

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности

**Хамидуллина Е.А.**

**Моделирование опасных процессов в техносфере**

«УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ»

**Конспект лекций**

для магистрантов, обучающихся  
по направлению 20.04.01 «Техносферная безопасность»,  
профиля подготовки: «Народосбережение. Управление профессиональными,  
аварийными и экологическими рисками» квалификации «магистр»

Иркутск -2015

## ***Лекция 1. Общие принципы системного анализа.***

**Система** – это такая совокупность элементов, объединенных общими ресурсами, связями, функциональной средой и целью существования, которая обладает свойствами, отсутствующими у отдельных элементов. Элементами будем считать всякие условно неделимые и самостоятельно функционирующие части системы.

### **Классификация систем:**

1. По природе (происхождение):
  - 1.1 Физические (естественные, материальные)
  - 1.2 Абстрактные (искусственные, идеальные)
2. По составу:
  - 2.1 Гомогенные (характеризуются однородностью и слабой связанностью похожих частей)
    - 2.1.1 Технические
    - 2.1.2 Организационные
  - 2.2 Гетерогенные (образованы как бы «сшиванием» своих различных элементов)
    - 2.2.1 Человеко-машинные (эрготехнические)
    - 2.2.2 Этногеоэотосистемы (От греч. Этнос – народ, Гея – земля, Этос – уклад жизни)
3. По степени взаимодействия с окружающей средой (обмену потоками энергии, вещества и информации):
  - 3.1 Открытые: (обмениваются со своим окружением всеми этими формами материи)
    - 3.1.1 Диссипативные (Непрерывно рассеивают часть своей свободной энергии, в т.ч. и в виде тепла)
    - 3.1.2 Равновесные
  - 3.2 Закрытые (обмениваются лишь информацией)
  - 3.3 Изолированные (ни одной из форм материи не обмениваются)
4. По сложности:
  - 4.1 Простые
  - 4.2 Сложные
  - 4.3 Большие

Исследование двух последних невозможно без предварительного расчленения на компоненты (декомпозиции) с последующим укрупнением (агрегатированием) элементов. Их отличительными свойствами считаются:

  - а) уникальность – аналоги заметно отличаются;
  - б) многоступенчатый состав – имеются подсистемы и компоненты;
  - в) случайный характер функционирования и реагирования на воздействие различных факторов;
  - г) многокритериальность оценки состояния;
  - д) разрозненность образующих частей.
5. По изменчивости (отклику на воздействия различных факторов):
  - 5.1 Статические (система с одним возможным состоянием)

5.2 Динамические (система с множеством состояний, в которой с течением времени происходит переход от состояния в состояние).

Для образования любой системы важную роль играет характер взаимодействия между подсистемами, а не их специфика. Поэтому самой важной характеристикой системы считается её структура – множество тех связей и элементов, которые играют наиболее важное значение при обеспечении энергетического, массового и информационного обмена как внутри системы, так и между нею и окружающей средой. В общем виде под структурой подразумевается способ организации целого из частей, некий вид упорядочения его отдельных элементов и связей.

Следующие существенные характеристики любой системы:

*Состав* – множество образующих систему элементов и компонентов.

*Функциональная среда* – совокупность законов, алгоритмов и параметров состояния системы, в соответствии с которыми она образуется, существует, развивается, а затем (рано или поздно) и гибнет.

*Морфология* – зафиксированная в пространстве, т.е. физически реализованная, а потому и реально наблюдаемая совокупность взаимодействующих между собой звеньев их обобщенной структуры.

Необходимо наметить целесообразные пределы обобщения и редукции исследуемых систем, т.е. какой-либо компонент эрготехнической системы может быть выделен как целостное образование и учтены только его самые важные (интегральные) свойства и обобщённая структура.

Процесс функционирования системы (т.е. последовательной смены состояний) обусловлен строго определёнными соотношениями между энергией внешнего воздействия и собственной энергоёмкостью конкретного состояния системы. Если внешняя энергия не превышает пороговых значений, не накапливается, а уменьшается в результате частичного рассеяния или преобразуется в другую энергию (как при фотосинтезе, например), то реакция системы проявляется лишь в незначительных колебаниях существующих показателей либо в их эволюционном (плавном) изменении (постепенном росте того же растения).

Один из наиболее общих механизмов сохранения системой стабильности связан с так называемым принципом Ле Шателье-Брауна, в соответствии с которым любое внешнее воздействие порождает ответную реакцию самоорганизации, направленную на ослабление его эффекта.

Механизм смены состояний может быть проиллюстрирован на примере человекомашиной системы. Ее функционирование обычно характеризуется такими возможными ситуациями, как:

- Гомеостазис или гомеокинезис, представляющие собой динамическое равновесие;
- Разного рода возмущенные состояния, вызванные появлением в ней ошибок людей, отказов техники и неблагоприятных для них внешних воздействий;
- Опасные, критические и катастрофические состояния.

Последние, как правило, связаны с возникновением происшествий, одновременно являющихся результатом нежелательного выброса энергии (вредного вещества) и следствием причинных цепей предпосылок.

#### **Основные принципы общей теории систем:**

1. Любая система выступает как триединство цели, функции и структуры. При этом функция порождает систему, структура же интерпретирует ее функцию, а иногда и цель.
2. Система – больше, чем сумма образующих ее компонентов, поскольку обладает *эмерджентным* интегральным свойством, отсутствующим у ее элементов либо не выводимым из их свойств без остатка.
3. Система не сводится к сумме своих компонентов и элементов, а любое ее механическое расчленение на отдельные части приводит к утрате существенных свойств системы.
4. Система предопределяет природу ее частей. Появление в системе инородных частей завершается либо их перерождением или отторжением, либо гибелью самой системы.
5. Все компоненты и элементы системы взаимосвязаны и взаимозависимы. Воздействие на одну часть системы всегда сопровождается реакцией со стороны других.
6. Система и ее части непознаваемы вне своего окружения, которое целесообразно делить на ближнее и дальнее. Связи внутри системы и между ней и ближайшим окружением всегда более существенные всех остальных.

#### **Основные принципы системной динамики:**

1. Поведение системы является следствием взаимодействия наиболее ее существенных элементов и связей между собой и окружающей средой.
2. Определяющее влияние на функционирование системы оказывают те звенья ее морфологии, которые включают в себя обратные связи
3. Состояние и обобщенная структура системы служат причиной, а не результатом происходящих в ней изменений
4. Проблемы создаются преимущественно внутри самой системы, а не в ее окружении
5. Изучить сложную систему – это значит установить наиболее существенные отношения между ее элементами и окружающей их средой.
6. При исследовании сложной системы важнее разобраться с ее обобщенной структурой, чем пытаться количественно оценить и спрогнозировать все существенные характеристики
7. Цель изучения сложной системы – анализ действенности различных стратегий улучшения, а не априорная количественная оценка ее интегральных выходных характеристик.

#### ***Лекция 2. Элементы теории формализации и моделирования.***

***Место формализации и моделирования при исследовании процессов в техносфере.***

**Модель** – материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе изучения замещает объект-оригинал, сохраняя некоторые его

важные для данного исследования типичные черты. **Моделирование** – процесс построения и использования модели. Другими словами, модель обычно играет роль некоторого заместителя реального объекта и используется для его изучения.

#### **Характеристики моделей:**

- *субъективность* – один и тот же объект воспринимается разными людьми по-разному в зависимости от объема знаний, особенностей мышления, эмоционального состояния и т.д., поэтому и модели одного и того же объекта, созданные разными людьми будут отличаться между собой.
- *Относительная неполнота*, связанная с тем, что при создании модели исследователь исходит из определенной цели, поэтому учитывает только факторы, существенные для достижения этой цели, поэтому любая созданная модель не тождественна оригиналу.
- *Адекватность* – если результаты исследования модели удовлетворяют цели, т.е. могут быть пригодными, например, для прогнозирования поведения или свойств оригинала, то говорят, что модель адекватна. Однако, учитывая заложенную при создании неполноту модели, можно утверждать, что идеально адекватная сложному объекту модель принципиально невозможна.
- *Сложность (или простота)* – из двух моделей, позволяющих достичь желаемой цели, предпочтение должно быть отдано более простой. Адекватность и простота модели не противоречивые требования.
- *Предсказательность (потенциальность)* – важная характеристика, пригодность модели для получения новых знаний об объекте-оригинале. Считается, что хорошая модель содержит в себе потенциальное знание, которое человек, исследуя ее, может приобрести и далее использовать в практических целях. Именно свойство потенциальности, называемое «богатством» модели, позволяет ей выступать в качестве самостоятельного объекта исследования.
- *Предназначение* – характеристика модели, а точнее ее функции, ради которых она создается. Самое важное предназначение модели **(1)** – это ее применение в целях исследования и прогнозирования поведения сложных процессов и явлений, в том числе и интересующих нас – техносферных. Второе **(2)** предназначение модели – это выявление с ее помощью наиболее существенных факторов, формирующих свойства объекта-оригинала. Например, исследуя движение тел в атмосфере, конструктор самолета может выяснить, что их ускорение существенно зависит от массы, формы и шероховатости поверхности, но практически не зависит от цвета последней. И наконец, **(3)** модель позволяет научиться управлять самим объектом, апробируя различные варианты воздействия на него. Например, получить первые навыки управления самолетом безопаснее на тренажере. **(4)** – особое значение приобретает задача прогнозирования состояния объекта под воздействием различных факторов. Например, при проектировании, изготовлении и эксплуатации любого сложного технического устройства

необходимо уметь прогнозировать изменение надежности и безопасности его функционирования.

Итак, еще раз подчеркнем, для чего нужны модели и моделирование:

- а) понять, как устроен конкретный объект-оригинал; каковы его структура, свойства, закономерности функционирования и развития;
- б) научиться управлять объектом и процессом его функционирования, в том числе определять наилучшие для него управляющие воздействия при заданных целях и критериях;
- в) прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации способов и форм воздействия на моделируемый объект.

