часа), наблюдается смертельный эффект, составляющий 100, 80, 60, 50, 20 и 0% соответственно [12]. Точке (t_0, C_i) соответствует некоторый уровень опасности s_i .

Поверхность $s = Z(t, I)$ образована вращением прямой линии, которая характеризуется уравнением $C/2230 = t/120 = s/1000$.

Исходя из того, что при определенных значениях s точки на этой прямой должны принадлежать также и линии (15), можно определить значения коэффициентов R . Численное значение постоянной R зависит от выбора единиц измерения для концентрации, времени и уровня опасности. Принимая для этих величин соответственно единицы измерения мг/м^3 , мин и $^\circ \text{опасности}$, получим размерность коэффициента R в виде: $(\text{мг} \cdot \text{мин}) / (\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{опасности})$. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Токсичность вредных веществ и параметры уравнения (15) для мышей

Вещество	Время экспозиции, смертность	Концентрация вещества при воздействии на мышей (мг/м ³)	Константа R в уравнении (15) при воздействии на мышей
Монооксид углерода	120 мин, 50 %	2230	267,6
Аммиак		4600	552,0
Диоксид азота		900	108,0
Сероводород		1200	144,0
Толуол		32000	3840,0
Бензол		45000	5400,0

Анализ показывает, что точность уравнения (15) достаточно велика, по крайней мере в области смертельных воздействий.

Выводы. Таким образом, приведенные материалы позволяют говорить о возможности построения теории опасности и риска экологических и техногенных систем на основе применения структурно-логической схемы построения моделей, принятой в термодинамике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маршал В. 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. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. - М.: Академия, 2003. – 507 с.
4. Качинський А.Б. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи. - К., 2003.
5. Онищенко Г.Г., Новиков С.М., Рахманин Ю.А., Авалиани С.Л., Буштуева К.А. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. - М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
6. Тихомиров Н.П., Потравный И.М., Тихомирова Т.М. 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 небезпеки. - К.: Основа, 2003. – 191 с.
8. ДСТУ 2156-93. Безпечність промислових підприємств. - К.: Держстандарт України, 1994. – 31 с.
9. CatReg Software. User Manual. Environmental Protection Agency/ Office of research and Development Washington, April 2000.
10. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 383 с.
11. Сычев В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики. - М.: Высшая школа, 1991. – 214 с.
12. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов V-VIII групп: Справочник / В.А. Филов. – Л.: Химия, 1989. – 592 с.
13. Саноцкий И.В., Уланова И.П. Критерии вредности в гигиене и токсикологии при оценке опасности химических соединений. - М.: Медицина, 1975. – 328 с.