

Закономерности формирования опасных процессов в сложных системах

Аверин Г.В., Звягинцева А.В.
Донецкий национальный технический университет,
Zviagintseva@cs.dgtu.donetsk.ua

Abstract

Averin G., Zviagintseva A. "Conformities to the law of dangerous processes forming in the difficult systems" Empirical regularities of dangerous processes forming are studied in nature and tehnosfere, danger and risk of the difficult systems theory development possibility is shown on the thermodynamics system methods application basis.

Введение

Повседневная жизнь человека связана с опасностями и рисками, и сравнительно новая наука – безопасность систем – приобретает все большее значение. Это комплексная и системная наука, охватывающая разные области жизнедеятельности человека и существующая на стыке многих наук, как естественных, так и нет. Данная наука является частью целого научного направления, которое называется общей теорией систем.

Несмотря на развитие многих областей научных исследований, ряд методологических вопросов в теории безопасности систем проработан крайне слабо. Ещё в работе Маршала [1] отмечалось, что одно из наиболее существенных затруднений в обсуждении проблемы опасности и риска связано с отсутствием общей теории, построенной на использовании аналитических методов. Это объясняется тем, что опасности могут существовать во многих формах и проявлять свой разрушительный или вредный потенциал разными способами.

За последние десятилетия основная масса работ исследователей была посвящена изучению опасности различных химических веществ и вызываемых ими негативных последствий – токсикологических, радиационных и тепловых воздействий, острых и смертельных поражений, связанных со взрывами, пожарами, ударными волнами и т.д. Много внимания уделялось также опасности различных природных катаклизмов – землетрясениям, цунами, наводнениям, ураганам и т.д. В этой области накоплен обширный экспериментальный материал, который в настоящее время систематизирован в токсикологии, радиологии, промышленной и экологической безопасности, охране труда, безопасности жизнедеятельности человека, в целом ряде наук о Земле и т.д.

В свою очередь, построение теории опасности и риска возможно только на основе обобщения экспериментально установленных закономерностей формирования опасных процессов в природе и техносфере. В данной области имеется много методологических проблем, которые существуют как в системе понятий и определений, так и в методиках анализа данных и в использовании математического аппарата. Имеющаяся терминология обладает целым рядом недостатков. Так, в настоящее время есть более 25 определений риска и порядка 5-10 наиболее употребляемых определений опасности, отображающих разные подходы к данной проблеме [1-7]. Ряд авторов отмечает, что в данной сфере научной деятельности практически отсутствует общепринятая система терминов и определений. Большинство определений вообще не предполагает дальнейшей формализации понятий в процессе построения теоретических моделей, так как отражает принятую систему взглядов без каких-либо системных обобщений в различных направлениях жизнедеятельности человека. В связи с тем, что не существует точности в определениях, возникает много проблем при обобщении данных и выявлении особенностей и закономерностей опасных процессов.

Вторая сложность данной области научных исследований определяется тем, что имеется слишком большое количество видов опасностей в жизнедеятельности человека. Действие многих опасностей экспериментально исследовано недостаточно полно, что не позволяет использовать методы системного анализа. Кроме того, изучение большинства опасностей относится к предмету исследования различных научных дисциплин, являющихся, в свою очередь, составляющими целого ряда естественных наук. Многие опасности, при своей оценке, требуют анализа экономических, социальных, экологических, демографических и медицинских факторов, что приводит к необходимости использования не только

естественно-научных методов исследования. Подобная ситуация усложняет создание общей теории опасности и риска.

Построение любой теории основано на систематизации экспериментальных данных, установлении базовых эмпирических закономерностей, а также разработке методологии, использующей математический аппарат. Сегодня в безопасности систем выработан ряд общепризнанных положений, обобщение которых помогает продвинуться в решении теоретических проблем в области опасности и риска и тем самым внести вклад в общую теорию систем.

Понятия и определения.

Безопасность систем. На первом этапе следует выделить смысловое содержание основных элементов понятийно-категорийного аппарата, подлежащих в дальнейшем формализации в процессе построения моделей. В настоящее время понятия опасности, риска и ущерба тесно связаны между собой. Основные определения в области безопасности систем имеют следующий смысл.

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. Опасность техногенного характера имеет несколько другое толкование и рассматривается как состояние, внутренне присущее технической системе, промышленному или транспортному объекту и реализуемое в виде поражающих воздействий техногенного источника на человека или окружающую среду в аварийном процессе либо в процессе нормальной эксплуатации объектов.

В таблице 1 приведены наиболее распространенные определения опасности [1, 7-9].

Из приведенных определений видно, что в общей теории систем опасность можно рассматривать как некоторое особое состояние природной или техногенной системы.

Количественное измерение уровня опасности основано на оценке риска.

Риск – вероятность возникновения неблагоприятных эффектов или негативных последствий у живого или материального объекта через действие вредных или опасных факторов окружающей среды.

В таблице 2 приведены наиболее распространенные определения риска [1, 7-9].

Обычно реализация опасного события (или состояния системы), в общем случае, может привести или не привести к ущербу.