### ***Классификация моделей***

*Физическое* моделирование широко применяется в авиа-, автомобиле-, ракетно-, судостроении. Например, при разработке нового летательного аппарата важны эксперименты с моделями в аэродинамической трубе. Исследование полученных там результатов их обтекания воздушным потоком позволяет найти наиболее рациональные формы корпуса самолета или ракеты или отдельных выступающих частей.

В основу *аналогового* моделирования положено совпадение математического описания различных предметов, процессов и явлений. Например, механические и электрические колебания, описываются одинаковыми аналитическими формулами, но относятся к качественно разным физическим процессам. Отсюда, изучение мех.колебаний можно вести с помощью эл.схемы, а обтекание жидкости заменить обтеканием газов и наоборот.

*Идеальное моделирование. Интуитивное* – моделирование в сознании человека в форме мысленных экспериментов, сценариев, игровых ситуаций, основанное на жизненном опыте людей. Любое эмпирическое знание, полученное людьми из эксперимента или в процессе наблюдения без объяснения причин и механизмов явлений, можно считать интуитивным и использовать при моделировании.

*Семантическое* – смысловое моделирование, логически обосновано с помощью ряда исходных предположений, при этом предположения могут быть гипотезами, созданными на основе наблюдения за оригиналом. В отличие от интуитивного семантическое моделирование строится на знании внутренних механизмов явления. В данную группу входят вербальное (словесное) и графическое моделирование.

*Семiotическое* - знаковое моделирование является наиболее формализованным, т.к. использует не общеизвестные слова и наглядные изображения, а символы. Наиболее представительным подвидом данного моделирования является *математическое* – идеальное знаковое формальное моделирование на языке математики и математическими методами. Например, так называемая «операторная форма» математической модели: моделью называют оператор  $A$ , позволяющий по соответствующим значениям входных параметров  $X$  установить выходные значения параметров объекта моделирования  $Y$ . Записывается это следующим образом:

$$A: X \rightarrow Y; X \in \Omega_x, Y \in \Omega_y,$$

Где  $\Omega_x, \Omega_y$  – множество значений входных и выходных параметров модели.

В зависимости от способа исследования математические модели делятся на аналитические и алгоритмические. *Аналитическое* моделирование - результаты в виде конкретных аналитических выражений с конечным числом арифметических операций. *Алгоритмические* модели могут учитывать практически любое число существенных факторов и используются для моделирования наиболее сложных объектов.

**Объектом** системного анализа и моделирования процессов в техносфере должна быть система «человек-машина-среда», а **предметом** – объективные закономерности возникновения и предупреждения техногенных происшествий при ее функционировании.

Понятие опасности является базовым или фундаментальным и в то же время наиболее сложным, т.к. содержит в себе другие нечетко определенные термины:

**Опасность** – (техногенно-производственная) – наблюдаемое в процессе функционирования человекомашинных систем их свойство представлять реально предсказуемую возможность причинения ущерба.

Понятия, связанные с понятием «опасность» – риск, ущерб техногенный, происшествие, катастрофа, авария и несчастный случай.

Из понятия опасность вытекает понятие **безопасность** - свойство человекомашинных систем сохранять при функционировании в заданных условиях такое состояние, при котором достаточно с высокой *вероятностью* исключаются происшествия, обусловленные воздействием техногенно-производственной опасности на незащищенные компоненты этих систем и внешней для них среды, а ущерб от неизбежных энергетических и вредных материальных выбросов не превышает *допустимого* уровня.

### **Особенности формализации и моделирования опасных процессов**

Под *формализацией* подразумевается специальным образом организованное адекватное представление человеко-машинных систем, их компонентов и опасных процессов в техносфере в форме некоторых искусственных объектов (моделей), а под *моделированием* - использование полученных таким образом объектов, обладающих определенным сходством с оригиналом, для получения новых знаний об исследуемых процессах и их параметрах.

Наиболее оправданы в системной инженерии безопасности не физические, а знаковые (графические, математические и имитационные) модели опасных процессов, которые представляют их в виде последовательности случайных событий, приводящих к возникновению происшествий.

Основная особенность теоретического исследования опасных процессов связана с целесообразностью их двухэтапной формализации и моделирования: вначале - графически, на семантическом уровне, а затем, после введения соответствующих переменных, - на знаковом, с помощью математических и машинных методов. Дело в том, что большое число

(десятки, если не сотни) факторов, реально влияющих на безопасность, и ограниченность оперативной памяти человека (одновременная манипуляция - не более 12-ю объектами), делают невозможным разработку подобных моделей напрямую, т.е. без предварительного построения причинно-следственных диаграмм.

При формализации и моделировании опасных процессов, рекомендуется придерживаться ряда *правил*, главные из которых состоят в обеспеченности такого исследования необходимой информацией и рациональности ее использования. В частности, формализация и моделирование малоэффективны при отсутствии некоторого минимума данных об исследуемых нами процессах и бесполезны - в условиях их полной определенности или возможности проведения полномасштабных натуральных экспериментов.

Следует также помнить, что при моделировании опасных процессов обычно приходится иметь дело с человекомашинными системами. При этом могут иметь место крайности, связанные с излишним усложнением или упрощением используемых моделей таких систем. И то, и другое - плохо: подробная детализация приводит к громоздкости модели и опасности "не увидеть за деревьями леса", тогда как крайняя упрощенность сопровождается неточностью моделирования - угрозой "выплеснуть вместе с водой и ребенка".

### ***Лекция 3. Методологические основы обеспечения безопасности процессов в техносфере. Базовые категории и принципы системного исследования, обеспечения и совершенствования безопасности процессов в техносфере.***

Одним из способов выявления причин аварийности является детальное изучение статистических данных об имевших место происшествиях. Наиболее объективными показателями, применяемыми для статистической оценки уровня безопасности конкретной отрасли техносферы, являются *число происшествий и размеры ущерба от них*. Поэтому для выявления основных факторов аварийности и травматизма должны быть использованы статистические данные о происшествиях, зарегистрированных в течение достаточно продолжительного времени.

Анализ статистических данных о происшествиях в техносфере выявил следующие закономерности, причины, факторы аварийности и травматизма:

- Аварийность и травматизма при массовом проведении технологических процессов можно (с приемлемым уровнем доверия) интерпретировать как потоки случайных событий, количество которых на ограниченных интервалах времени распределено по закону Пуассона, а время между появлением отдельных происшествий - по экспоненциальному закону.
- Возникновение каждого техногенного происшествия является, как правило, следствием не отдельной причины, а результатом появления цепи соответствующих предпосылок



- Инициаторами причинных цепей происшествий в техносфере служат либо ошибки людей, обусловленные их недостаточной профессиональной подготовленностью к работам на технике, характеризуемой конструктивным несовершенством и опасной технологией ее использования, либо отказы технологического оборудования, вызванные собственно низкой его надежностью, а также возникшие в результате ошибочных действий персонала, либо нерасчетные внешние воздействия на людей и технику со стороны рабочей среды.

Общепризнанна преобладающая роль так называемого человеческого фактора в формировании первичных предпосылок, доля которого колеблется по разным источникам от 60-70% в промышленности, до 80-90% - в авиации.

Помимо основных факторов аварийности статистический анализ выявил и другие дополнительные факторы. Выявленные закономерности послужили основанием сформулировать общие представления о природе объективно существующих техносферных и биосферных опасностей.

***Сущность энергоэнтропийной концепции:***

1. Производственная деятельность потенциально опасна, т.к. связана с проведением технологических процессов, а последние – с энергопотреблением (выработкой, хранением, преобразованием тепловой, механической, электрической, химической и другой энергии).
2. техногенная опасность проявляется в результате несанкционированного или неуправляемого выхода энергии, накопленной в технологическом оборудовании и вредных веществах, непосредственно в самих работающих, во внешней относительно их и технике среде.
3. несанкционированный или неуправляемый выход больших количеств энергии или вредного вещества приводит к происшествиям с гибелью и травмиранием людей, повреждениями технологического оборудования, загрязнением окружающей их природной среды
4. возникновение техногенных происшествий является следствием появления причинной цепи предпосылок, приводящих к потере управления технологическим процессом, несанкционированному высвобождению используемой при этом энергии (рассеиванию вредных веществ) и их разрушительному воздействию на людей, объекты производственного оборудования и природной среды
5. инициаторами и звеньями причинной цепи каждого такого происшествия являются ошибочные и несанкционированные действия работающих, неисправности и отказы технологического оборудования, а также неблагоприятное влияние на них внешних факторов
6. ошибочные и несанкционированные действия персонала обусловлены его недостаточной технологической дисциплинированностью и профессиональной неподготовленностью к работам, характеризуемым потенциально опасной технологией и конструктивным несовершенством используемого производственного оборудования

7. отказы и неисправности технологического и производственного оборудования вызваны его собственной низкой надежностью, а также несанкционированными действиями работающих
8. нерасчетные (неожиданные или превышающие допустимые пределы) внешние воздействия связаны с недостаточной комфортностью рабочей среды для человека, ее агрессивным воздействием на технологическое оборудование, а также с неблагоприятными климатическими или гидрогеологическими условиями дислокации производственного объекта.

## ***Раздел 2. Моделирование и системный анализ процессов возникновения происшествий в техносфере***

### ***Лекция 4. Основные принципы системного анализа и моделирования опасных процессов. Основные понятия и виды диаграмм причинно-следственных связей.***

Самым первым и важным этапом системного исследования техносферы считается эмпирический системный анализ рассматриваемых там проблемных ситуаций с обеспечением безопасности техносферы. Он основывается на изучении требований и сборе статистических данных по аварийности и травматизму, выявлении несоответствий между желаемым и действительным состояниями исследуемых опасных процессов, определении состава существенных факторов – тех свойств человекомашиной системы, которые наиболее часто фигурируют в анализируемых данных.

Важность данного этапа состоит в его значимости для последующих рассуждений: в случае недобросовестности проведения эмпирического системного анализа возможны так называемые ошибки третьего рода – неверные выводы при ошибочных исходных предположениях. И наоборот, качественное проведение сбора и обработки стат.данных обеспечивает адекватность отображения реальности, необходимую для дальнейшего моделирования, поскольку любые эмпирические данные – следствие объективно существующих законов природы и общества.

