

1.3. Основные положения теории риска

Понятие риска. Виды риска

Специалисты различных отраслей промышленности постоянно оперируют не только определением «**опасность**», но и таким термином, как «**риск**». В научной литературе встречается весьма различная трактовка термина «**риск**», и в него иногда вкладываются отличающиеся друг от друга содержания.

Например, риск в терминологии страхования используется для обозначения предмета страхования (промышленного предприятия или фирмы), страхового случая (наводнения, пожара, взрыва и пр.), страховой суммы (опасности в денежном выражении) или же как собирательный термин для обозначения нежелательных или неопределенных событий. Экономисты и статисты, сталкивающиеся с этими вопросами, понимают риск как меру возможных последствий, которые проявятся в определенный момент в будущем. В психологическом словаре риск трактуется как действие, направленное на привлекательную цель, достижение которой сопряжено с элементами опасности, угрозой потери, неуспеха, либо как ситуативная характеристика деятельности, состоящая в неопределенности ее исхода и возможных неблагоприятных последствиях в случае неуспеха, либо как мера неблагоприятия при неуспехе в деятельности, определяемая сочетанием вероятности и величины неблагоприятных последствий в этом случае. Ряд трактовок раскрывает риск как вероятность возникновения несчастного случая, опасности, аварии или катастрофы при определенных условиях (состоянии) производства или окружающей человека среды.

Общим во всех приведенных представлениях является то, что риск включает неуверенность, произойдет ли нежелательное событие и возникнет ли неблагоприятное состояние. В соответствии с современными взглядами риск обычно интерпретируется как вероятностная мера возникновения техногенных или природных явлений, сопровождающихся возникновением, формированием и действием опасностей и нанесенного при этом социального, экономического, экологического и других видов ущерба и вреда.

*Под **риском** следует понимать ожидаемую частоту или вероятность возникновения опасностей
определенного класса,
или же размер возможного ущерба (потерь, вреда) от нежелательного события,
или же некоторую комбинацию этих величин.*

Применение понятия риск, таким образом, позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий. Риск, фактически, есть мера опасности. Часто используют понятие «**степень риска**» (*Level of risk*), по сути не отличающееся от понятия риск, но лишь подчеркивающее, что речь идет об измеряемой величине. Все названные (или подобные) интерпретации термина «**риск**» используются в настоящее время при анализе опасностей и управлении безопасностью (риском) технологических процессов и производств в целом.

Формирование опасных и чрезвычайных ситуаций — результат определенной совокупности факторов риска, порождаемых соответствующими источниками. Таким событием может быть ухудшение здоровья или смерть человека, авария или катастрофа технической системы или устройства, загрязнения или разрушение экологической системы, гибель группы людей или возрастание смертности населения, материальный ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличение затрат на безопасность.

Каждое нежелательное событие может возникнуть по отношению к определенной жертве — **объекту риска**. Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать **индивидуальный, технический, экологический, социальный и экономический риски**. Каждый вид его обуславливают характерные источники и факторы риска, классификация и характеристика которого приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Классификация и характеристика видов риска

Вид риска	Объект риска	Источник риска	Нежелательное событие
Индивидуальный	Человек	Условия жизнедеятельности человека	Заболевание, травма, инвалидность, смерть
Технический	Технические системы и объекты	Техническое несовершенство, нарушение правил эксплуатации технических систем и объектов	Авария, взрыв, катастрофа, пожар, разрушение
Экологический	Экологические системы	Антропогенное вмешательство в природную среду, техногенные чрезвычайные ситуации	Антропогенные экологические катастрофы, стихийные бедствия
Социальный	Социальные группы	Чрезвычайная ситуация, снижение качества жизни	Групповые травмы, заболевания, гибель людей, рост смертности
Экономический	Материальные ресурсы	Повышенная опасность производства или природной среды	Увеличение затрат на безопасность, ущерб от недостаточной защищенности

Индивидуальный риск обусловлен вероятностью реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций. Его можно определить по числу реализовавшихся факторов риска:

$$R_u = P(t)/L(f),$$

где: R_u — индивидуальный риск; P — число пострадавших (погибших) в единицу времени t от определенного фактора риска f ; L — число людей, подверженных соответствующему фактору риска f в единицу времени t .

Источники и факторы индивидуального риска приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Источники и факторы индивидуального риска

Источник индивидуального риска	Наиболее распространенный фактор риска смерти
Внутренняя среда организма человека	Наследственно-генетические, психосоматические заболевания, старение
Виктимность	Совокупность личностных качеств человека как жертвы потенциальных опасностей
Привычки	Курение, употребление алкоголя, наркотиков, иррациональное питание
Социальная экология	Некачественные воздух, вода, продукты питания; вирусные инфекции, бытовые травмы, пожары

Профессиональная деятельность	Опасные и вредные производственные факторы
Транспортные сообщения	Аварии и катастрофы транспортных средств, их столкновения с человеком
Непрофессиональная деятельность	Опасности, обусловленные любительским спортом, туризмом, другими увлечениями
Социальная среда	Вооруженный конфликт, преступление, суицид, убийство
Окружающая природная среда	Землетрясение, извержение вулкана, наводнение, оползни, ураган и другие стихийные бедствия

Индивидуальный риск может быть добровольным, если он обусловлен деятельностью человека на добровольной основе, и вынужденным, если человек подвергается риску в составе части общества (например, проживание в экологически неблагоприятных регионах, вблизи источников повышенной опасности).

Технический риск — комплексный показатель надежности элементов техносферы. Он выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений:

$$R_T = T(t)/T(f),$$

где: R_T — технический риск; T — число аварий в единицу времени t на идентичных технических системах и объектах; T — число идентичных технических систем и объектов, подверженных общему фактору риска f .
Источники и факторы технического риска приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Источники и факторы технического риска

Источник технического риска	Наиболее распространенные факторы технического риска
Низкий уровень научно-исследовательских работ	Ошибочный выбор направлений развития техники и технологии по критериям безопасности
То же, опытно-конструкторских работ	Выбор потенциально опасных конструктивных схем и принципов действия технических систем. Ошибки в определении эксплуатационных нагрузок. Неправильный выбор конструкционных материалов. Недостаточный запас прочности. Отсутствие в проектах технических средств безопасности
Опытное производство новой техники	Некачественная доводка конструкций, технологии, документации по критериям безопасности
Серийный выпуск небезопасной техники	Отклонение от заданного химического состава конструкционных материалов. Недостаточная точность конструктивных размеров. Нарушение режимов термической и химико-термической обработки деталей. Нарушение регламентов сборки и монтажа конструкций и машин

Нарушение правил безопасной эксплуатации технических систем	Использование техники не по назначению. Нарушение паспортных (проектных) режимов эксплуатации. Несвоевременные профилактические осмотры и ремонты. Нарушение требований транспортирования и хранения
Ошибки персонала	Слабые навыки действия в сложной ситуации. Неумение оценивать информацию о состоянии процесса. Слабое знание сущности происходящего процесса. Отсутствие самообладания в условиях стресса. Недисциплинированность

Экологический риск выражает вероятность экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия. Нежелательные события экологического риска могут проявляться как непосредственно в зонах вмешательства, так и за их пределами:

$$R_o = O(t)/O,$$

где: R_o — экологический риск; O — число антропогенных экологических катастроф и стихийных бедствий в единицу времени t ; O — число потенциальных источников экологических разрушений на рассматриваемой территории.