Таблица 1. – Существующие определения термина “Опасность”

Термин “Опасность”	Авторы, источник
Опасность – это геологические условия, процесс или потенциально возможное событие, угрожающее здоровью, безопасности и благосостоянию населения или нормальному функционированию экономики и органов управления.	Геологическая служба США
Опасность – это природное или техногенное явление, когда возможно появление событий или процессов, способных поражать людей, причинять материальные ущербы, разрушать окружающую среду.	В. Маршал
Опасность – это явление или ситуация, которая может нанести вред здоровью человека или его безопасности.	Дж. Фиксел
Опасность – это вероятность возникновения в определенный момент времени и в пределах данной территории явления, которое потенциально может поражать людей и нанести материальный ущерб.	Д. Варнес
Опасность – природное или техногенное явление с прогнозируемыми, но неконтролируемыми событиями, способными в определенный момент времени в пределах данной территории нанести вред здоровью людей, вызвать материальные ущербы, разрушить окружающую природную среду.	А.Б. Качинский
Опасность – угроза, возможность причинения ущерба человеку, имуществу и (или) окружающей среде.	[8]
Опасность – совокупность постоянно действующих и случайно возникающих факторов в результате некоторого иницирующего события, либо при некотором стечении обстоятельств, оказывающая негативное воздействие на реципиентов*.	[9]

* реципиент – объект живой или неживой природы (человек, животные, растения, биосфера, материальные ресурсы, здания, сооружения и т.п.).

Ущерб – вред природной среде, потери (убытки) в сфере жизнедеятельности человека, которые возникли вследствие действия вредного или опасного фактора и оцененные в определенном размерном эквиваленте. Например, в денежном выражении, потере количества лет жизни, ухудшении жизненно важных показателей и т.д.

Ущерб обычно рассматривается в виде условной вероятности нанесения вреда объекту в случае реализации некоторой опасности и приведшей к возникновению неблагоприятных эффектов или негативных последствий.

Таким образом, риск в простейшем своем определении – это вероятность реализации опасности, то есть вероятность возникновения

некоторого сложного опасного события (или состояния) в рассматриваемой системе.

Данное событие может нанести или не нанести вред объекту. Для оценки вероятности этого, еще более сложного события, определяется риск совместного появления событий, представляющий собой произведение вероятности реализации опасности на условную вероятность возможного ущерба при условии, что опасное событие произошло.

Таблица 2. – Существующие определения термина “Риск”

Термин “Риск”	Авторы
Риск – это осознанная опасность в какой-либо системе нежелательного события с определенными во времени и пространстве последствиями.	А. Рагозин
Риск – это частота реализации опасности.	В. Маршал
Риск – это вероятность неблагоприятных последствий.	Дж. Фиксел
Риск – это величина, которая определяется как произведение величины вероятности события на меру возможности её наступления.	Е. Мушик, П. Мюлер
Риск – это вероятность потерь, которые могут быть установлены перемножением вероятности (частоты) негативного события на величину возможного ущерба от него.	У. Роуй
Риск – это вероятностная мера возможности реализации опасности в виде определенного ущерба в искусственно созданной действиями субъекта ситуации.	Е.С. Дзекцер
Риск – это количественная мера опасности, определяемая как произведение вероятности негативного события на вероятность возможного ущерба от него.	А.Б. Качинский
Риск – это степень вероятности определенного отрицательного события, которое может состояться в определенное время или при определенных обстоятельствах.	[8]
Риск – это вероятность реализации потенциальной опасности, которая инициируется опасным объектом, и (или) негативных последствий этой реализации.	[9]

Как видно из приведенных выше определений, в общем случае можно сказать, что риск представляет собой вероятность реализации определенных опасных состояний системы, образованной по принципу выделения окружающей среды, формирующей опасность, и объекта, у которого наблюдаются неблагоприятные эффекты и негативные последствия от действия этой опасности.

Только на основе рассмотрения окружающей среды и объекта как целостной системы можно сформировать основные

положения теории опасности и риска.

Термодинамика. В настоящее время общая теория систем не имеет моделей, позволяющих подойти к системному анализу с такой методологией, которая, например, принята в термодинамике. Термодинамика изучает макросистемы – физические тела конечных размеров. Без использования термодинамического подхода невозможно построить аппарат общей теории систем. Однако метод термодинамики не должен буквально переноситься в новую область исследований, идейно должна использоваться только структурно-логическая схема построения моделей.

Базовым понятием термодинамики является определение термодинамической системы.

Термодинамическая система – это упорядоченное множество структурно взаимосвязанных и функционально взаимодействующих макроскопических тел и полей физической природы, которые могут представлять собой целостный объект и обмениваться энергией как между собой, так и с внешней средой.

В термодинамическую систему обычно не включается внешняя среда, которая лежит за пределами границ рассматриваемой системы.

Состояние системы – это мгновенная оценка совокупности значений величин, характерных для данной системы и называемых термодинамическими параметрами. Переходы из одного состояния в другое определяют поведение системы и именуются процессами. Процессы могут быть как равновесными, так и неравновесными [10, 11]. Если хотя бы один из параметров состояния изменяется, то меняется в целом и состояние системы. В этом случае говорят, что происходит термодинамический процесс, представляющий собой совокупность изменяющихся равновесных состояний системы.