Следующим (после эмпирического системного анализа) этапом служит, проблемно-ориентированное описание объекта и цели моделирования – тех опасных техносферных процессов, которые могут сопровождаться появлением происшествий, а также выявление соответствующих закономерностей и оценка их параметров. Этот этап обычно включает четкое формулирование проблемной ситуации, идентификацию связанной с ней человекомашиной системы, уточнение характера ее взаимодействия с внешней средой, определение цели предстоящего моделирования и системного анализа, выбор соответствующих показателей и критериев.

При этом подразумевается следующее:

- а) выявление сущности противоречий – породивших факторов, а также организаций или лиц, заинтересованных в их ликвидации;
- б) уточнение цели моделирования – определение необходимых для этого изменений, соответствующих методов, показателей и критериев;

в) идентификация объекта – уточнение структуры, свойств и характера взаимодействия его элементов, определение учитываемых и игнорируемых факторов, а также параметров тех из них, которые наиболее существенны для появления и устранения происшествий.

Завершающий этап системного анализа и моделирования конкретных процессов в техносфере связан с проведением их теоретического системного анализа. Такое исследование должно быть направлено на уточнение представлений об условиях возникновения и предупреждения происшествий при функционировании человекомашинных систем.

Особое место при проведении теоретического системного анализа принадлежит моделированию процессов, связанных с возникновением происшествий в техносфере. Это обусловлено неприемлемостью экспериментального изучения тех аспектов, которые касаются жизни и здоровья людей, значительного ущерба материальным ценностям и природным ресурсам. В этих условиях только моделирование позволяет заблаговременно пополнить представления об условиях, закономерностях возникновения и предупреждения техногенных происшествий, компенсировать дефицит в соответствующих статистических данных.

Важным условием успешного завершения теоретического системного анализа опасных техносферных процессов является выявление объективных закономерностей и априорная оценка соответствующего риска. Подобный прогноз предполагает разработку моделей, пригодных для количественной оценки: а) вероятности появления конкретных происшествий –  $Q(\tau)$ ; б) величины соответствующего ущерба от них людским, материальным и природным ресурсам –  $Y(\tau)$ .

Что касается окончания всей процедуры, то она должна завершаться проверкой полученных на каждой ее итерации результатов на новизну и достоверность. Необходимость и особенности такой проверки проиллюстрированы на схеме текстом и линиями со стрелками, указывающими на сведения, нуждающиеся в дополнительном контроле. При этом также предполагается, что проведение всей процедуры системного анализа и моделирования процессов техносферы должно осуществляться непрерывно, с периодическим информированием должностных лиц системы обеспечения безопасности.

Этапы процесса моделирования:

Этап 1. Решение о создании новой модели следует принимать в случае отсутствия более простых путей решения возникшей проблемы (например, путем модификации существующей модели). Обычно необходимость в новых моделях возникает при проведении исследований на стыке различных отраслей, выполнении проектно-конструкторских работ на производстве и транспорте, создании там автоматизированных систем управления, планирования и контроля.

В этом случае *заказчиком* выступает организация, заинтересованная в новой модели и финансирующая работы по ее созданию. После принятия решения она осуществляет поиск наиболее подходящего исполнителя своего

заказа и предоставляет ему для обследования моделируемый объект. Эту миссию и последующие этапы моделирования чаще всего исполняет рабочая группа, включающая специалистов разного профиля – конструкторов, технологов, эксплуатационников, а также прикладных математиков и экспертов по системной инженерии безопасности.

Конечной целью этапа 1 служит разработка соответствующего технического задания, для этого необходимо предварительно:

- Тщательно обследовать собственно моделируемый объект с целью выявления его основных свойств и параметров
- Собрать и проверить доступные данные об объектах аналогах
- Проанализировать литературные источники и сравнить между собой построенные ранее модели данного объекта
- Систематизировать и обобщить весь накопленный материал, разработать общий план создания и использования комплекса моделей.

Предназначением данного этапа является формирование *содержательной постановки задачи*. При этом особую значимость приобретает составление перечня вопросов, на которые должна ответить новая модель. В случае разработки модели аварийности и травматизма в техносфере модель должна ответить на вопросы: а) выявить условия появления и предупреждения происшествий; б) вычислить вероятность их появления.

Этап 2. Следующим этапом служит *концептуальная постановка* задачи или семантическое моделирование исследуемого объекта. Этот этап выполняется рабочей группой без привлечения заказчика. В качестве исходной информации используются полученные к тому моменту сведения о моделируемом объекте и его аналогах, а также уточненные требования к будущей модели. В случае разработки модели аварийности и травматизма в техносфере исходными предпосылками будут: а) объектом моделирования должен быть случайный процесс, возникающий на производственном объекте и завершающийся появлением происшествий; б) каждое происшествие может возникать при выполнении конкретных технологических операций, из-за случайных ошибок персонала, отказов техники и нерасчетных для них внешних воздействий.

Этап 3. Должным образом оформленная концептуальная постановка задачи моделирования должна быть подвержена всесторонней проверке, а затем и предварительному (качественному) анализу. Цель данного этапа состоит в проверке обоснованности концептуальной постановки задачи и корректности ее оформления в виде соответствующей семантической модели. Это осуществляется членами рабочей группы, иногда с привлечением не входящих в нее экспертов.

Проверке подлежат все принятые ранее гипотезы и другие исходные предположения, касающиеся поведения моделируемого объекта. Особое внимание уделяется контролю состава и способов описания тех факторов, которые приняты существенными, а также те свойства и параметры объекта, которые исключены из рассмотрения.

Ранее мы говорили о причинно-следственных диаграммах, их применение особенно актуально при моделировании опасных процессов в техносфере. Например, среди изображенных таким образом десятков факторов, реально влияющих на аварийность и травматизм, могут быть выявлены их сочетания, появление или отсутствие которых необходимо и достаточно соответственно для возникновения и недопущения конкретных происшествий.

Этап 4. Теперь рабочая группа приступает к построению мат. модели, а затем к выбору наиболее подходящего метода ее исследования. Наиболее предпочтительной считается аналитическая постановка и такое же решение моделируемой задачи (в этом случае используется арсенал мат. анализа). Особая ценность аналит. моделирования заключается в возможности точного решения поставленной задачи, в том числе нахождения оптимальных результатов.

А в общем степень приближения результатов приближенными методами моделирования зависит от *погрешностей*, обусловленных преобразованием исходных математических соотношений в численные или имитационные алгоритмы, а также от ошибок округления, возникающих при выполнении любых расчетов на ЭВМ в связи с конечной точностью представления чисел в ее памяти.

Этап 5. Для облегчения процессов моделирования используется ЭВМ, используются либо готовые прикладные программы и мат. алгоритмы, либо разрабатываются новые. Поэтому должны быть соответствующие специалисты.

Этап 6. Предполагается, что системное исследование включает качественный и количественный этапы. Цель качественного анализа – выявление общих закономерностей, связанных с функционированием моделируемого объекта. Цель количественного анализа достигается решением 2-х задач: а) прогнозированием соответствующих характеристик моделируемого объекта; б) априорная оценка эффективности различных стратегий его совершенствования.

Здесь же проводится проверка адекватности модели путем установления соответствия между результатами моделирования и какими-либо другими данными, непосредственно относящимися к решаемой задаче. В качестве эталона сравнения рекомендуется использовать эмпирические данные (натурные эксперименты) либо подобные результаты, полученные в ходе решения так называемой тестовой задачи с помощью других моделей. Подобная проверка должна доказать не только правомерность принятых при моделировании гипотез, но и удовлетворительную (оговоренную техническим заданием) точность моделирования.

Следует различать качественное и количественное согласие результатов сравнения. В первом случае достаточно лишь совпадения некоторых характерных особенностей в распределении оцененных параметров, например, их знаков, тенденций изменения, наличия экстремальных точек и.т.д. Если эти требования соблюдаются, то уместно

оценить совпадение на количественном уровне.

***Лекция 5. Системный анализ и моделирование с помощью диаграмм причинно-следственных связей типа «дерево». Качественный и количественный анализ диаграмм причинно-следственных связей. Логико-лингвистическое моделирование.***

Самое широкое распространение в моделировании опасных процессов получили диаграммы причинно-следственных связей, имеющие ветвящуюся структуру и называемые “деревом происшествия” и “деревом событий” – исходов интересующих нас происшествий. Под такими семантическими моделями подразумеваются не ориентированные, конечные и связные графы, не имеющие циклов. Из последнего следует, что каждая пара их вершин должна быть соединена таким образом, чтобы они одновременно не являлись началом одних и концом других замкнутых маршрутов (цепочек событий со связями между ними).

*Дерево происшествия.* Семантическая модель в форме дерева происшествия обычно включает одно *головное событие*, которое соединяется с помощью конкретных логических условий с промежуточными и исходными предпосылками, обусловившими в совокупности его появление.

Головное событие такого “дерева” представляет собой исследуемую аварию, несчастный случай или катастрофу, а его “ветвями” служат наборы соответствующих предпосылок, образующие их причинные цепи. “Листья” же дерева происшествия - исходные события-предпосылки (ошибки, отказы и неблагоприятные внешние воздействия), дальнейшая детализация которых нецелесообразна.

*Дерево событий.* Подобно дереву происшествия, дерево событий - его исходов также имеет одно событие, называемое *центральным*, и несколько исходящих из него ветвей. В качестве центрального события всегда рассматривается какое-либо происшествие (чаще всего - головное событие соответствующего дерева), а ветвей - сценарии причинения ущерба различным ресурсам, отличающиеся по условиям нежелательного высвобождения, распространения, трансформации и воздействия на них потоков энергии и вещества, высвободившихся в результате происшествия.

В отличие от дерева происшествия, дерево событий - его возможных разрушительных исходов не имеет логических узлов "и" и "или". В сущности, данная семантическая модель представляет собой вероятностный граф (многоярусное дерево решений), построенное таким образом, что сумма вероятностей каждого разветвления должна составлять единицу. Иначе говоря, все события каждого уровня должны образовывать полную группу независимых событий.