Масштабы экологического риска R^m_o оцениваются процентным соотношением площади кризисных или катастрофических территорий S к общей площади рассматриваемого биогеоценоза S :

$$R^m_o = S/S.$$

Дополнительным косвенным критерием экологического риска может служить интегральный показатель экологичности территории предприятия, соотносимой с динамикой плотности населения (численности работающих):



$$O_T =$$

$$L =$$

$$M(t)/S,$$

где: O_T — уровень экологичности территории; L — динамика плотности населения (работающих); S — площадь исследуемой территории; M — динамика прироста численности населения (работающих) в течение периода наблюдения t .

$$M = G + F - U - V,$$

где: G , F , U , V — соответственно численность родившихся за наблюдаемый период, прибывших в данную местность на постоянное местожительство, умерших и погибших, выехавших в другую местность на постоянное местожительство (уволившихся).

В этой формуле разность $G - U$ характеризует естественный, а $F - V$ — миграционный прирост населения на территории (текучесть кадров). Положительные значения уровней экологичности позволяют разделять территории по степени экологического благополучия и, наоборот, отрицательные значения уровней — по степени экологического бедствия. Кроме того, динамика уровня экологичности территории позволяет судить об изменении экологической ситуации на ней за длительные промежутки времени, определить зоны экологического бедствия (демографического кризиса) или благополучия.

Источники и факторы экологического риска приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Источники и факторы экологического риска

Источник экологического риска	Наиболее распространенный фактор экологического риска
Антропогенное вмешательство в природную среду	Разрушение ландшафтов при добыче полезных ископаемых; образование искусственных водоемов; интенсивная мелиорация; истребление лесных массивов
Техногенное влияние на окружающую природную среду	Загрязнение водоемов, атмосферного воздуха вредными веществами, почвы — отходами производства; изменение газового состава воздуха; энергетическое загрязнение биосферы
Природное явление	Землетрясение, извержение вулканов, наводнение, ураган, ландшафтный пожар, засуха

Социальный риск характеризует масштабы и тяжесть негативных последствий чрезвычайных ситуаций, а также различного рода явлений и преобразований, снижающих качество жизни людей. По существу — это риск для группы или сообщества людей. Оценить его можно, например, по динамике смертности, рассчитанной на 1000 человек соответствующей группы:

$$R_c = (1.000 * (C_2 - C_1) / L) * (t),$$

где: R_c — социальный риск; C_1 — число умерших в единицу времени t (смертность) в исследуемой группе в начале периода наблюдения, например до развития чрезвычайных событий; C_2 — смертность в той же группе людей в конце периода наблюдения, например на стадии затухания чрезвычайной ситуации; L — общая численность исследуемой группы.

Источники и наиболее распространенные факторы социального риска приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Источники и факторы социального риска

Источник социального риска	Наиболее распространенные факторы социального риска
Урбанизация экологически неустойчивых территорий	Поселение людей в зонах возможного затопления, образования оползней, селей, ландшафтных пожаров, извержения вулканов, повышенной сейсмичности региона
Промышленные технологии и объекты повышенной опасности	Аварии на АЭС, ТЭС, химических комбинатах, продуктопроводах и т. п. Транспортные катастрофы. Техногенное загрязнение окружающей среды
Социальные и военные конфликты	Боевые действия. Применение оружия массового поражения
Эпидемии	Распространение вирусных инфекций
Снижение качества жизни	Безработица, голод, нищета. Ухудшение медицинского обслуживания. Низкое качество продуктов питания. Неудовлетворительные жилищно-бытовые условия

Экономический риск определяется соотношением пользы и вреда, получаемых обществом от рассматриваемого вида деятельности:

$$R_э = B/P * 100\%,$$

где: $R_э$ — экономический риск, %; B — вред обществу от рассматриваемого вида деятельности; Π — польза.

В общем виде:

$$B = Z_б + Y,$$

где: $Z_б$ — затраты на достижение данного уровня безопасности; Y — ущерб, обусловленный недостаточной защищенностью человека и среды его обитания от опасностей.

Чистая польза, т. е. сумма всех выгод (в стоимостном выражении), получаемых обществом от рассматриваемого вида деятельности:

$$\Pi = D - Z_б - B > 0 \text{ или } \Pi = D - Z_n - Z_б - Y > 0,$$

где: D — общий доход, получаемый от рассматриваемого вида деятельности; Z_n — основные производственные затраты.

Формула экономически обоснованной безопасности жизнедеятельности имеет вид:

$$Y < D - (Z_n + Z_б).$$

В условиях хозяйственной деятельности необходим поиск оптимального отношения затрат на безопасность и возможного ущерба от недостаточной защищенности. Найти его можно, если задаться некоторым значением реально достижимого уровня безопасности производства $K_{бн}$. Эту задачу можно решить методом оптимизации.

Использование рассматриваемых видов риска позволяет выполнять поиск оптимальных решений по обеспечению безопасности как на уровне предприятия, так и на макроуровнях в масштабах инфраструктур. Для этого необходимо выбирать значения приемлемого риска. **Приемлемый риск** сочетает в себе технические, экологические, социальные аспекты и представляет некоторый компромисс между приемлемым уровнем безопасности и экономическими возможностями его достижения, т. е. можно говорить о снижении индивидуального, технического или экологического риска, но нельзя забывать о том, сколько за это придется заплатить и каким в результате окажется социальный риск.

Развитие риска на промышленных объектах

На процесс зарождения и развития риска оказывает свое влияние многообразие факторов и условий, характерных для промышленной системы (рис. 1.1).