Возможность существования равновесных состояний характеризуется термодинамической вероятностью. Данную вероятность в термодинамике определяют на основе использования методов статистической физики. Для оценки этой величины вводятся понятия макросостояний и микросостояний. Вероятность макросостояния (некоторого состояния системы) определяется по числу тех микросостояний, которые реализуют данное макросостояние [10, 11]. Термодинамическая вероятность в состоянии равновесия системы достигает максимальных значений.

Обычно за термодинамическую вероятность принимают относительную вероятность $W = P/P_0$, указывающую во сколько раз математическая вероятность P

рассматриваемого макросостояния больше, чем математическая вероятность P_0 другого стандартного макросостояния, а именно такого макросостояния, которому отвечает только одно микросостояние. Фундаментальной гипотезой, позволяющей строго обосновать понятие термодинамической вероятности, является положение, что все микросостояния являются равновероятными с математической точки зрения. Данное положение приводит к эргодической гипотезе – с течением времени система должна пройти через все микросостояния, отвечающие заданным макроскопическим условиям.

Для подсчета термодинамической вероятности существуют разные подходы. Известны способы определения этой величины по методам Больцмана, Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака, основанные на комбинаторной статистике [10]. Однако главное место в статистической физике занимает метод ансамблей, предложенный Гиббсом. В свое время Эйнштейн также предложил метод определения термодинамической вероятности, использующий общепринятые основы статистики, однако этот метод не получил математического развития.

Методы определения вероятности основаны на умозрительных гипотезах распределения молекул по фазовому пространству, которые отвечают основным термодинамическим представлениям о существовании и поведении вещества. Необходимость теоретического определения вероятности связана с отсутствием возможности непосредственной экспериментальной оценки вероятностей состояний термодинамических систем в равновесных условиях. В экспериментальной термодинамике эту величину можно косвенно определить вычислением энтропии по температурному ходу теплоемкости на основе теплового закона Нернста.

Следует отметить, что одно из основных соотношений термодинамики, связывающее термодинамическую вероятность W с энтропией системы S :

$$S = k \cdot \ln W \quad (1)$$

носит фундаментальное значение для понимания многих процессов в общей теории систем. Соотношение (1) указывает на то, что существует некоторая однозначная аддитивная функция состояния, получаемая с помощью нелинейного преобразования распределения вероятности состояний системы.

Общий термодинамический метод, лежащий в основе исследования взаимодействий системы с окружающей средой предполагает, что каждому взаимодействию особого рода приводится в соответствие некоторая физическая величина – координата

состояния. Общему покою системы отвечает постоянство координат состояния. Соответствующей координате отвечает одна степень свободы системы. Каждому воздействию данного рода и, следовательно, каждой координате, устанавливают в соответствие также некоторую физическую величину – потенциал взаимодействия. 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. Основное уравнение для изменения внутренней энергии (U) системы в качестве фундаментального закона через потенциалы и координаты представляется в следующем виде:

$$dU = \sum_{k=1}^n P_k dx_k . \quad (2)$$

Внутренняя энергия в термодинамике имеет глубокий физический и математический смысл. Следствием этого является факт того, что существует однозначная функция координат состояния, дифференциал которой равен сумме всех элементарных количеств воздействий разного рода. Если внутренняя энергия известна как функция координат состояния, т.е. определен вид зависимости $U = U(x_1, x_2, \dots, x_n)$, то потенциалы могут быть выражены через уравнения состояния:

$$P_k = P_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\frac{\partial U}{\partial x_k} \right)_{x_i} . \quad (3)$$

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 приведенные выше соотношения (1) – (3),

дополненные методами определения термодинамической вероятности и целым рядом эмпирических закономерностей и уравнений состояний, и образуют математический аппарат термодинамики. Теоретической базой большинства дифференциальных уравнений термодинамики является теория дифференциальных пфаффовых форм [12].

Развитие термодинамического метода или аналогичных ему подходов в других областях знаний является актуальной задачей при изучении сложных систем.

Общая теория систем. В настоящее время большое внимание уделяется изучению сложных систем. Система в смысловом определении – целое, состоящее из частей (от греч.) Подавляющее большинство физических, экологических, экономических и социальных систем относятся к категории сложных. Каждая из таких систем характеризуется своим определенным набором свойств и закономерностей, а также особенностями перехода из одного состояния в другое. Определение “Сложная система” относится к ключевым понятиям природных, технических, экономических и социальных наук.

Сложная система – любая вещественно-энергетическая или концептуальная совокупность взаимосвязанных составляющих, объединенных прямыми и обратными связями в некоторое единство (Н.Ф. Реймерс).

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 превышают или не достигают заданных пороговых значений, а возможно также попадают в определенный нежелательный диапазон.

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

Опасное состояние системы формируется под действием окружающей среды, однако в безопасности систем окружающая среда часто не является по отношению к системе внешней средой. То есть опасная система обычно состоит из объекта и окружающей этот объект среды, причем объект чаще всего относится к элементам живой природы.

Обобщая приведенные определения и термины, 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.