***Построение “деревьев” происшествия и его исходов***

Существует способ формализации данной процедуры, основанный на использовании энергоэнтропийной концепции. Данный способ базируется на двух утверждениях: а) происшествия всегда связаны с нежелательным

высвобождением, трансформацией, распространением и губительным воздействием потоков энергии или вещества на различные объекты, оказавшиеся под их влиянием; б) любое происшествие является одновременно и результатом разрушительного выброса накопленного где-либо энергозапаса, и следствием цепи соответствующих предпосылок.

Каждое из этих утверждений может быть использовано при создании рассматриваемых здесь моделей. В частности, для дерева происшествия – второе, а для дерева его исходов – первое. Из второго утверждения следует, что при определении *состава* элементов дерева происшествия и связей между ними, нужно руководствоваться следующими рекомендациями. Во-первых, данная модель должна состоять из одного, *головного* события – собственно происшествия (нежелательного высвобождения вещества или энергии) и множества предшествующих ему предпосылок – ошибок людей, отказов техники и неблагоприятных для них внешних воздействий. Во-вторых, в *структуру* этого дерева следует включать все те логически условные и безусловные связи между такими предпосылками, соблюдение которых необходимо и достаточно для возникновения конкретного разрушительного выброса энергозапаса.

*Учитываемые факторы.* Проведение работ на производстве и транспорте рассматривается как функционирование человекомашинных систем, а основными носителями опасности считать их токсичные и взрывоопасные вещества, источники ионизирующих излучений, движущиеся предметы и сосуды, работающие под высоким давлением. Следовательно, выявление возможных происшествий необходимо увязывать с логикой нежелательного высвобождения их энергии и вещества, т.е. с известными законами энергомассообмена и термодинамики.

В свою очередь старение, загрязнение, увлажнение, перегрев или переохлаждение таких элементов по естественным причинам или в результате внешних воздействий нужно учитывать в качестве *технических предпосылок* к возможным авариям.

Другой важной группой предпосылок к техногенным происшествиям следует считать *ошибочные действия*, непроизвольно или умышленно допущенные людьми при конструировании, изготовлении, монтаже, техническом обслуживании и ремонте техники.

### ***Качественный анализ моделей типа “дерево”***

Основные задачи качественного анализа состоят в выявлении закономерностей возникновения и снижения ущерба от происшествий, т.е. в установлении, например, тех цепочек событий соответствующего дерева, реализация которых приводит к появлению либо к не появлению его головного события, а также в количественной оценке вклада интересующих нас событий-предпосылок.

Наиболее удобны для качественного анализа дерева происшествия так называемые "минимальные сочетания предпосылок", под которыми подразумевается минимально необходимое и достаточное для достижения конкретного результата их множество. **Минимальное пропусковое**

**сочетание (МПС)** включает в себя наименьшее число тех исходных предпосылок дерева происшествия, одновременное появление которых достаточно для возникновения головного события (прохождения сигнала до него). Напротив, **минимальное отсечное сочетание (МОС)** формирует условия непоявления головного события. Это сочетание состоит из исходных событий рассматриваемого дерева, гарантирующих отсутствие происшествия, при условии не возникновения одновременно всех входящих в него событий-предпосылок. *Особенностью* обоих типов минимальных сочетаний служит то, что они теряют присущие им свойства при удалении из каждого такого сочетания хотя бы одного события.

**Анализ значимости и критичности событий.** Для отражения вклада конкретных предпосылок и их сочетаний в появление и предупреждение головного события дерева происшествия, вводятся показатели их значимости или критичности. Эти категории могут использоваться для определения приоритетности осмотра, технического обслуживания и профилактики неисправностей того технологического оборудования, которое является причиной появления более значимых отказов, а также указывать на необходимость тщательного контроля соответствующих алгоритмов деятельности персонала или параметров рабочей среды. Не менее важны результаты оценки значимости и критичности всех предпосылок при коррекции и оптимизации проектируемых изделий и технологий.

*Применимость критериев значимости.* Основным интерес критерии значимости и критичности исходных предпосылок представляют для выбора первоочередных мероприятий по предупреждению происшествий. При прочих равных условиях, наибольшую эффективность или экономию средств обеспечивают те из них, которые воздействуют на самые значимые и критичные события.

### ***Количественный анализ диаграмм типа “дерево”***

Подготовительным этапом к количественному анализу служит дальнейшая формализация рассматриваемой семантической диаграммы - аналитическое представление заданного ею процесса так называемой *структурной функцией*. В такой аналитической модели, помимо событий и связей между элементами, в качестве исходных данных также используются параметры, характеризующие вероятность или частоту исходных предпосылок на конкретном интервале времени.

*Правила расчета параметров.* В процессе оценки числовых характеристик декомпозированного дерева происшествия, следует руководствоваться рядом правил:

1. Объединенные логическим условием "и"  $n$  предпосылок заменяют одним событием с вероятностью появления  $P_K$  (конъюнкция -  $\wedge$ ):

$$P_K = P_1 P_2 P_3 = \prod_{i=1}^n P_i .$$

2. Соединенные логическим условием "или"  $m$  предпосылок заменяют одним событием с вероятностью  $P_D$  (дизъюнкция -  $\vee$ ), равной:



$$P_D = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_m) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i),$$

которая при  $m = 2$  и  $m = 3$ , рассчитывается по таким зависимостям:

$$P_{/m=2} = P_1 + P_2 - P_1P_2; \quad P_{/m=3} = P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_2 - P_1P_3 - P_2P_3 + P_1P_2P_3.$$

3. При известных структурных схемах безотказности техники, параллельно соединенные элементы соответствуют логическому условию "и" этого дерева, а последовательно соединенные - "или".

4. В случае объединения логическим условием "и" нескольких событий, одно из которых имеет близкую к единице вероятность, а другие - меньшую 0,01, допускается упрощение данной ветви путем отбрасывания события с большой вероятностью возникновения.

5. При объединении логическим условием "или" нескольких событий, одно из которых имеет близкую к нулю вероятность, а другие - на два-три порядка больше, также можно упрощать соответствующую ветвь, но отбрасывать нужно событие с малой вероятностью.

#### ***Моделирование с помощью диаграмм влияния типа «граф»***

Вторым (после деревьев) типом диаграмм причинно-следственных связей являются графы. Рассмотрим возможности использования этих диаграмм влияния для исследования аварийности и травматизма на производстве и транспорте.

*Граф* – геометрическая фигура, состоящая из конечного множества точек (вершин) и соединяющих эти точки линий, если эти линии не ориентированы (т.е. не имеют направлений), они называются ребрами, если ориентированы (т.е. имеют направление) – дугами.

Существуют неориентированные графы (просто графы), в которых вершины соединяются ребрами и ориентированные графы (или орграфы), в которых вершины соединяются дугами.

Одним из достоинств диаграмм влияния является их легкость сопряжения с другими способами формализации и моделирования. На основе предварительно построенных диаграмм могут быть получены математические модели появления аварийности и травматизма. Однако для осуществления перехода от графических моделей к математическим нужна дополнительная символика. Поэтому переменные и константы, подразумеваемые узлами диаграммы влияния, в последующем будем обозначать символами, объединенными в множества:

$U = \{1, 2, 3, \dots, j, \dots, u\}$  - множество узлов или вершин диаграммы

$N = \{v_1, v_2, v_j, \dots, v_u\}$  - множество переменных, им соответствующих

$\Omega_j = \{\omega_1, \omega_2, \omega, \dots\}$  - набор значений, принимаемых  $j$ -й переменной

Для обозначения отношений между переменными (узлами, вершинами) диаграммы влияния также следует использовать соответствующие массивы символов. Эти массивы могут быть представлены следующим образом:

$D_{ij} = \{d_1, d_2, d_3, \dots\}$  - множество дуг (ребер), соединяющих узлы  $i$  и  $j$ .

$A_j$  – вектор дуг предцессоров (выходящих из предшествующих узлу  $j$  и входящих в него)

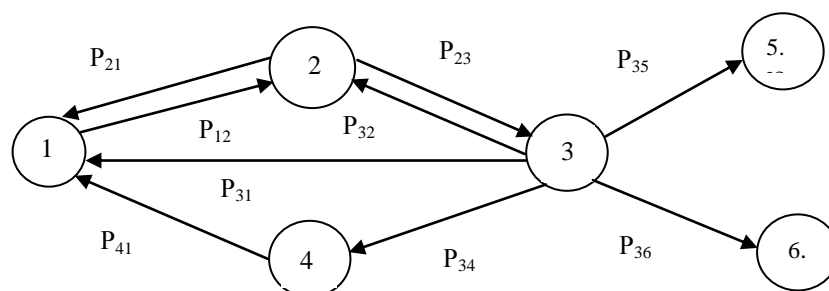
$B_j$  – вектор дуг саксессеров (выходящих из узла  $j$  и связывающих его с последующими)

$P_{ij}$  – вектор мер возможности или вероятности переходов между  $i$  и  $j$

$T_{ij}$  – вектор изменений ресурса (затрат средств или времени) при переходе из узла  $i$  в узел  $j$ .

При моделировании условий возникновения происшествий в техносфере будем использовать ориентированные графы, характеризующиеся определенным набором состояний рассматриваемой человеко-машинной системы и возможными переходами между ними. Графически состояния исследуемого процесса представляются точками, окружностями или другими промаркированными геометрическими фигурами, а переходы между ними – линиями со стрелками на одном конце. Если состояния графа не имеют саксессеров или способны временно приостанавливать моделируемый им процесс, то их иногда называют «поглощающие состояния», а помечаются они точками, расположенными внутри соответствующей геометрической фигуры.

Рассмотрим граф смены состояний:



На данном рисунке процесс возникновения происшествий в человеко-машинной системе характеризуется шестью состояниями. Из них первые 4 являются проходными – безопасное, опасное, предаварийное, послеаварийное, а два последние – состояния системы после смертельного несчастного случая и ее состояния после катастрофы, а также девятью переходами с соответствующими вероятностями. (или так: построим граф смены состояний человеко-машинной системы, характеризуемое шестью состояниями - безопасным, опасным, предаварийным, послеаварийным и двумя состояниями после катастрофы, между ними возможны следующие переходы....)