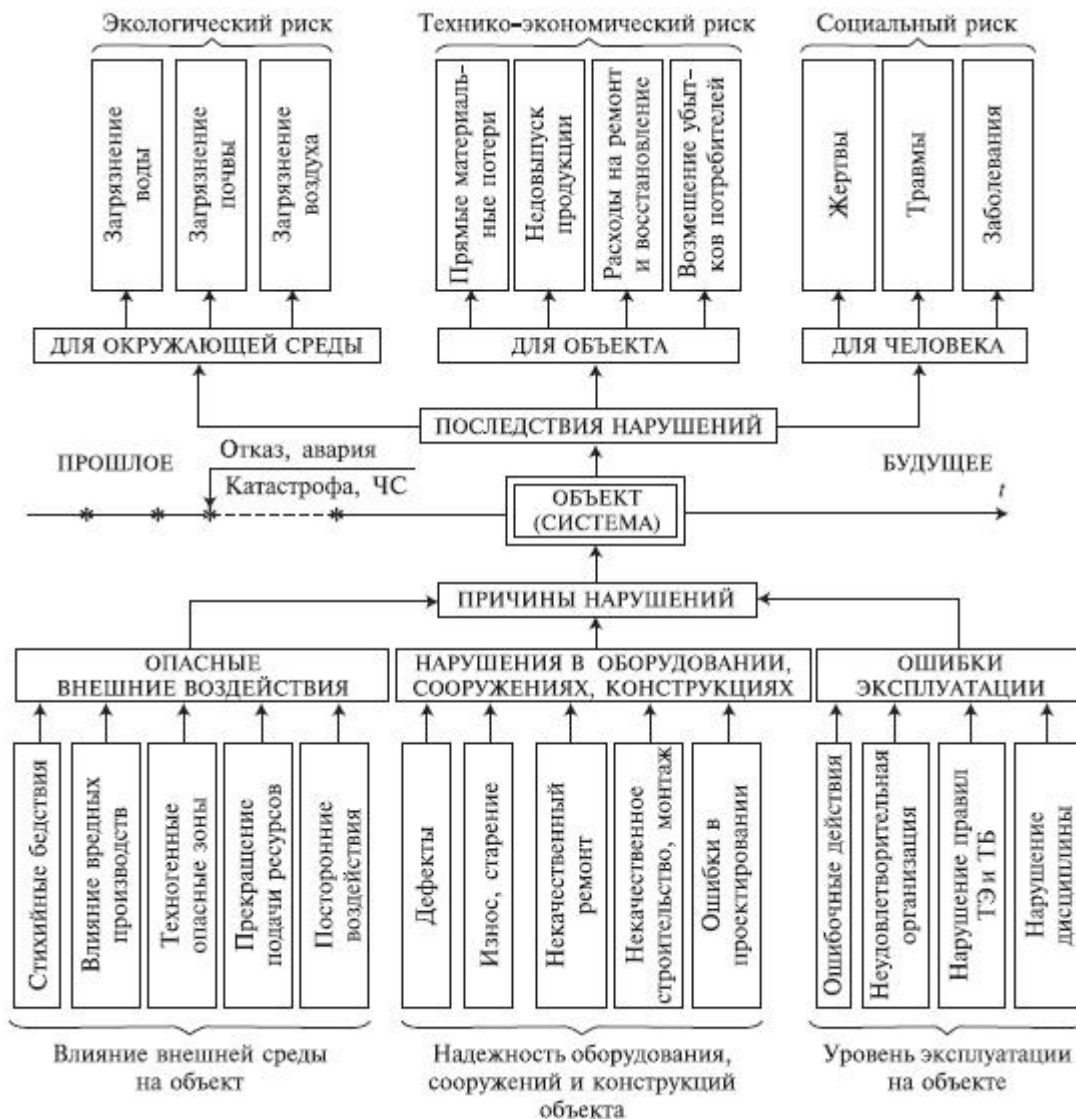


Рис. 1.1. Функциональная модель развития риска

Знакомство с приведенной схемой позволяет выделить целый ряд первопричин риска:

- отказы в работе узлов и оборудования вследствие их конструктивных недостатков, плохого технического изготовления или нарушения правил технического обслуживания;
- отклонения от нормальных условий эксплуатации;
- ошибки персонала;
- внешние воздействия и пр.

Вследствие возможности возникновения указанных причин опасные промышленные объекты постоянно находятся в неустойчивом состоянии, которое по отношению к безопасности производства становится особенно критичным при возникновении аварийных ситуаций на объектах.

Риск возникает при следующих необходимых и достаточных условиях:

- существование фактора риска (источника опасности);
- присутствие данного фактора риска в определенной, опасной (или вредной) для объектов воздействия дозе;
- подверженность (чувствительность) объектов воздействия к факторам опасностей.

Между авариями в самых разных отраслях можно заметить явное сходство. Обычно аварии предшествует накопление дефектов в оборудовании или отклонение от нормального хода процессов. Эта фаза

может длиться минуты, сутки или даже годы. Сами по себе дефекты или отклонения еще не приводят к аварии, но готовят почву для нее. Операторы, как правило, не замечают этой фазы из-за невнимания к регламенту или недостатка информации о работе объекта, так что у них не возникает чувства опасности. На следующей фазе происходит неожиданное или редкое событие, которое существенно меняет ситуацию. Операторы пытаются восстановить нормальный ход технологического процесса, но, не обладая полной информацией, зачастую только усугубляют развитие аварии. Наконец, на последней фазе еще одно неожиданное событие — иногда совсем незначительное — играет роль толчка, после которого техническая система перестает подчиняться людям, и происходит катастрофа.

Риск является неизбежным, сопутствующим фактором промышленной деятельности. Риск объективен, для него характерны неожиданность, внезапность наступления, что предполагает прогноз риска, его анализ, оценку и управление — ряд действий по недопущению факторов риска или ослаблению воздействия опасности.

Основы методологии анализа и управления риском

Анализ риска: понятие и место в обеспечении безопасности технических систем

При разработке проблем риска и обеспечении безопасности технических систем самое пристальное внимание уделяется системному подходу к учету и изучению разнообразных факторов, влияющих на показатели риска, именуемому анализом риска. **Анализ риска**, или **риск-анализ** (*risk analysis*), — процесс идентификации опасностей и оценки риска для отдельных лиц, групп населения, объектов, окружающей природной среды и других объектов рассмотрения.