Таким образом, опасность окружающей среды реализуется через опасный фактор, который может характеризоваться несколькими параметрами.

Исходя из вышесказанного, сформируем понятие опасной системы в следующем виде.

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.

Таким образом, опасность, в целом, являясь, важной категорией теории безопасности, определяется множеством однотипных опасных состояний системы, определенным образом выделенных по значениям параметров фактора опасности из общего множества всех состояний.

Из данных выводов следует, что изучение связей между опасностью и риском возможно при наличии описания поведения сложной системы, которая в определенных условиях может переходить в опасное состояние.

В общей теории систем, в отличие от термодинамики, принято, что состояния сложных систем определяются целым набором показателей и характеристик (параметров), которые динамически меняются во времени, поддерживая тем самым устойчивое состояние гомеостаза. Динамика гомеостаза в принципе не предполагает возможность существования равновесных состояний.

Известно, что гомеостаз представляет собой устойчивое динамическое равновесие, или, иначе, динамическое относительное постоянство состава и свойств системы.

Каждое состояние системы, которое характеризуется определенными значениями параметров, определяется также и вероятностью его существования. Можно считать, что опасные состояния системы – это те состояния системы, которые существенно отличаются по параметрам от наиболее вероятных и устойчивых состояний гомеостаза.

Из имеющихся определений в безопасности систем следует, что риск является интегрирующим понятием и служит мерой значимости нанесенного ущерба и вероятности реализации опасности для того или иного воздействия. В свою очередь, при системном подходе риск определяет вероятность возникновения опасных состояний системы, представляющих собой последовательность сложных событий, и приведших к определенному ущербу. В этом случае риск характеризует особые состояния сложной системы, которые по показателям безопасности выделяют 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 τ_k к общей длительности наблюдения τ при условии, что общая длительность наблюдений чрезвычайно велика:

$$W_k = \frac{\tau_k}{\tau}. \quad (4)$$

Данный подход широко используется при осуществлении “пассивных” экспериментов, когда существует возможность длительного наблюдения за поведением сложной системы. 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):

$$W_k = \frac{n_k}{n}, \quad (5)$$

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.

Таким образом, методы оценки вероятностей состояний систем широко применяются в различных областях знаний, что дало возможность накопить значительный эмпирический материал.

Эмпирические закономерности формирования опасных процессов

Основные эмпирические закономерности в этом случае заключаются в следующем.

Опасные факторы и их параметры. Как уже указывалось, любая опасность может характеризоваться целым рядом параметров – соответствующих показателей и характеристик, определяющих опасный фактор.

В простейшем случае опасность характеризуется одним количественным показателем и временем действия опасного фактора. Время, как опасный параметр воздействия, присутствует практически во всех случаях реализации опасности. Именно в этой части лежат существенные отличия, связанные с применением методологии термодинамики в общей теории систем. Таким образом, любая опасность будет характеризоваться как минимум двумя параметрами опасного фактора – количественным показателем воздействия и временем действия опасного фактора.

Время действия для различных факторов опасности разное: от миллисекунд при взрывах до десятков лет при химических воздействиях, связанных с загрязнением среды.

Для примера характеристика некоторых опасных факторов приведена в таблице 3.

При термических воздействиях, связанных с действием теплового излучения, в качестве количественного показателя опасности используют тепловой поток [3]. При воздействиях факторов взрыва – избыточное давление во фронте ударной волны; в свою

очередь, при токсических поражениях – концентрацию вредного вещества, при радиационных поражениях – удельную энергию излучения и т.д.

Таблица 3. – Опасные факторы и их основные количественные показатели

Виды опасностей	Опасные факторы	Показатели
Землетрясение	сейсмическая активность	интенсивность землетрясения
Цунами	ударная волна	удельная кинетическая энергия волны
Тепловые волны	низкая и высокая температура атмосферы	температура
Наводнения	опасные изменения среды обитания	площадь затопления территории, высота (уровень) подъема воды
Ураганы	метеорологические условия	скорость ветра, количество осадков, температура
Извержение вулканов	сейсмическая активность, тепловое излучение, загрязнение среды	интенсивность землетрясения, плотность теплового потока, концентрации вредных веществ в атмосфере
Взрывы	воздушная ударная волна	избыточное давление во фронте воздушной ударной волны
Пожары	тепловое излучение	плотность теплового потока
Радиационная опасность	радиоактивное излучение	удельная энергия излучения
Химическая опасность	химическое загрязнение среды	концентрации вредных веществ в окружающей среде
Биологическая опасность	биологическое загрязнение среды	показатели биологического загрязнения среды
Вибрации	механические колебания среды	уровень виброскорости (виброускорения), частота вибрации
Шум	звуковое воздействие	уровень звукового давления, частота звука
Электро-опасность	электрическое воздействие	сила электрического тока

Во многих областях теории безопасности применяется понятие комплексного показателя опасности, который задается пробитом. Данный показатель эмпирически через параметры фактора опасности определяется как:

$$Pr ob = \alpha_g + \beta_{1g} \cdot \ln I + \beta_{2g} \cdot \ln \tau, \quad (6)$$

где I – количественный показатель опасности, τ – время действия опасности.