Следовательно, данный процесс может быть зарегистрирован как имеющий такие значения введенных нами параметров:

$$U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$V = \{\text{вышеприведенные наименования состояний – безопасное, опасное, предаварийное, послеаварийное, состояния после несчастного случая}\}$

$$D = \{1 - 2, 2 - 1, 2 - 3, 3 - 2, 3 - 1, 3 - 4, 3 - 5, 3 - 6, 4 - 1\}$$

$$P = \{P_{12}, P_{21}, P_{23}, P_{32}, P_{31}, P_{34}, P_{35}, P_{36}, P_{41}\}$$

На основе данных параметров могут быть выведены математические формулы, устанавливающие зависимость между количественными показателями безопасности (о них говорили ранее) и основными параметрами человекомашинных систем. А полученные таким образом аналитические выражения могут быть использованы для априорной (предварительной) и апостериорной (статистической) оценки уровня безопасности техносферных процессов.

Посмотрим, как это делается на примере разработке модели процесса возникновения происшествий при функционировании некоторого производственного объекта. Вводят определенные допущения, т.е. ограничиваются минимально необходимым числом наиболее существенных свойств и параметров рассматриваемого процесса. *Рассмотрим граф, показывающий условия возникновения аварийности и травматизма при выполнении некоторого процесса (граф динамической системы).* Учитываться будут только ошибочные действия персонала и отказы используемого технологического оборудования.

При построении графа не учитывались нерасчетные внешние воздействия на людей и технологическое оборудование со стороны окружающей среды.

Итак, в графе рассматривается лишь 5 состояний, через которые может проходить система в процессе своего функционирования с целью выполнения конкретных технологических операций: 1- динамическое равновесие, характеризуемое завершением операции без появления ошибок людей и отказов техники; 2 и 3 – особые ситуации, вызванные возникновением соответственно указанных выше ошибок и отказов; 4 – опасное состояние, обусловленное появлением в системе опасных отказов; 5 – критическая ситуация, связанная с совмещением зоны действия возникшей опасности и незащищенных от нее компонентов системы.

Система имеет 9 переходов, т.к. сделали следующие допущения: а) исключение прямых переходов из 1 в 5, минуя 4, и в 4, минуя 2 и 3; б) учет обратных переходов из 2 и 3 в 1, т.е. необходимость повторения операций после выявления ошибок и отказов; в) возможность взаимно обусловленных особых ситуаций, т.е. переходов внутри и между состояниями 2 и 3.

На вход такой системы поступает сигнал в виде предполагаемого **потока требований** на выполнение  $k$ -х производственных операций, задаваемый параметром —  $\omega_k^{np}(t)$ . Значения параметра этого потока в каждый дискретный момент времени  $t$  будут различными, так как определяются переменными во времени числом  $m$  составляющих их технологических операций  $k$ -го типа и интенсивностью выполнения каждой из них  $\lambda_{ks}(t)$ .

Возникновение же техногенных происшествий при реализации рассматриваемого процесса интерпретируется соответствующими случайными событиями на выходе граф-модели, учитываемыми параметром потока происшествий —  $\omega_{np}(t)$ . Считается также, что появлению каждого такого

события предшествуют так называемые «особые ситуации», обусловленные сочетаниями случайно возникших факторов и требующие нестандартной реакции со стороны персонала или эксплуатируемого им оборудования. Количественной мерой возможности появления происшествий является вероятность ( $Q(t)$ ) появления происшествий в данный дискретный момент функционирования системы.

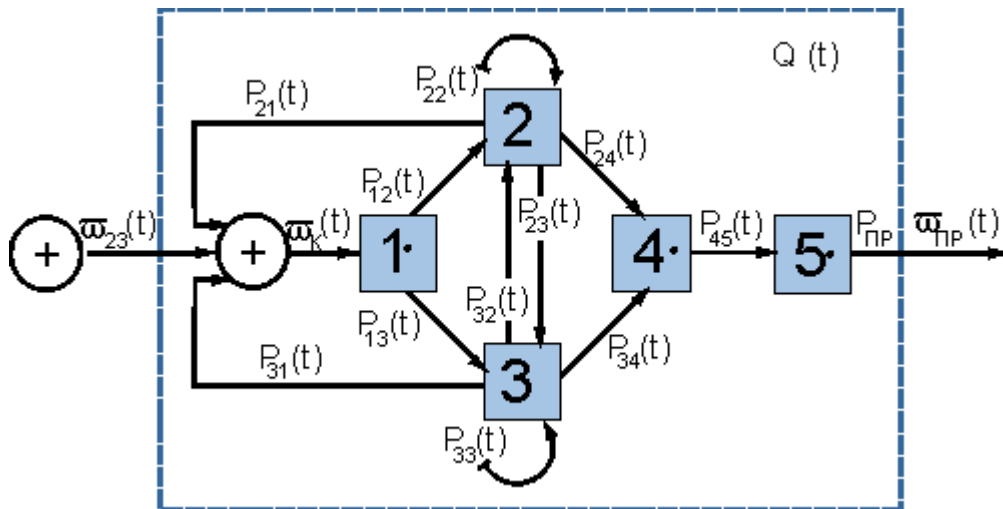


Рис.1. Граф-модель возникновения происшествий

Аналитическое выражение оператора  $Q(t)$  может быть получено в этом случае с помощью тех вероятностей  $P_{ij}$  просеивания событий входного потока при их переходе из состояний  $i \in \{1, 2, 3, 4\}$  в состояния  $j \in \{2, 3, 4, 5\}$  графа.

### Вероятности, используемые в граф-модели

Наименование	Обозначение
Вероятность возникновения ошибок персонала при реализации им заданных алгоритмов действий в $k$ -й операции	$P_{12}(t)$
Условная вероятность появления ошибок одного типа (одних рабочих) при появлении ошибок другого типа (других рабочих)	$P_{22}(t)$
Условная вероятность возникновения ошибок людей при появлении отказов технологического оборудования	$P_{21}(t)$
Вероятность своевременного выявления и исправления ошибок персонала	$P_{13}(t)$
Вероятность появления отказов технологического оборудования при выполнении им заданных функций	$P_{33}(t)$
Условная вероятность появлений отказов одного типа	

(одних элементов) по причине отказа другого типа (других элементов оборудования)	$P_{23}(t)$
Условная вероятность возникновения отказов оборудования при появлении ошибок персонала	$P_{31}(t)$
Вероятность своевременного устранения людьми отказов используемой ими техники	$P_{24}(t)$
Вероятность возникновения «опасных» ошибок персонала	$P_{34}(t)$
Вероятность появления «опасных» отказов оборудования	$P_{45}(t)$
Условная вероятность перерастания опасной ситуации в критическую	$P_{np}(t)$
Условная вероятность перерастания критической ситуации в происшествие	

Знание же величины  $Q(t)$ , являющейся дополнением вероятности выполнения производственного процесса без происшествий  $P_8(t) = 1 - Q(t)$ , позволит получить такое выражение для параметра потока происшествий:

$$\omega_{np}(t) = \omega_k^{np}(t) Q(t) \quad (6.1)$$

При определении входящего в формулу сомножителя  $Q(t)$  не учитывается возможность многократного индуцирования особых ситуаций. Это значит, что отказ любого из компонентов системы «человек—машина» может вызвать с соответствующей вероятностью не более одного последующего отказа техники или одной ошибки персонала. Принятие данного допущения как бы исключает «зацикливание» потоков внутри графа, ограничивая длину цепи предпосылок к особой ситуации двумя такими событиями.

Приемлемость же этого ограничения обоснована на практике контролем действий работающих на технике людей, а также блокировкой или автоматическим отключением оборудования при появлении там опасных отказов или ошибок. Вследствие этого вероятности возникновения третьей и последующих предпосылок будут величинами значительно меньшими по сравнению с вероятностями исходных ошибок и отказов.

Согласно принятым предположениям о необходимых и достаточных для появления техногенных происшествий условиях, могут быть записаны соответственно следующие выражения для параметров потока возможных ошибок персонала и отказов используемой ими техники:

$$\omega_{12}(t) = \omega_k^{np}(t) P_{12}(t)$$

$$\omega_{13}(t) = \omega_k^{np}(t) P_{13}(t) \quad (6.2)$$

Подобным образом получают выражения для параметров потока тех отказов и ошибок, которые индуцированы предшествующими

предпосылками:

$$\begin{aligned}\omega_{23}(t) &= [\omega_{12}(t) + \omega_{22}(t)] P_{23}(t) \\ \omega_{32}(t) &= [\omega_{13}(t) + \omega_{33}(t)] P_{32}(t)\end{aligned}\quad (6.3), \text{ где}$$

$\omega_{22}(t)$  и  $\omega_{33}(t)$  - параметры, учитывающие возможность возникновения ошибок и отказов одного типа (одних компонентов человекомашинной системы) при возникновении ошибок и отказов другого типа (других ее элементов) соответственно.