Напомним, что под **опасностью** понимается источник потенциального ущерба или вреда либо ситуация с возможностью нанесения ущерба, а под идентификацией опасности — процесс выявления и признания, что опасность существует, и определение ее характеристик. Существует много подобных формулировок этого понятия, но в общем виде под анализом риска подразумевается процесс выявления опасности и оценки возможных негативных последствий в результате возникновения нарушений в работе конкретных технологических систем и представления этих последствий в количественных показателях.

В США вместо термина «**анализ риска**» используют «**анализ опасностей**» (*process hazard analysis*), имеющий практически то же значение. **Анализ риска** — во многом субъективный процесс, в ходе которого учитываются не только количественные показатели, но и показатели, не поддающиеся формализации, такие как позиции и мнения различных общественных группировок, возможность компромиссных решений, экспертные оценки и т. д. Многообразие видов производственной деятельности, специфика промышленных объектов, их принадлежность к самым различным отраслям отражает многоаспектность проблемы анализа риска.

Особенность анализа риска заключается в том, что в ходе его рассматриваются потенциально негативные последствия, которые могут возникнуть в результате отказа в работе технических систем, сбоев в технологических процессах или ошибок со стороны обслуживающего персонала. Разумеется, что можно рассматривать и негативные воздействия на людей, и окружающую природную среду при безаварийном функционировании производства (за счет выбросов или утечки вредных или опасных веществ, неочищенных стоков и т. д.).

Результаты анализа риска имеют существенное значение для принятия обоснованных и рациональных решений при определении места размещения и проектировании производственных объектов, при транспортировании и хранении опасных веществ и материалов. В процессе анализа риска находят широкое применение формализованные процедуры и учет разнообразных ситуаций, с которыми может столкнуться управляющий персонал в процессе своей деятельности, особенно при возникновении чрезвычайной обстановки. Неопределенность, в условиях которой во многих случаях должны приниматься управленческие решения, накладывает отпечаток на методику, ход и конечные результаты анализа риска. Методы, используемые в

процессе анализа, должны быть ориентированы прежде всего на выявление и оценку возможных потерь в случае аварии, стоимости обеспечения безопасности и преимуществ, получаемых при реализации того или иного проекта.

Анализ риска имеет ряд общих положений, независимо от конкретной методики анализа и специфики решаемых задач. Во-первых, общей является задача определения допустимого уровня риска, стандартов безопасности обслуживающего персонала, населения и защиты окружающей природной среды. Во-вторых, определение допустимого уровня риска происходит, как правило, в условиях недостаточной или непроверенной информации, особенно когда это касается новых технологических процессов или новой техники. В-третьих, в ходе анализа в значительной мере приходится решать вероятностные задачи, что может привести к существенным расхождениям в получаемых результатах. В-четвертых, анализ риска нужно рассматривать как процесс решения многокритериальных задач, которые могут возникнуть как компромисс между сторонами, заинтересованными в определенных результатах анализа.

Анализ риска может быть определен как процесс решения сложной задачи, требующий рассмотрения широкого круга вопросов и проведения комплексного исследования и оценки технических, экономических, управленческих, социальных, а в ряде случаев и политических факторов.

Анализ риска должен дать ответы на три основных вопроса:

1. Что плохого может произойти? (Идентификация опасностей).
2. Как часто это может случаться? (Анализ частоты).
3. Какие могут быть последствия? (Анализ последствий).

Основной элемент анализа риска — **идентификация опасности** (обнаружение возможных нарушений), которые могут привести к негативным последствиям. Выраженный в наиболее общем виде процесс анализа риска может быть представлен как ряд последовательных событий:

1. Планирование и организация работ.
2. Идентификация опасностей:
 - выявление опасностей;
 - предварительная оценка характеристик опасностей.
3. Оценка риска:
 - анализ частоты;
 - анализ последствий;
 - анализ неопределенностей.
4. Разработка рекомендаций по управлению риском.

Первое, с чего начинается любой анализ риска, — это **планирование и организация работ**. Анализ риска проводится в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов для того, чтобы обеспечить вход в процесс управления риском, однако более точный выбор задач, средств и методов анализа риска обычно не регламентируется. В документах подчеркивается, что анализ опасности должен соответствовать сложности рассматриваемых процессов, наличию необходимых данных и квалификации специалистов, проводящих анализ. При этом более простые и понятные методы анализа следует предпочесть более сложным методам, не до конца ясным и методически необеспеченным.

Поэтому на первом этапе необходимо:

- указать причины и проблемы, вызвавшие необходимость проведения риск-анализа;

- определить анализируемую систему и дать ее описание;
- подобрать соответствующую команду для проведения анализа;
- установить источники информации о безопасности системы;
- указать исходные данные и ограничения, обуславливающие пределы риск-анализа;
- четко определить цели риск-анализа и критерии приемлемого риска.

Во всех нормативах содержится требование документального оформления этого этапа анализа риска.

Следующий этап анализа риска — **идентификация опасностей**. Основная задача — выявление (на основе информации о данном объекте, результатов экспертизы и опыта работы подобных систем) и четкое описание всех присущих системе опасностей. Это ответственный этап анализа, так как невыявленные на этом этапе опасности не подвергаются дальнейшему рассмотрению и исчезают из поля зрения.

Здесь приводится предварительная оценка опасностей с целью выбора дальнейшего направления деятельности:

- прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей;
- провести более детальный анализ риска;
- выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

Исходные данные и результаты предварительной оценки опасностей также должным образом документируются. В принципе процесс риск-анализа может закончиться уже на этапе идентификации опасностей.

При необходимости после идентификации опасностей переходят к этапу оценки риска. Наконец, последний этап анализа риска технической системы — разработка рекомендаций по уменьшению уровня риска (управлению риском) в случае, если степень риска выше приемлемой. По проведенной таким образом работе все нормативные документы предписывают составление отчета, требования к содержанию которого строго сформулированы и касаются перечисленных выше вопросов. Множественность результатов анализа и возможность компромиссных решений дают основание считать, что анализ риска не является строго научным процессом, поддающимся проверке объективными, научными методами.

Оценка риска: понятие и место в обеспечении безопасности технических систем

С анализом риска тесно связан другой процесс — оценка риска. **Оценка риска** — процесс, используемый для определения величины (меры) риска анализируемой опасности для здоровья человека, материальных ценностей, окружающей природной среды и других ситуаций, связанных с реализацией опасности. Оценка риска — обязательная часть анализа. Оценка риска включает анализ частоты, анализ последствий и их сочетаний.