Использование комплексного показателя опасности в виде (6) связано с эмпирической закономерностью, которая характерна для действия многих опасностей (химических и радиационных поражений, воздействий взрывов, пожаров и т.п.).

Суть данной закономерности заключается в том, что произведение количественного показателя опасности, возведенного в степень, и длительности воздействия есть величина постоянная при получении эффекта определенной степени тяжести g :

$$I^n \cdot \tau = const = Z(g), \quad (7)$$

где n – показатель, характеризующий определенный вид опасных процессов.

При ранжировании опасностей одного класса часто применяется пороговый принцип, определяющий безопасную границу опасного процесса:

$$HI_i = I_i / P_i, \quad (8)$$

где P_i – порог (уровень) безопасного воздействия i -той опасности определенного класса, заданный в тех же единицах, что и количественный 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 [8, 9, 13, 14]:

$$HI = \sum_{i=1}^m HI_i. \quad (9)$$

В теории безопасности существуют различные методы оценки, которые используют те или иные индексы опасности при установлении риска различных видов воздействий на население, персонал или природную среду. Примерами таких показателей являются индекс Доу [14], который применяется при оценке рисков пожароопасности и взрывоопасности, коэффициент пороговой массы опасных веществ [3, 9], используемый при оценках опасности объектов повышенной опасности, индексы опасности токсикологических воздействий [13], пороговые уровни выбросов вредных веществ в атмосферный воздух и т.д.

Если считать, что в основе многих опасных процессов лежит закономерность (7), а комплексный показатель опасности $Pr ob$ существует и ему присуща закономерность аддитивности в виде:

$$Pr ob(Z) = Pr ob(\tau) + Pr ob(I_i), \quad (10)$$

где величина $Pr ob$ является функцией

показателя опасности I_i и длительности воздействия τ для определенной категории эффекта g , то функциональный вид величины $Pr ob$ определяется из решения дифференциального уравнения вида:

$$Pr ob''(Z) \cdot Z + Pr ob'(Z) = 0. \quad (11)$$

Уравнение (11) получают последовательным дифференцированием зависимости (10) по I_i и τ . Известно [11], что решение (11) представляется в виде:

$$Pr ob = \alpha_g + n \cdot \beta_{2g} \cdot \ln I + \beta_{2g} \cdot \ln \tau. \quad (12)$$

Таким образом, существование показателя опасности вида (6) определяется закономерностью (7). Аналогичным образом в термодинамике уравнение состояния вида $P \cdot v \cdot T^{-1} = const$ определяет вид функции энтропии, которая является аддитивной величиной и также описывается логарифмической функцией относительно термодинамических параметров [10, 11].

Возможно, многим процессам в природе присуща структурная симметрия, когда на нижнем параметрическом уровне описания системы (уравнения состояния) существуют мультипликативные закономерности, а на следующем, более высоком функциональном уровне описания (законы сохранения субстанций), – аддитивные закономерности, и т.д.

Вероятности и риски. Риски реализации опасности и нанесения ущерба объекту являются вероятностями сложных событий, в связи с чем в этой области справедливы положения теории вероятности. Вероятность состояний системы и её связь с параметрами состояния – это та основа, на которой может быть построена теория опасности и риска. В этом плане следует ориентироваться на формулировку второго закона термодинамики, данной в свое время Больцманом: природа стремится от состояний менее вероятных к состояниям более вероятным.

За конкретный период времени риски могут рассматриваться как вероятности совместных зависимых или независимых сложных событий. Риски в различные периоды времени могут определяться как вероятности возникновения несовместных событий. Сложность проблемы состоит в классификации соответствующих рисков и определении рисков опасных событий на множестве большого количества тождественных событий, которые могут быть как опасными, так и неопасными.

В классическом определении риск представляет собой вероятность реализации опасного события, приведшего к определенному ущербу или негативным последствиям и определяется согласно следующего уравнения:

$$R(j) = \sum_{i=1}^m W_j(I_i) \cdot P_j(I_i), \quad (13)$$

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

С другой стороны риск, как вероятность реализации сложного события, связан с опасностью, которая может быть измерена или подходящим образом количественно определена, а также со временем, которое характеризует длительность воздействия опасного фактора [1-4, 13]:

$$R = f(I, \tau). \quad (14)$$

В классическом определении риска на основе зависимости (13) риск рассматривается как вероятность реализации сложного опасного события [15], состоящего из более простых событий. При этом используется формула для определения полной вероятности [15]. То есть некоторое событие, связанное с нанесением вреда объекту, наступает вместе с одним из событий j реализации опасности, образующих полную группу несовместных событий.

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 $n \times m$ -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 , определенная согласно уравнений (5) или (4) по всем n системам. Соответствующее количество систем n_k , находящихся в определенном k -ом состоянии с параметрами $I_i + dI_i$ и $\tau + d\tau$ определяется эмпирически по опытным данным. Все события в этом случае образуют полную группу несовместных событий, так как $\sum_{k=1}^n W_k = 1$. Оценка вероятности W_k проводится динамически во времени при выбранных значениях показателя I_i до достижения системами определенной статистически значимой категории эффекта g .