Значения последних параметров потока случайных событий могут быть найдены по следующим зависимостям:

$$\omega_{22}(t) = \omega_{12}(t) P_{22}(t); \quad \omega_{33}(t) = \omega_{13}(t) P_{33}(t); \quad (6.4)$$

Подставим (6.2) в (6.3) и учтем (6.4) - получим

$$\begin{aligned}\omega_{23}(t) &= \omega_{\kappa}(t) P_{12}(t) P_{23}(t) [1 + P_{22}(t)] \\ \omega_{32}(t) &= \omega_{\kappa}(t) P_{13}(t) P_{32}(t) [1 + P_{33}(t)]\end{aligned}\quad (6.5)$$

По аналогии с (6.3) запишем выражения для определения интенсивностей исправления ошибок персонала  $\mu_{21}(t)$  и устранения отказов технологического оборудования —  $\mu_{31}(t)$  которые (см. второй круг со знаком плюс на рис. 6.1) являются слагаемыми суммарного параметра потока требований на повторное выполнение  $\kappa$ -х производственных операций  $\omega_{\kappa}(t)$ :

$$\begin{aligned}\mu_{21}(t) &= [\omega_{12}(t) + \omega_{32}(t) + \omega_{22}(t)] P_{21}(t) \\ \mu_{31}(t) &= [\omega_{13}(t) + \omega_{23}(t) + \omega_{33}(t)] P_{31}(t)\end{aligned}\quad (6.6)$$

Подстановка выражений (6.2), (6.5) в зависимости (6.6) и несложные преобразования дают следующие формулы для определения искомых составляющих суммарного потока дополнительных требований:

$$\begin{aligned}\mu_{21}(t) &= \omega_{\kappa}(t) P_{21}(t) \{P_{12}(t) [1 + P_{22}(t)] + P_{13}(t) P_{32}(t) [1 + P_{23}(t)]\} \\ \mu_{31}(t) &= \omega_{\kappa}(t) P_{31}(t) \{P_{13}(t) [1 + P_{33}(t)] + P_{12}(t) P_{23}(t) [1 + P_{32}(t)]\}\end{aligned}\quad (6.7)$$

Для отыскания параметров потоков своевременно не исправленных ошибок людей —  $\omega_{24}(t)$  и своевременно не устраненных отказов используемой ими техники —  $\omega_{34}(t)$ , образующих при наложении поток опасных отказов системы «человек—машина», введем дальнейшие допущения. Будем считать, что процесс развития происшествия происходит практически мгновенно, что позволяет рассматривать его модель как безынерционную динамическую систему, исключаящую потерю событий в состояниях 2 и 3 рассматриваемого графа.

Правомерность этого предположения обоснована малостью времени, требуемого для отдельных технологических операций, и быстротечностью нахождения системы в этих состояниях по сравнению с длительностью всего производственного процесса. Следовательно, с

учетом равенства в каждый момент времени потоков событий, входящих и выходящих из состояний 2 и 3 графа, можно утверждать о справедливости таких выражений:

$$\begin{aligned}\omega_{24}(t) &= \omega_{12}(t) + \omega_{22}(t) + \omega_{32}(t) - \omega_{23}(t) - \mu_{21}(t) \\ \omega_{34}(t) &= \omega_{13}(t) + \omega_{33}(t) + \omega_{23}(t) - \omega_{32}(t) - \mu_{31}(t)\end{aligned}\quad (6.8)$$

После подстановки в правую часть равенства (6.8) значений его слагаемых и алгебраических преобразований получим следующую формулу для параметра результирующего потока опасных ситуаций:

$$\omega_{oc}(t) = \omega_{24}(t) + \omega_{34}(t) = \omega_{\kappa}(t) \{P_{12}(t)[1 + P_{22}(t) - P_{21}(t) - P_{22}(t)P_{21}(t) - P_{23}(t)P_{31}(t) - P_{22}(t)P_{23}(t)P_{31}(t)] + P_{13}(t)[1 + P_{33}(t) - P_{31}(t) - P_{33}(t)P_{31}(t) - P_{32}(t)P_{21}(t) - P_{33}(t)P_{32}(t)P_{21}(t)]\} \quad (6.9)$$

С целью исключения из выражения (6.9) неизвестных параметров напомним, что параметр потока фактических требований на выполнение  $k$ -х технологических операций может быть представлен в виде такой суммы:

$$\omega_{\kappa}(t) = \omega_{\kappa}^{np}(t) + \mu_{21}(t) + \mu_{31}(t) \quad (6.10)$$

Подстановка в (6.9) значения  $\omega_{\kappa}(t)$ , найденного по формуле (6.10) с учетом (6.8), и соответствующие преобразования дают следующее выражение для параметра потока происшествий при выполнении производственной операции:

$$\omega_{np}^{(\kappa)}(t) = Q_k(t) \omega_{\kappa}^{np}(t) \quad (6.11)$$

$Q_k(t)$  – вероятность возникновения техногенных происшествий в данный момент времени проведения  $k$ -ой операции, определяемая по такой формуле:

$$Q_k(t) = \frac{[P_{12}(t)[1 + P_{22}(t) - P_{21}(t) - P_{22}(t)P_{21}(t) - P_{23}(t)P_{31}(t) - P_{22}(t)P_{23}(t)P_{31}(t)] + P_{13}(t)[1 + P_{33}(t) - P_{31}(t) - P_{33}(t)P_{31}(t) - P_{32}(t)P_{21}(t) - P_{33}(t)P_{32}(t)P_{21}(t)]}{[1 - P_{12}(t)[P_{21}(t) + P_{22}(t)P_{21}(t) + P_{23}(t)P_{31}(t) + P_{22}(t)P_{23}(t)P_{31}(t)] - P_{13}(t)[P_{31}(t) + P_{33}(t)P_{31}(t) + P_{32}(t)P_{21}(t) + P_{33}(t)P_{32}(t)P_{21}(t)]]} P_{45}(t) P_{np}(t). \quad (6.12)$$

В выражении (6.12) первый множитель (дробь) представляет собой вероятность появления опасных ситуаций, рассчитываемую как сумму вероятностей возникновения своевременно невыявленных и/или неустраненных ошибок людей (ее первое слагаемое) и отказов техники (второе слагаемое). Тогда как два других множителя являются уже соответствующими (см. табл. 6.1) условными вероятностями.

Согласно принятым допущениям, сумма вероятностей  $P_{12}(t)$  и  $P_{13}$  стоящих в виде множителей перед квадратными скобками числителя и

знаменателя этой дроби, никогда не превышает 1. Это же справедливо для вторых сомножителей рассматриваемой дроби (выражений в квадратных скобках), что обусловлено их структурой и размерностями входящих в них параметров. Поэтому для всех операций современных производственных процессов, характеризуемых значениями вероятностей  $P_{13}(t)$  и  $P_{12} \ll 1$ , а  $P_{21}(t)$  и  $P_{31} \rightarrow 1$ , величина всей дроби обычно не превышает одной или двух десятых от единицы.

Особенно наглядно будет видно, что числитель дроби должен быть всегда меньше знаменателя из полученного ниже выражения (6.23), являющегося частным случаем зависимости (6.12), где это условие соблюдается для всех  $P_{13}(t)$  и  $P_{12} < 1$ .

Контроль правильности полученных выражений указывает на возможность определения вероятности возникновения происшествий при выполнении исследуемых производственных процессов в тех случаях, когда известны показатели безотказности и безошибочности занятых в них оборудования и эксплуатирующего его персонала, а также некоторые другие параметры конкретных технологических операций и данного процесса в целом.

Так, при известном количестве типов составляющих их операций  $m$ , предполагаемой интенсивности работ  $\omega_k^{np}(t)$  и найденной с помощью предложенной модели вероятности  $Q_k(t)$ , уровень безопасности конкретного производственного процесса может быть оценен такой формулой:

$$P(\tau) = \exp - \left\{ \left[ \sum_{k=1}^m \omega_k^{np}(t) Q_k(t) \right] \tau \right\} \quad (6.13)$$

тогда как вероятность возникновения аварийности и травматизма в рассматриваемых условиях будет определяться ее дополнением до единицы:

$$Q_k(t) = 1 - \exp - \left\{ \left[ \sum_{k=1}^m \omega_k^{np}(t) Q_k(t) \right] (6.14) \tau \right\}$$

Таким образом, моделирование условий появления аварийности и травматизма с помощью потокового графа подтверждает возможность получения аналитических выражений, пригодных для исследования и количественной оценки выбранных ранее показателей качества системы обеспечения безопасности.

При обосновании методов определения параметров формулы (6.12) исходят из информации, полученной в ходе разработки производственных процессов, а также принятых выше предположений и допущений. Как оцениваются условные вероятности:  $P_{45}(t)$  и  $P_{np}(t)$  соответственно появления критических ситуаций и происшествий после возникновения опасных и критических ситуаций.

Согласно принятому выше определению, наступление критических ситуаций (достижение состояния графа 5) возможно лишь при совмещении незащищенных элементов системы «человек-машина» и зоны действия



возникшей ранее опасности. Следовательно, для достоверного отыскания значений вероятности перерастания опасной ситуации в критическую  $P_{45}(t)$  необходимо иметь данные о параметрах, характеризующих опасные факторы исследуемой человекомашиной системы. В большинстве случаев, однако, можно утверждать, что верхняя оценка величины этой вероятности равна

$$P_{45}(t) = \tau_{\kappa}^{(4)}(t) / \tau_{\kappa}(t) \quad (6.15),$$

где  $\tau_{\kappa}^{(4)}(t)$ ,  $\tau_{\kappa}(t)$  - значения времени возможного нахождения незащищенных элементов конкретной человекомашиной системы в зоне возможного действия опасных производственных факторов (состоянии графа 4) и продолжительности  $\kappa$ -й операции в дискретный момент времени  $t$  соответственно.

Для определения вероятности перерастания критической ситуации в происшествие  $P_{np}(t)$  потребуется детальное исследование необходимых для этого условий. В первом приближении его возникновение может быть представлено в виде произведения (а иногда и суммы) таких случайных событий, как отказ технических средств защиты, предусмотренных на случай опасных ситуаций, и (или) ошибка в действиях персонала по ликвидации их нежелательных последствий. Считая перечисленные условия необходимыми и достаточными для возникновения техногенных происшествий, может быть составлена структурная схема безопасности функционирования человекомашиной системы при появлении в ней критической ситуации.

На рис. 6.2 изображена одна из таких схем, включающая следующие обозначения:  $r$  — число технических средств защиты задействованных при выполнении конкретной производственной операции (верхний блок), и  $v$  — количество персонала, занятого в ней (нижний блок схемы). В этих условиях перерастание критической ситуации в происшествие (переход события через состояние графа 5) эквивалентно его пропуску хотя бы одним из блоков структурной схемы. Следовательно, можно записать такое соотношение

$$P_{np}(t) = 1 - P_m(t)P_5(t), \quad (6.16)$$

где  $P_m(t)$  — вероятность безотказной работы технических средств защиты в дискретный момент времени  $t$  проведения производственной операции, найденная при условии, что к ее началу они были исправны;  $P_5(t)$  — вероятность безошибочного выполнения персоналом тех алгоритмов действий, которые предусмотрены на случай возникновения критической ситуации (состояние 5), рассчитываемая при аналогичных условиях.