В англоязычной литературе употребляют термины «*risk estimation*», «*risk assessment*», «*risk evaluation*», зачастую имеющие разные значения, но переводимые как оценка риска. **Оценка риска** — этап, на котором идентифицированные опасности должны быть оценены на основе критериев приемлемого риска с целью выделения опасности с неприемлемым уровнем риска, этот шаг послужит основой для разработки рекомендаций и мер по уменьшению опасностей. При этом и критерии приемлемого риска и результаты оценки риска могут быть выражены как качественно, так и количественно. Согласно определению, оценка риска включает в себя анализ частоты и анализ последствий. Однако, когда последствия незначительны и частота крайне мала, достаточно оценить один параметр.

Существуют четыре разных подхода к оценке риска.

Первый — инженерный. Он опирается на статистику поломок и аварий, на вероятностный анализ безопасности (ВАБ): построение и расчет так называемых деревьев событий и деревьев отказов — процесс основан на ориентированных графах. С помощью первых предсказывают, во что может развиваться тот или иной отказ техники, а деревья отказов, наоборот, помогают проследить все причины, которые способны вызвать какое-то нежелательное явление. Когда деревья построены, рассчитывается вероятность реализации каждого из сценариев (каждой ветви), а затем — общая вероятность аварии на объекте.

Второй подход, модельный, — построение моделей воздействия вредных факторов на человека и окружающую среду. Эти модели могут описывать как последствия обычной работы предприятий, так и ущерб от аварий на них.

Первые два подхода основаны на расчетах, однако для таких расчетов далеко не всегда хватает надежных исходных данных. В этом случае приемлем **третий подход — экспертный:** вероятности различных событий, связи между ними и последствия аварий определяют не вычислениями, а опросом опытных экспертов.

Наконец, в рамках **четвертого подхода — социологического** — исследуется отношение населения к разным видам риска, например с помощью со-циологических опросов.

То, что для определения риска используются четыре столь несхожих между собой метода, не должно удивлять. В разных задачах под риском следует понимать то вероятность какой-то аварии, то масштаб возможного ущерба от нее, а то и комбинацию двух этих величин. Описывая риск, нужно учитывать и выгоду, которую получает общество, когда на него идет (бесполезный риск недопустим, даже если он ничтожно мал). Иными словами, величина риска — это не какое-то одно число, а скорее вектор, состоящий из нескольких компонент. И поэтому мы имеем дело с так называемым многокритериальным выбором, процедура которого описывается теорией принятия решений.

Имеется много неопределенностей, связанных с оценкой риска. Анализ неопределенностей — необходимая составная часть оценки риска. Как правило, основные источники неопределенностей — информация по надежности оборудования и человеческим ошибкам, а также допущения применяемых моделей аварийного процесса. Чтобы правильно интерпретировать величины риска, надо понимать неопределенности и их причины. Анализ неопределенности — это перевод неопределенности исходных параметров и предложений, использованных при оценке риска, в неопределенность результатов. Источники неопределенности должны по возможности идентифицироваться. Основные параметры, к которым анализ является чувствительным, должны быть представлены в результатах.

Важно подчеркнуть, что сложные и дорогостоящие расчеты зачастую дают значение риска, точность которого очень невелика. Для сложных технических систем точность расчетов индивидуального риска, даже в случае наличия всей необходимой информации, не выше одного порядка. При этом проведение полной количественной оценки риска более полезно для сравнения различных вариантов (например, размещения оборудования), чем для заключения о степени безопасности объекта. Зарубежный опыт показывает, что наибольший объем рекомендаций по обеспечению безопасности вырабатывается с применением качественных (из числа инженерных) методов анализа риска, позволяющих достигать основных целей риск-анализа при использовании меньшего объема информации и затрат труда. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях — и единственно допустимы, в частности, для сравнения опасностей различной природы или при экспертизе особо опасных, сложных и дорогостоящих технических систем.

Управление риском: понятие и место в обеспечении безопасности технических систем

В исследованиях по проблеме риска возникло отдельное направление работ под общим названием «Управление риском». **Управление риском** (*risk management*) — это часть системного подхода к принятию решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности промышленных аварий для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба материальным ценностям и окружающей природной среде.

Для процесса управления риском существует несколько названий как в нашей стране (**обеспечение промышленной безопасности**), так и за рубежом («**safety management**», «**management of process hazards**»), которые фактически являются синонимами.

Под этими терминами понимается совокупность мероприятий, направленных на снижение уровня технического риска, уменьшение потенциальных материальных потерь и других негативных последствий аварий. По сути дела, речь идет о предотвращении возникновения аварийных ситуаций на производстве и мерах по локализации негативных последствий в тех случаях, когда аварии произошли. Особенностью этого направления является комплексность, включающая в себя различные аспекты — технические, организационно-управленческие, социально-экономические, медицинские, биологические и др.

Общность и различие процедур оценки и управления риском

Общим в оценке риска и управлением риском является то, что они — два аспекта, две стадии единого процесса принятия решения (в широком смысле слова), основанного на характеристике риска. Такая общность обусловлена их главной целевой функцией — определением приоритетов действий, направленных на уменьшение риска до минимума, для чего необходимо знать как его источники и факторы — (анализ риска), так и наиболее эффективные пути его сокращения (управление риском). Взаимосвязь между оценкой риска и его управлением представлена на рис. 1.2.