Например, в токсикологии при оценке токсикологических 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 концентрациями вещества. В каждый бокс помещается группа живых объектов (крысы, мыши, кролики и т.д.) и 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. При этом появление неблагоприятных эффектов не является равновероятным. Таким образом, в токсикологии, в отличие от термодинамики, статистическая оценка вероятностей состояний проводится эмпирически без привлечения различных гипотез о взаимосвязи микро- и макросостояний.

Обработка экспериментальных данных, характеризующих опасные процессы, позволила выработать общую методику эмпирического анализа опасностей. Построение эмпирических моделей риска обычно проводится в координатах $Pr ob - \ln I$ или $Pr ob - \ln \tau$. Инверсное преобразование рисков в пробит-функцию выполняется с учетом уравнения (15), определяющего функцию нормального распределения:

$$R(Pr ob) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr ob} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (15)$$

Данная методика при обработке опытных данных позволяет получить линейные уравнения в преобразованной системе координат “риск-опасность” для многих опасных процессов. В отдельных случаях при обработке используются также инверсные преобразования для распределения Вейбулла, логистического распределения и т.д.

Методика подобной обработки данных учитывает базовую закономерность, свойственную многим случайным опасным процессам, имеющим тот или иной вид вероятностного распределения. Например, в методологии оценки риска здоровью и жизни людей при воздействии химических веществ сегодня широко используют логарифмически-нормальное распределение. 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. Основные виды вероятностных распределений для разных видов опасностей даны в таблице 4.

Таблица 4. Опасные факторы и виды распределений

Виды опасностей	Вероятностные распределения	
	опасного показателя или события	последствий реализации опасности
Землетрясения, цунами, наводнения	логарифмически-нормальное, Вейбулла, степенное с “тяжелыми хвостами”	Парето, распределения с “тяжелыми хвостами”
Ураганы	Пуассона, степенное распределение с “тяжелыми хвостами”	Парето, распределения с “тяжелыми хвостами”
Извержение вулканов	логарифмически-нормальное, Вейбулла	Парето, распределения с “тяжелыми хвостами”
Взрывы	Пуассона, логарифмически-нормальное	Парето, Вейбулла, гамма-распределение
Пожары	Пуассона, логарифмически-нормальное, Вейбулла	Парето, гамма-распределение
Крупные производственные аварии	Пуассона, Вейбулла, гамма-распределение	логарифмически-нормальное, Вейбулла, гамма-распределение
Радиационная опасность	логарифмически-нормальное	логарифмически-нормальное
Химическая опасность	логарифмически-нормальное	логарифмически-нормальное, логистическое, Вейбулла
Биологическая опасность	логарифмически-нормальное	Парето, логарифмически-нормальное

Оценка риска часто проводится по категориям негативных эффектов или ущербов. При токсикологическом действии веществ – это хроническое, рефлекторное, острое или смертельное воздействие; 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. При этом тяжесть эффектов связана с параметрами опасного фактора.

Например, при загрязнении атмосферного воздуха опасность для здоровья населения, обусловленная превышением $ПДК_{c.c.i}$, может быть оценена на основе зависимости риска тяжести эффектов от уровня опасности во всем диапазоне эффективных концентраций: от смертельных до пороговых или максимальных недействующих. Мерой условного риска, в этом случае, является функция относительной вероятности эффекта определенной степени тяжести R_u , которая имеет вид:

$$R_u = a_i + b_i \cdot \ln C_i = b_i' \cdot \ln(C_i / ПДК_{c.c.i}), \quad (16)$$

где R_u – условный риск, равный отношению вероятности более тяжелых категорий эффекта W_g к вероятности безопасного уровня W_0 ($R_u = W_g / W_0$); C_i , $ПДК_{c.c.i}$ – соответственно концентрация и предельно допустимая концентрация вредного вещества.

С увеличением продолжительности воздействия риск и тяжесть эффектов либо возрастают, либо остаются на уровне, наблюдавшемся при исходном времени воздействия данной концентрации [16]. Коэффициенты уравнения (16) оцениваются с учетом индивидуальных свойств каждого опасного вещества.

То есть степень тяжести эффекта может быть измерена в определенной относительной количественной шкале, которая линейна по отношению к некоторой базовой точке отчета.

Аналогичные закономерности следуют также из так называемых моделей категорийной регрессии для оценки тяжести различных видов опасных и вредных эффектов [17]. При этом используются два типа моделей. В первом случае в уравнении (6) коэффициенты β_{1g} и β_{2g} принимаются постоянными для всех видов негативных эффектов (например, слабый, умеренный и выраженный вредные эффекты). Величина α_g задается для определенного эффекта константой, причем $|\alpha_1| > |\alpha_2| > |\alpha_3|$ при увеличении степени тяжести эффекта. Во втором случае величины α_g , β_{1g} и β_{2g} принимаются для конкретного вида эффекта g постоянными. Модели категорийной регрессии строятся по экспериментальным данным для всех опасных веществ, при воздействии которых на человека и животных наблюдаются вредные и опасные эффекты.