Значение входящей в формулу (6.16) вероятности  $P_m(t)$  может быть определено известными методами прогноза показателей надежности в технике.

Например, для параллельного соединения рассматриваемых средств величина этой вероятности должна рассчитываться по такой формуле:

$$P_m(t) = 1 - \prod_{k=0}^r [1 - P_m^{(k)}(t)], \quad (6.17),$$

тогда как при последовательном соединении технических и технологических средств обеспечения безопасности, достаточно перемножения  $P_m^{(к)}$ .

При определении данной вероятности в других случаях необходимо руководствоваться соответствующими положениями теории надежности. При этом следует учитывать лишь те отказы технических средств защиты, которые сопровождаются воздействием случайно возникших опасных факторов на не защищенные от них элементы техники и части тела человека. Иначе говоря, вероятности  $P_m^{(к)}$  по отношению к иным отказам средств защиты равны единице и здесь не учитываются.

Для предварительной оценки второго сомножителя формулы (6.16) — вероятности  $P_s(t)$  необходимы данные о численности  $v$  персонала и значениях вероятностей  $P_5^h(t)$  безошибочного и своевременного выполнения им действий, предусмотренных на случай возникновения критических ситуаций. Значения параметра  $v$  и перечень подобных нестандартных ситуаций могут быть найдены путем изучения эксплуатационно-технологической документации с учетом имеющегося аналогичного опыта.

В первом приближении будем считать, что значение искомой вероятности безошибочных и своевременных действий персонала по ликвидации возникших критических ситуаций может определяться по следующей формуле:

$$P_5(t) = \left[ \prod_{h=0}^v P_5^{(h)}(t) \right] / K_{э.у},$$

где  $K_{э.у}$  — коэффициент, используемый для учета степени экстремальности либо дискомфорта условий труда на рабочем месте человека-оператора. Его значения могут быть найдены в соответствующей литературе по эргономике либо с помощью табл. П. 1.2.

Величина входящей в эту формулу вероятности безошибочных и своевременных действий человека  $P_5^{(h)}(t)$ , а также имеющиеся в модели (6.12) вероятности выполнения других подобных действий:  $P_{21}$  - по ликвидации ошибок, замеченных им при реализации заданных алгоритмов выполнения  $k$ -й работы, и  $P_{31}$  — по своевременному устранению возникших там же отказов технологического оборудования, равно как и  $P_{12}(I)$  — вероятности возникновения ошибок персонала, могут быть определены с помощью теории эрготехнических систем, которую мы в данном курсе рассматривать не будем, если при расчетах эти величины потребуются, воспользуемся табличными данными. То же касается и определения величин  $P_{32}$ ,  $P_{23}$ ,  $P_{22}$ ,  $P_{33}$ .

Учитывая трудоемкость определения условных вероятностей  $P_{32}$ ,  $P_{23}$ ,  $P_{22}$ ,  $P_{33}$  целесообразно провести некоторое упрощение формулы (6.12).

Оказывается, что рассмотренная выше модель может быть значительно упрощена. Легче всего сделать это путем исключения внутри графа потоков с параметрами  $\omega_{33}(t)$ ,  $\omega_{23}(t)$ ,  $\omega_{32}(t)$ ,  $\omega_{33}(t)$ , что эквивалентно присваиванию в формуле (6.12) соответствующим вероятностям нулевых значений. В этом

случае данная формула принимает более обозримый вид:

$$Q_k(t) = P_{45}(t)P_{np}(t) \frac{P_{12}(t) + P_{13}(t) - P_{12}(t)P_{21}(t) - P_{13}(t)P_{31}(t)}{1 - P_{12}(t)P_{21}(t) - P_{13}(t)P_{31}(t)}. \quad (6.23)$$

Завершим проверку правильности полученных здесь аналитических моделей путем изучения реакции левых частей выражений (6.12), (6.15) — (6.25) на изменение входящих в их правые части параметров, а затем и проведем ее качественный анализ.

Оказывается, что при нижних и верхних граничных значениях вероятностей  $P_{ij}(t)$  и  $P_{np}$ , равных соответственно нулю и единице, величина  $Q(i)$ , как это следует из зависимостей (6.12) и (6.23), становится также равной этим крайним значениям. Подобный эффект проявляется и для вероятности  $Q(\tau)$  в случае принятия в формуле (6.25) нулевых или бесконечно больших значений времени и параметра потока происшествий —  $\omega_{np}$ .

Повышение же интенсивности рассматриваемых работ (рост параметров  $\omega_k^{np}(t)$  и  $m$ ), увеличение вероятностей  $P_{12}(t)$ ,  $P_{13}(t)$  возникновения отказов и ошибок, равно как и снижение числа и эффективности технологических средств обеспечения безопасности — рост вероятностей  $P_{np}(t)$  и  $P_{45}(t)$  способствуют [см. формулы (6.12) и (6.23)] аварийности и травматизму на производстве. В то же время безошибочное выполнение персоналом своих функций и безотказное функционирование используемого ими оборудования [ $P_{13}(t) = P_{12}(t) = 0$ ], а также безошибочное и своевременное устранение указанных предпосылок [ $P_{31}(t) = P_{21}(t) = 1$ ] полностью исключают, в соответствии с теми же формулами, появление происшествий.

Таким же образом можно констатировать соответствие между разработанной моделью и объективно действующими закономерностями аварийности и травматизма на производстве.

### ***Раздел 3. Моделирование и системный анализ процессов причинения техногенного ущерба***

#### ***Лекция 6. Общие принципы моделирования и системного анализа процессов причинения техногенного ущерба. Модели и методы прогнозирования зон, вероятности и тяжести техногенных происшествий.***

К основным поражающим факторам техногенного характера относят:

- а) термический (тепловое излучение, «удар» пламенем или криогенным веществом) — 56% от общего числа причин разрушительного воздействия;
- б) бризантно-фугасный (дробящее, метательное или осколочное воздействие движущихся тел, включая непосредственные продукты взрыва) — 29%;

в) агрессивные или токсические вещества вредных или аварийно опасных химических веществ — около 10%.

Выделяют 4 этапа в развитии происшествя:

1. высвобождение (расконсервация) накопленной в ЧМС системе энергии или запасов вредного вещества вследствие возникшей там аварии;
2. неконтролируемое распространение (трансляция) их потоков в процессе истечения вещества и энергии в новую для них среду и перемещение в ней;
3. физико-химическое их превращение (трансформация) там с дополнительным энерговыделением и переходом в новое агрегатное или фазовое состояние;
4. разрушительное воздействие (адсорбция) первичных потоков и/или наведенных ими поражающих факторов на незащищенные от них объекты.

Целью априорной количественной оценки техногенного риска служит обычно не точный количественный прогноз соответствующей случайной величины, который невозможен в принципе для таких сложных систем, как человекомашинные, а сравнительная количественная оценка опасности нескольких однотипных производственных или транспортных объектов и оценка эффективности альтернативных мероприятий по снижению возможного техногенного риска.

Областью *предпочтительного использования* рассматриваемой методики будут сравнительно простые производственные и транспортные объекты, эксплуатация которых декомпозируется на отдельные технологические операции - функционирование простейших человеко-машинных систем.

В качестве основного *показателя опасности* исследуемых объектов используется величина связанного с их функционированием техногенного риска, рассчитываемая как математическое ожидание случайной в общем случае величины ущерба.

$$R_{\tau B} = M_{\tau}[Y] = \sum_{k=1}^m Q_{kc} Y_{kc} + \sum_{l=1}^n Q_{ln} Y_{ln}$$

где  $k=1...m$  -число типов происшествий (аварийных вредных выбросов), возможных при функционировании данного предприятия;

$Q_{kc}, Y_{kc}$  -вероятности возникновения происшествия каждого типа за время  $\tau$  и размеры обусловленного ими среднего ущерба;

$l = 1...n$  -число типов непрерывных энергетических (шум, вибрации, тепло...) и материальных (дым, шлаки...) вредных выбросов;

$Q_{ln}, Y_{ln}$  - вероятности появления за время  $\tau$  выбросов каждого типа и размеры обусловленного ими среднего ущерба.

Другой способ упрощенного прогноза последствий разрушительного воздействия АОХВ связан с определением "*зон поражения*". В этом случае априорную оценку величины риска (среднего ущерба таким ресурсам) удобно рассчитывать по следующей формуле:

$$R_{\tau Y} = M_{\tau}[Y] = \sum_{k=1}^3 (Q_{kq} \cdot S_{kq} \cdot F_k \cdot C_k) + \sum_{k=1}^3 (S_{kd} \cdot F_k \cdot C_k),$$

где  $Q_{kq}$  -вероятность причинения людским (k=1), материальным (k=2) и природным (k=3) ресурсам ущерба заданной степени тяжести за время  $\tau$ ,

$S_{kq}, S_{kd}$  -соответственно площади зон вероятного и достоверного уничтожения рассматриваемых ресурсов поражающими факторами;

$F_k, C_k$  - средние плотность и стоимость единицы каждого ресурса в зонах вероятного и достоверного поражения.

Для априорной оценки техногенного ущерба удобно пользоваться зависимостями между вероятностями вывода из строя учитываемых нами ресурсов и полученной ими мощностью дозы вредных факторов -  $DP$ . Такие зависимости, называемые "доза-эффект" -  $R(DP)$ , могут иметь различный характер: как простой (линейно-беспороговый), так и более сложный (нелинейно-ступенчатый).

Непосредственными *источниками опасности* исследуемых нами производственных и транспортных объектов следует считать генераторы или аккумуляторы энергии и вредных веществ – насосы и компрессоры, цистерны и сосуды с токсичными жидкостями, резервуары и трубопроводы со сжатыми газами, пожароопасные и взрывчатые вещества, подвижные энергоблоки.

При *идентификации* конкретных источников опасности, нужно руководствоваться величиной накопленной в них энергии, а при принятии решения о необходимости дополнительных мер по обеспечению безопасности или составлению декларации о безопасности - предельно допустимыми запасами энергии и вредных веществ.