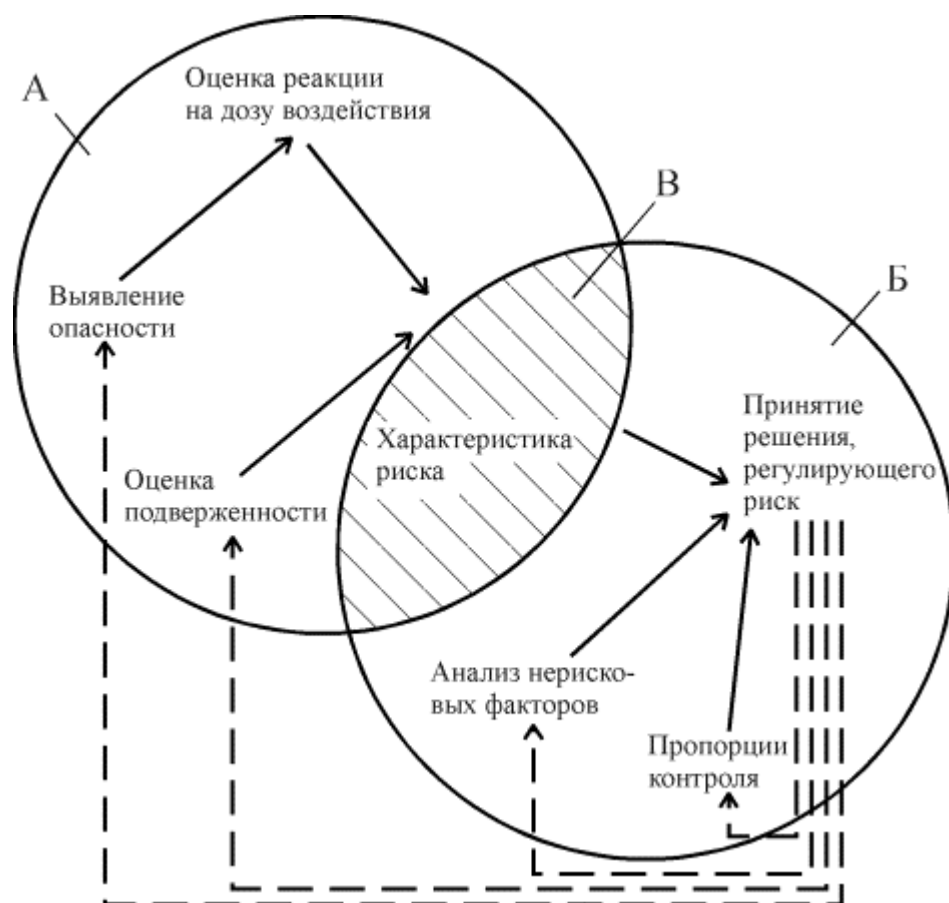


Рис. 1.2. Взаимосвязь между оценкой и управлением риском

Основное различие между двумя понятиями заключается в том, что **оценка риска** строится на фундаментальном, прежде всего естественно-научном и инженерном, изучении источника (например, химического объекта) и факторов риска (например, загрязняющих веществ с учетом особенностей конкретной технологии и экологической обстановки) и механизма взаимодействия между ними. **Управление риском** опирается на экономический и социальный анализ, а также на законодательную базу, которые не нужны и не используются при оценке риска. Управление риском имеет дело с анализом альтернатив по минимизации риска, т.е. является, по сути дела, частным случаем класса многокритериальных задач принятия решения в условиях неопределенности. Оценка риска служит основой для исследования и выработки мер управления риском в соответствии с алгоритмом действий (рис. 1.2).

Заключительная фаза процедуры оценки риска — **характеристики риска** — одновременно является первым звеном процедуры управления риском.

Моделирование риска

Анализ работы опасного производства показывает, что даже при нормальном функционировании влияние таких объектов на окружающую среду связано как с социально-психологическим воздействием на людей, так и с определенной потенциальной опасностью загрязнения атмосферы и прилегающей территории опасными веществами из-за недостаточно надежных технологий, недостаточной эффективности работы фильтровентиляционных устройств и вследствие других причин. С другой стороны, как показывает отечественная и мировая практика, добиться полностью безаварийной работы предприятий, как химической промышленности, так и других отраслей, не представляется возможным.

Повышение промышленной безопасности предусматривает осуществление технических и организационных мер, включающих мониторинг опасного объекта, разработку планов ликвидации аварий и плана действий в чрезвычайных ситуациях на территории объекта и за его пределами. Нет сомнения, что любой технологический процесс должен ориентироваться на технологии, позволяющие максимально снизить вероятность аварий и уменьшить выход опасных веществ во внешнюю среду.

В то же время нельзя не учитывать, что рациональное размещение объектов также является одним из способов обеспечения безопасности людей и окружающей среды. Любой район, в пределах которого размещается объект, имеет ту или иную численность населения, хозяйственную ценность. Поэтому представляется целесообразным оценку различных вариантов размещения объектов проводить по комплексу показателей, характеризующих состояние окружающей среды, особенности и потенциальную опасность объекта в случае аварийных ситуаций. Одним из таких показателей (критериев) является **риск запроектных аварий**.

Риск запроектной аварии при функционировании опасного объекта состоит в том, что в случае ее возникновения существует определенная вероятность поражения окружающего населения. Чем меньше прогнозируемые последствия запроектной аварии, тем более благоприятна данная площадка для размещения объекта. Сценарий аварий на опасных объектах достаточно сложен. При авариях возможен выход отравляющих веществ (ОВ) в газообразном и аэрозольном состоянии с образованием облака зараженного воздуха и его движением по направлению ветра, заражением почв, растительности, водоемов и т. д. Так как газообразное и аэрозольное состояние ОВ являются его боевым состоянием, то население, находящееся в зоне распространения облака или первичного заражения местности, может получить поражение различной степени тяжести.

Вероятность возникновения аварии определяется:

- особенностями технологического процесса;
- используемым оборудованием;
- степенью подготовленности персонала;
- временем, в течение которого функционирует данный технологический объект;

- интенсивностью технологических операций;
- техническими факторами (например, усталость металла);
- внешними неуправляемыми факторами (целенаправленная диверсия);
- человеческим фактором (ошибками эксплуатационного персонала).

Опасности, связанные с аварией, определяются:

- количеством освободившихся при аварии ОВ, их физико-химическими и токсическими свойствами (например, в случае высвобождения фосфорорганических ОВ наибольшая опасность создается при образовании и распространении облака паров ОВ, в то время как при высвобождении люизита более опасно заражение подпочвенных вод мышьяксодержащими продуктами гидролиза люизита);
- архитектурно-планировочными особенностями застройки и транс-портными коммуникациями;
- метеорологическими условиями и характеристиками окружающей среды: особенностями рельефа, характерной растительностью, структурой и свойствами почвы, условиями залегания подпочвенных вод, близостью рек и водозаборных сооружений, гидрографическими условиями;
- самым фактором наличия окружающего населения (если такового в пределах зоны вероятного распространения ОВ в случае аварии не имеется, то потенциальная опасность близка в момент времени t нулю).

Для **количественной оценки последствий аварии** требуется создавать математическую модель, позволяющую осмыслить поведение технической системы, и с ее помощью оценить различные стратегии риска. Модель должна отражать важнейшие черты явления, т. е. в ней должны быть учтены все существенные факторы, от которых в наибольшей степени зависит функционирование системы. Вместе с тем она должна быть по возможности простой и понятной пользователю, целенаправленной, надежной (гарантия от абсурдных ответов), удобной в управлении и обращении, достаточно полной, адекватной, позволяющей легко переходить к другим модификациям и обновлению данных.