Учитывая большую неопределенность данных при негативных воздействиях химических опасностей экспериментально пока не удастся определить параметры зависимостей величин α_g , β_{1g} и β_{2g} от вида эффекта.

Таким образом, следствием вышеприведенных закономерностей является вывод о том, что зависимость (6) при конкретных значениях коэффициентов α_g , β_{1g} и β_{2g} справедлива для определенных видов вредных эффектов. При качественном изменении вида эффекта значения коэффициентов могут меняться, однако линейность уравнения (6) относительно переменных $\ln I$ и $\ln \tau$ сохраняется.

Другим следствием является допущение об аддитивности величины $Pr ob$, когда:

$$Pr ob_g = Pr ob_{g-1,0} + Pr ob. \quad (17)$$

То есть показатель опасности более тяжелой категории эффекта $Pr ob_g$ может определяться некоторым принятым началом отчета $Pr ob_{g-1,0}$, характерным для данной или более низкой категории.

Исходя из этих следствий, уравнение (6) можно записать следующим образом:

$$Pr ob = \alpha(g) + \beta_1(g) \cdot \ln I + \beta_2(g) \cdot \ln \tau. \quad (18)$$

В данном случае переменная g представляет собой относительный количественный показатель, характеризующий степень тяжести эффекта.

Из приведенного выше материала видны определенные системные аналогии с термодинамикой. Количественный показатель тяжести эффекта есть мера нанесенного ущерба, заданная в относительных величинах.

В термодинамике также есть относительная величина, которая является параметром состояния системы и определяет степень нагрева тела. Все эксперименты в области термодинамики тем или иным образом касаются измерений температуры. Качественное представление о температуре связано с категориями “горячо” и “холодно”. Это представление вполне привычно, так как отражает одну из основных закономерностей, которой пользуется человечество при описании явлений природы. Степень нагрева тела является относительной величиной, так как термодинамические шкалы температур привязываются к определенным реперным точкам. Например, в стоградусной термодинамической шкале (шкале Цельсия) точка кипения воды принимается за 100 °С, а точка плавления льда – за 0 °С. В качестве других реперных точек применяют точки плавления различных чистых веществ, например, ртути, сурьмы, серы, цинка, золота и т.д. Шкалы температур бывают различны, например: Цельсия (°С), Фаренгейта (°F), Ренкина (°Ra), Реомюра (°Ra), абсолютная шкала температур Кельвина (°К). Однако из применения шкал температур следует, что все

термодинамические воздействия системно оцениваются по степени нагрева тела с помощью относительной величины, которая называется температурой. Эта величина комплексно оценивает воздействия на систему. Постоянное значение температуры указывает на отсутствие любых воздействий на систему и постоянство всех других параметров системы.

Показатель тяжести эффекта (g) также является 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 (хроническое воздействие) также можно наблюдать указанные вероятности, но при других временах воздействий и концентрациях вредного вещества. В этом случае для параметрического описания состояний всего ансамбля систем необходимо использовать три параметра, а именно величины I, τ, g . В указанном случае, поскольку все параметры состояния системы “равноправны” с точки зрения определения состояния системы, то категория тяжести эффекта будет однозначно определена следующим соотношением:

$$F(I, \tau, g) = 0, \quad (19)$$

которое является уравнением состояния опасной системы. При этом параметры I и τ определяют состояние опасной системы при реализации опасности, а параметр g – тяжесть эффекта в случае нанесения ущерба объекту воздействия при реализации опасности.

Системные закономерности формирования опасных процессов

Изучим возможность существования системных закономерностей при формировании опасных процессов на примере воздействий, связанных с опасными химическими веществами.

С определенными допущениями величины $Pr ob$ в этом случае можно считать полными дифференциалами (функциями состояния), так как получение определенного негативного эффекта для объекта воздействия не зависит от пути перехода объекта из состояния 1 в состояние 2. В качестве примера – смертельный эффект с определенной вероятностью может быть достигнут как при длительном действии сравнительно малых концентраций вредного вещества на живой объект, так и при кратковременном действии

очень высоких концентраций.

Исходя из приведенных выше обобщений в области опасности и риска, следует закономерность вида:

$$d Pr ob = \frac{dR}{U}, \quad (20)$$

где U – нелинейная функция, представляющая собой интегрирующий множитель для функции риска, который в первом приближении может быть задан в виде плотности нормального распределения. В общем случае характер зависимости для этой функции определяется видом опасности, и, в частности, соответствующим эмпирическим распределением.

Непосредственно измерить комплексный показатель опасности $Pr ob$ нельзя. Однако его можно определить расчетным путем. Для оценки опасных процессов представляет интерес не абсолютное значение показателя опасности, а его изменение при воздействиях. Поэтому необходимо пользоваться относительным значением $Pr ob$, определенным от некоторой произвольно выбранной точки отчета.