При построении математической модели может быть использован математический аппарат различной сложности — алгебраические и дифференциальные уравнения, как обыкновенные, так и с частными производными. В наиболее трудных случаях, если функционирование системы зависит от большого числа сложно сочетающихся между собой случайных факторов, может применяться метод статистического моделирования.

Выходными параметрами функционирования математической модели риска запроектной аварии определяется математическое ожидание количества пораженных жителей, постоянно проживающих в районе, подвергаемом опасности при функционировании объекта, если на объекте или его технологических элементах произойдет в случайный момент времени любая теоретически возможная запроектная авария, вызванная теми или иными причинами.

В практике прогнозирования риска проф. М. А. Шахраманьяном с коллегами предложены следующие подходы к математическому моделированию риска.

Моделирование индивидуального риска. В данном случае под индивидуальным риском понимают вероятность гибели человека в течение года от определенных причин (или их совокупности) в определенной точке пространства. Результаты анализа индивидуального риска отображаются на карте (ситуационном плане) предприятия (территории возможной природной ЧС) и прилегающих районов в виде замкнутых линий равных значений (см. рис. 1.3.).

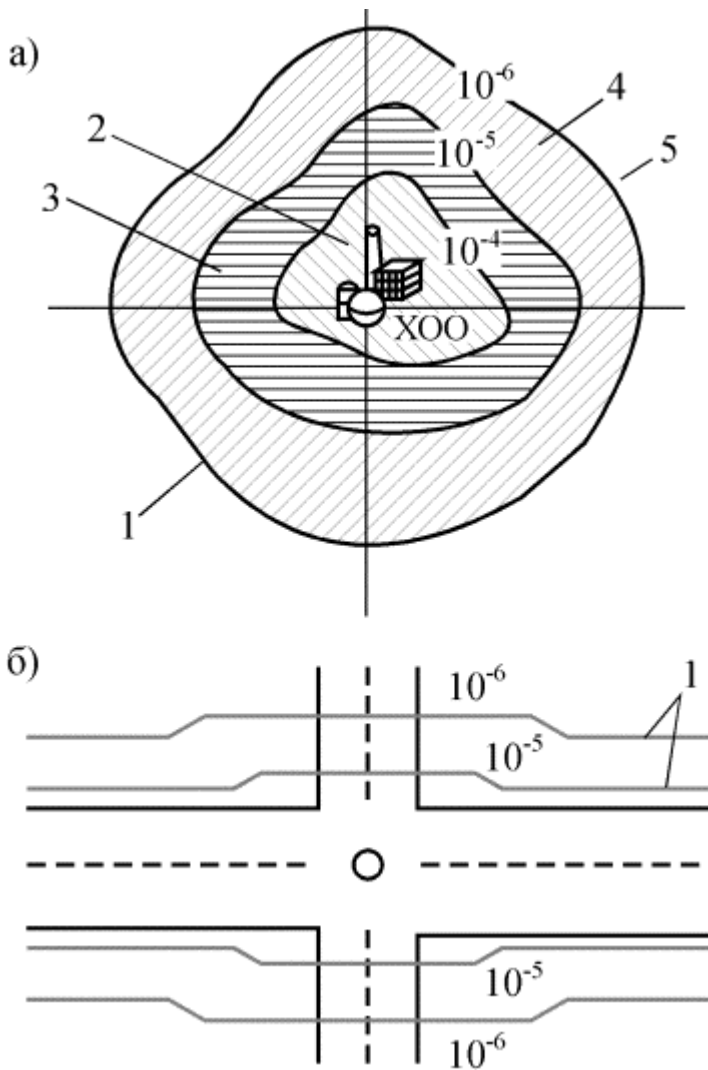


Рис. 1.3. Построение зон индивидуального риска для опасных предприятий (а), транспортной магистрали (б), по которой осуществляется перевозка опасных грузов: 1 - изолинии равного риска, 2, 3, 4, 5 - зона соответственно чрезвычайно высокого, высокого, приемлемого и низкого риска

Построение линий равного значения индивидуального риска (изолиний) R_{II} осуществляется по формуле:

$$R_{II}(x, y) = \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} P_{Q(x, y)} F(A_m),$$

где:

$P_{Q(x, y)}$ — вероятность воздействия на человека в точке с координатами (x, y) Q -го поражающего фактора с интенсивностью, соответствующей гибели (поражению) человека (здорового мужчины 40 лет) при условии реализации A_m -го события (аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия);

$F(A_m)$ — частота возникновения A_m -го события в год;

M — множество индексов, которое соответствует рассматриваемым событиям (авариям, опасным природным явлениям, катастрофам, стихийным или иным бедствиям);

L — множество индексов, которые соответствуют перечню всех поражающих факторов, возникающих при рассматриваемых событиях.

Моделирование социального риска. Социальный риск R_C — зависимость частоты возникновения событий, вызывающих поражение определенного числа людей, от этого числа людей. Результаты анализа изображаются в виде графиков (так называемых $F-N$ диаграмм). Социальный риск $R-F(N)$ характеризует масштаб возможных чрезвычайных ситуаций. Социальный риск может быть рассчитан по формуле:

$$R_C(N) = \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} P(N|Q_m)P(Q_m|A_l)F(A_l),$$

где:

$P(N|Q_m)$ - вероятность гибели (поражения) N людей от Q_m -го поражающего фактора;

$P(Q_m|A_l)$ - вероятность возникновения Q_m -го поражающего фактора при реализации A_l -го события (аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия).

Моделирование риска от аварий на пожароопасных и взрывоопасных объектах (ПВОО). После выявления на каждом из принятых к рассмотрению ПВОО всех видов аварий, специфики их возникновения и развития, расчета полей потенциальной опасности этих аварий и определения вероятности реализации их негативного потенциала (H_i), оценка индивидуального риска может проводиться по формуле:

$$R_e = \frac{\left(\sum_{x,y} R(x,y)N(x,y) \right)}{\left(\sum_{x,y} N(x,y) \right)},$$

где:

$N(x,y)$ - численность людей на площадке с координатами (x,y) ;

$R(x,y)$ - индивидуальный риск в точке с координатами (x,y) ,

$$R(x,y) = \sum_{ij} H_i E_{ij}(x,y) P_j,$$

где:

H_i - вероятность выброса за год по сценарию i (в качестве сценариев аварии могут рассматриваться: нарушение герметичности замкнутых объемов за счет коррозии, нарушения за счет технологического режима и т.п.);

$E_{ij}(x,y)$ - вероятность реализации механизма воздействия j в точке (x,y) для сценария выброса i (в качестве сценариев механизма воздействия могут рассматриваться: тепловые поражения людей, поражения ударной волной, поражение обломками и т.п.);

P_j - вероятность летального исхода при реализации механизма воздействия.

Моделирование риска от аварий на химически опасных объектах. По известной токсодозе D в точке с координатами (x,y) математическое ожидание потерь среди населения $M(N)$ (средневзвешенная по вероятности величина потерь) определяется по формуле:

$$M(N) = \int \int_{S_r} P[D(x,y)]\psi(x,y) dx dy,$$

где:

S_r - область интегрирования — площадь части города, в пределах которой возможно поражение людей при авариях на заданном объекте;

$\Psi(x,y)$ - плотность размещения людей в окрестностях точки с координатами (x,y) ;

$P[D(x,y)]$ - вероятность поражения людей от величины токсодозы в точке города с координатами (x, y) определяемая из параметрического закона поражения людей сильно-действующими ядовитыми веществами;

$D(x, y)$ - токсодоза, определяемая при переменной во времени концентрации химически опасного вещества для точки с координатами (x, y) по формуле:

$$D(x, y) = \int_{t_n}^{t_k} \Omega(x, y, t) dt,$$

где:

$t_n \dots t_k$ - интервал времени;

$\Omega(x, y, t)$ - концентрация химически опасного вещества в атмосфере для точки с координатами (x, y) в заданный момент времени t .

По формуле расчета средневзвешенной по вероятности величины потерь математическое ожидание потерь определяется для случая, когда исходные данные известны. При заблаговременном определении математического ожидания потерь необходимо учитывать изменчивость направления (θ) и скорости ветра (V) в течение года. Тогда потери могут быть определены по формуле:

$$M(N) = \int_{S_r} \int_0^{2\pi} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} f(\theta, V) P[D(x, y)] \psi(x, y) dV d\theta dx dy,$$

где:

$f(\theta, V)$ - функция плотности распределения направления θ и скорости V ветра;

V_{\max} и V_{\min} - минимально и максимально возможные значения скорости ветра;

S_r - область интегрирования.

Остальные обозначения те же, что и в предыдущих формулах. Учитывая выражение расчета математического ожидания потерь, оценка индивидуального риска на химически опасном объекте (ХОО) может проводиться по формуле:

$$R_e = \frac{H}{N} \int_{S_r} \int_0^{2\pi} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} f(\theta, V) P[D(x, y)] \psi(x, y) dV d\theta dx dy,$$

где:

H - вероятность аварии в течение года;

N - численность населения.

Моделирование риска от аварий на радиационно опасных объектах. Индивидуальный риск поражения людей в городе при аварии на рядом расположенном радиационноопасном объекте (РОО) может быть определен по формуле:

$$R_e = \frac{H}{N} \int_{S_r} \int_0^{2\pi} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} f(\theta, V) P[D(x, y)] \psi(x, y) dV d\theta dx dy,$$

где:

$P[D(x, y)]$ - вероятность поражения людей от величины дозы радио-активного заражения в точке с координатами (x, y) определяется из закона поражения людей;

$D(x, y)$ - доза радиоактивного заражения при переменном во времени уровне радиации для точки с координатами (x, y) определяется по отдельным методикам;

$\Psi(x, y)$ - плотность размещения незащищенного населения в пределах элементарной площадки города с координатами (x, y) .

Для оценки риска запроектной аварии, наряду с аналитическими методами, представляется возможным использование **метода Монте-Карло** — метода статистического моделирования. Идея этого метода чрезвычайно проста и состоит в следующем. Вместо того чтобы описывать случайный процесс с помощью аналитического аппарата, производится «розыгрыш» случайного явления с помощью последовательных операций, дающих случайный результат. Конкретное осуществление случайного процесса складывается каждый раз по-иному, поэтому в результате статистического моделирования (розыгрыша) возникает каждый раз новая, отличная от других, искусственная реализация этого процесса. При числе повторений ($N > 100$) метод дает статистически устойчивое сходство результата. При этом на основании перечисленных исходных данных формируется массив случайных значений величин.

Обобщенный алгоритм оценки риска методом статистического моделирования может состоять из следующих последовательных процедур:

Шаг 1. На основе равновероятного датчика случайных чисел разыгрывается время, число и месяц возникновения аварии.

Шаг 2. Исходя из реализованных временных характеристик аварий и с учетом вероятности распределения метеоусловий за большой период времени для данной местности прогнозируют конкретный вектор значений метеоусловий, включающий температуру воздуха и почвы, стратификацию атмосферы, скорость и направление ветра (при разработке статистической модели аварии не представляет труда учесть фактическую розу ветров для любой точки со случайным розыгрышем месяца, дня, времени аварии, конкретного направления и скорости ветра).

Шаг 3. На основе сформулированного перечня аварий и с учетом равно-вероятной природы их возникновения разыгрывается конкретный тип аварии, происшедшей на объекте, и ее исходные данные (количество освободившегося ОВ, площадь разлива, максимальная концентрация в зоне аварии и т. д.) с учетом конкретных метеоданных.

Шаг 4. На основе, например, гауссовской модели распределения примеси и исходных данных, реализованных по пп. 1, 2, 3, рассчитывается величина приведенной зоны поражения той или иной степени тяжести и ее положение (конфигурация, директрисса следа облака и т. д.) на конкретной местности.

Шаг 5. На основе известного математического ожидания распределения населения вокруг объекта моделируется конкретное распределение населения в момент аварии; вычисляют общее количество человек, попавших в приведенную зону поражения той или иной степени тяжести.

Полученное таким образом значение оценки риска, характеризующееся количеством людей, пораженных в результате аварии той или иной степени тяжести, является единичным значением, т. е. единичной реализацией. Для получения статистически достоверных результатов необходимо получить как можно большее количество реализаций N (естественно в разумных пределах, например $N = 1000$) путем «прогона» на ЭВМ математической модели, разработанной согласно вышеописанному алгоритму, N раз. В дальнейшем по N реализациям проводят оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения числа пораженных той или иной степени тяжести на данном объекте при запроектной аварии.

Аналогичный подход может быть применен и для оценки потенциальной опасности перевозок опасных грузов. При этом необходимо дополнительно ввести учет распределения населения на маршрутах перевозок, смоделировать время начала и окончания перевозок, конкретное время следования по маршруту.