Если известно значение $Pr ob_{g0}$ для начальной области той или иной категории эффекта, то комплексный показатель опасности с другими параметрами (например, при концентрации вредного вещества C и длительности воздействия τ) может быть определен из следующего соотношения:

$$Pr ob(C, \tau) = Pr ob_{g0}(C_0, \tau_0) + \int_{C_0}^C \left(\frac{\partial Pr ob}{\partial C} \right)_{\tau, g} dC + \int_{\tau_0}^{\tau} \left(\frac{\partial Pr ob}{\partial \tau} \right)_{C, g} d\tau. \quad (21)$$

Первый интеграл в правой части этого уравнения представляет собой величину показателя опасности при изменении значения концентрации опасного вещества от C_0 до C . Второй интеграл представляет собой величину показателя опасности при изменении времени воздействия от τ_0 до τ . При этом справедливы следующие уравнения:

$$\left(\frac{\partial Pr ob}{\partial C} \right)_{\tau, g} = \frac{\beta_{1g}}{C} \quad \text{и} \quad \left(\frac{\partial Pr ob}{\partial \tau} \right)_{C, g} = \frac{\beta_{2g}}{\tau}. \quad (22)$$

В рамках одной категории эффекта, изменение показателя опасности, с учетом (6), будет иметь следующий вид:

$$Pr ob - Pr ob_{g0} = \beta_{1g} \cdot \ln \frac{C}{C_0} + \beta_{2g} \cdot \ln \frac{\tau}{\tau_0}, \quad (23)$$

где C_0, τ_0 – некоторое начальное значение концентрации и времени, характеризующее получение определенной тяжести эффекта с заданной вероятностью, например, 5-10 %. Таким образом, в качестве

величины $Pr ob_{g_0}$ можно задавать значение показателя опасности для определенных порогов воздействия соответствующей категории тяжести эффекта.

Из данных результатов следуют определенные аналогии с термодинамическими методами расчета энтропии вещества. По крайней мере при определении комплексного показателя опасности $Pr ob$ может быть использована соответствующая методика и принятая логическая схема.

Обобщая все вышесказанное и учитывая зависимости (7) и (19), получим уравнение состояния опасной системы в следующем виде:

$$\tau \cdot I^n = Z(g) = B_0 + B_1 \cdot g + B_2 \cdot g^2 + \dots, \quad (24)$$

где B_i – виртуальные коэффициенты.

Если считать, что при $\tau = 0$ и $I = 0$ показатель тяжести эффекта g равен нулю и ограничиться одним членом ряда в правой части равенства (24), то получим уравнение опасной системы в приближенном виде:

$$\tau \cdot I^n = B \cdot g, \quad (25)$$

где константа B должна являться индивидуальной постоянной для определенного вида опасности.

Создание теории опасности и риска необходимо начинать с установления эмпирических уравнений вида (24) или (25). Таким образом, можно предложить следующую методику обработки токсикологических данных, суть которой заключается в следующем.

По аналогии с температурой следует ввести относительную шкалу опасности, для чего установить соответствие показателя степени тяжести эффекта g и определенных реперных точек. Например, при $\tau = 0$ и $I = 0$ принять $g = 0^\circ$, а для эталонного опасного вещества и некоторых значений τ и I , при которых наблюдается некоторый эффект, принять $g = 100^\circ$. Все остальные вещества необходимо “привязать” по категориям эффектов к данной шкале опасности. Специфику и меру опасного воздействия различных вредных веществ в данной шкале следует определить по экспериментальным данным с учетом уравнений (24) или (25). Такая обработка данных позволит получить универсальное уравнение состояния для подобной опасной системы.

Приведенные материалы позволяют говорить о возможности построения теории опасности и риска сложных систем на основе применения структурно-логической схемы построения моделей, принятой в термодинамике.

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. – 507с.
4. А.Б. Качинський. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи. К., 2003. – 472 с.
5. Быков А., Мурзин Н. Проблемы анализа безопасности человека, общества и природы. СПб.: Наука, 1997. – 247 с.
6. Управление риском в социально-экономических системах: концепция и методы её реализации. Ч. 1. // Пробл. безопасности при чрезв. ситуациях. 1995. – № 11. – С. 3-35.
7. А.Б. Качинський. Екологічна безпека України. Системний аналіз перспектив покращення. К.: НІСД, 2001. – 312 с.
8. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування об'єктів підвищеної небезпеки. – К.: Основа, 2003. – 191 с.
9. ДСТУ 2156-93. Безпечність промислових підприємств. К.: Держстандарт України, 1994. – 31 с.
10. К.А. Путилов. Термодинамика. М.: Наука, 1971. – 374 с.
11. В.А. Кирилин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 448 с.
12. В.В. Сычев. Дифференциальные уравнения термодинамики. М.: Вс. шк., 1991. – 214 с.
13. Г.Г. Онищенко, С.М. Новиков, Ю.А. Рахманин и др. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
14. Н.П. Тихомиров, И.М. Потравный, Т.М. Тихомирова. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками. М.: Юнити-Дана. 2003. – 350 с.
15. Е.С. Венцель. Теория вероятности. М.: Наука, 1971. – 576 с.
16. Румянцев Г.И., Новиков С.М. Проблемы прогнозирования токсичности и риска воздействия химических веществ на здоровье населения // Гигиена и санитария. – 1997, № 6. – С. 13 – 18.
17. CatReg Software. User Manual. Environmental Protection Agency. April 2000.