Для *выявления сценариев* нежелательного высвобождения энергозапаса должны использоваться как эмпирические данные и сравнительно простые диаграммы типа дерево событий (преимущественно - в ходе выполнения домашних и курсовых работ), так и результаты более адекватного моделирования - при оценке и декларировании безопасности производственных и транспортных объектов, а также в процессе дипломного проектирования.

*Оценку* вероятности или *частоты сценариев* разрушительного воздействия вредных веществ и энергии нужно осуществлять по результатам моделирования, полученным на предыдущем шаге, или с помощью статистических данных об аналогичных происшествиях.

Определение *количества* аварийно высвободившейся энергии или *объема* вредных веществ также следует проводить с помощью моделей соответствующих истечений.

Оценку частоты или вероятности причинения *непосредственного* (прямого) *ущерба* следует проводить исходя из частоты воздействия поражающих факторов на не защищенные от них ресурсы и полученной ими мощности дозы поражающего фактора.

Величина *зон поражения* людских, материальных и природных ресурсов,

а также уровни наблюдаемых в них опасных факторов могут рассчитываться приближенно, путем представления зон достоверного поражения кругом или шаром с радиусами, оцененными по статистическим данным.

Оценка частоты или вероятности причинения *вторичного* (косвенного) *ущерба*, всегда крайне желательна, поскольку тяжесть таких косвенных издержек обычно превышает прямой ущерб в 3-4 раза.

*Риск* причинения ущерба конкретному ресурсу может быть рассчитан стандартным способом.

Количественная оценка интегрального техногенного риска, учитывающего ущерб от конкретного производственного или транспортного объекта для всех видов ресурсов (людских, материальных и природных), должна проводиться подобно предыдущим этапам рассматриваемой методики.

Для *проверки правдоподобности* результатов, полученных при прогнозировании риска, а также при выполнении курсовых работ по отдельным аспектам моделирования опасных процессов, целесообразно руководствоваться имеющимися статистическими данными.

### ***Лекция 7. Системный анализ и моделирование неконтролируемого истечения и распространения энергии и вредного вещества в техносфере.***

Наиболее простыми из моделей и методов данного класса являются те, которые описывают высвобождение энергии (механической, тепловой, электрической), а также истечение инертных или не меняющих при этом агрегатное состояние жидкостей и газов. Сложнее обстоит дело с ситуацией выброса в-в, меняющих свое агрегатное состояние в результате интенсивного вскипания и испарения после разгерметизации емкости, например, сжиженных газов или криогенных жидкостей.

Моделирование и прогноз параметров распространения химических и радиоактивных в-в связаны с необходимостью учета большого числа факторов. Например, концентрация данных в-в в точке с радиус-вектором  $r(x, y, z)$ , обычно выражаемая функцией  $c(r, t)$  этих прямоугольных координат и времени, зависит от трех групп факторов: а) источник – его геометрия, расход, термодинамические параметры; б) среда – температурная и скоростная стратификация на макроуровне, а также ее локальная неоднородность, нерегулярность и турбулентность; в) вредное в-во – плотность, размер частиц, их склонность к физико-химическим превращениям после контакта со средой и ограничивающей поверхностью.

Минимальный объем *входной информации*, должен включать следующие сведения:

1. координаты местоположения, энергетические потенциалы, масса и термодинамические параметры вредного в-ва, содержащегося в их аккумуляторе или генераторе, а также геометрия поверхности истечения из них;
2. мощность истекающего потока энергии и физико-химические характеристики аварийно-опасного или иного вредного в-ва,

определяющие их агрессивность либо инертность по отношению к новой среде;

3. геометрия и динамика параметров этой среды, определяющие ее сопротивление истечению, распространению или рассеянию в ней потоков энергии и вредного в-ва.

Объем *выходной информации* должен включать следующее:

1. количество заполнивших новую среду вредных в-в или уровни потенциала потоков энергии в различных точках соответствующего пространства;
2. геометрические характеристики зоны загрязнения этими в-вами или вредного воздействия такой энергией, а также динамика ее размеров;
3. локальные характеристики концентрационного поля в точках этой зоны, включая изолинии или изоповерхности потенциалов энергии и токсонагрузок вредного в-ва.

Чаще всего, при оценке массы или объема утечки аварийно опасных и других вредных в-в, находящихся в каком-либо сосуде в газообразном или жидком состоянии, рекомендуется рассматривать по два наиболее вероятных сценария: 1) высвобождение всего их количества по причине полного разрушения сосуда; 2) частичное опустошение емкости или магистрали вследствие нарушения их герметичности.

Существуют способы предварительной оценки размеров зон распространения вредного в-ва и энергии. Исходя из невозможности рассмотрения всех потенциальных жертв и вредных факторов, ограничимся прогнозом наиболее характерных зон их поражения. Выделяют *три случая*: 1) аварийное высвобождение и неконтролируемое распространение потоков энергии, сопутствующих механическому воздействию движущихся тел, 2) физико-химические превращения взрывопожароопасных веществ и 3) распространение в атмосфере токсичных парогазовых и мелкодисперсных смесей.

Рассмотрим *первую* ситуацию, т.е. прогноз зон распространения аварийных потоков механической энергии, то есть подразумевается рассмотрение эффектов, связанных с а) инерционными силами движущихся тел или их осколков и б) потенциальной энергией, накопленной ими до начала перемещения. В первом случае обычно имеется в виду кинетическая энергия  $\mathcal{E}_k$  и работа так называемой центробежной силы  $F_{цб}$ ; во втором — энергия, накопленная под влиянием тяготения Земли или обусловленная упругостью газа, который находится в объеме  $V(\text{м}^3)$ , под давлением  $P$  (Па).

Энергия и силы, порожденные инертностью массы движущихся тел, рассчитываются по соотношениям классической физики:

$$\mathcal{E}_k = M W^2/2; \quad F_{цб} = M W^2/R,$$

а количество потенциальной энергии:  $\mathcal{E}_{пт}$  — тяготения и  $\mathcal{E}_{пт}$  сжатых газов по соотношениям:

$$\mathcal{E}_{пт} = MgB; \quad \mathcal{E}_{пт} = PV_\gamma [(P/P_0)^{(\gamma-1)/\gamma}] / (\gamma - 1),$$

где  $W$ ,  $R$  — скорость (м/с) и радиус (м) траектории криволинейного движения тела в данный момент;  $M$ ,  $B$  — масса (кг) и высота (м) относительно другого

расположенного ниже предмета:  $P$ ,  $P_0$  — давление газа соответственно до и после расширения;  $\gamma$  — показатель адиабаты, Па;  $g$  — ускорение свободного падения.

Для определения размера области пространства, в пределах которого может проявиться вредный эффект рассмотренных выше видов механической энергии, помимо ее величины, необходимо знать и сопротивление, оказываемое соответствующим телам со стороны других тел или несущей среды. В общем случае путь разрушительного распространения потоков такой энергии определяется как частное от совершаемой ею работы и противодействующей этому силы. Применительно к движению в атмосфере величина аэродинамического сопротивления  $F_{ac}$  оценивается, например, по такому математическому соотношению:

$$F_{a.c.} = (\rho W^2 / 2) \Pi_{л.с.}, \text{ где}$$

$k_{л.с.}$  - коэффициент лобового сопротивления тел различной формы, учитывающий снижение соответствующей силы из-за неполного разрежения потока после их обтекания;  $\rho$  — плотность атмосферы,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W$  — скорость тела или потока воздуха,  $\text{м/с}$ ;  $\Pi_{л.с.}$  - площадь лобового сопротивления тела, т.е. того его сечения, которое перпендикулярно скорости движения тела или направлению обтекающего его потока,  $\text{м}^2$ .

Приведенные аналитические зависимости свидетельствуют о том, что область неуправляемого распространения потока механической энергии однозначно определяется величиной как самой этой энергии, так и противодействующей ей силы. Это проявляется, например, в том, что при столкновении твердых тел возникают большие силы, а совершаемая ими работа завершается разрушением или изменением положения тел в пространстве. В то же время взаимодействие неупругих тел приводит к их взаимному нагреву и деформации.

Статистика современных аварий и катастроф свидетельствует: наибольший техногенный ущерб людским, материальным и природным ресурсам (60%) ныне связан с пожарами и разрушениями зданий (транспортных средств). При этом основными поражающими факторами являются: тепловой - 56%, фугасный - 16%, осколочный - 13% и токсический - 7%. Большинство техногенных происшествий обусловлено неконтролируемым высвобождением энергии, которая накоплена во взрывчатых веществах (ВВ), топливовоздушных смесях (ТВС) или в сосудах, находящихся под давлением сжатых газов.

#### ***Методы прогнозирования размеров зон поражения.***

*Оценка зон фугасного поражения.* Основным поражающим фактором аварийного взрывного высвобождения энергии является воздушная ударная волна (ВУВ). Чтобы количественно оценить последствия ее фугасного воздействия на людские, материальные и природные ресурсы, необходимо знать характер изменения избыточного давления на фронте ВУВ -  $\Delta P_{\phi}$ . Чаще всего этот параметр определяется по формуле М.Садовского:

$$\Delta P_{\phi} = (106/X_{\phi}) + (428/X_{\phi}^2) + (1400/X_{\phi}^3), \text{ кПа; } X_{\phi} = X_{\phi} / M^{1/3},$$

где  $X_{\phi}$  - расстояние от предполагаемого центра взрыва, м;



$M$  - масса взрывающегося вещества, эквивалентная по мощности соответствующему весу тротила, кг.

*Прогноз материального ущерба.* Для уточненной предварительной оценки размеров ущерба конкретным объектам, находившимся в зоне возможного поражения и подвергнутым барическому воздействию, должны учитываться параметры их стойкости.

Так, для зданий и сооружений могут использоваться а) два давления: базовое  $-\Delta P_{jcp}$  и среднее арифметическое от давлений, приводящих к повреждениям определенной тяжести  $-\Delta P_{0jcp}$ , и б) два коэффициента, указывающих на их стойкость по отношению к ВУВ:  $K_{Hj}$  - его высоты ( $H_j$ , м) и  $K_{Fj}$  - доли фронтального остекления ( $F_j$ , %).

Эти коэффициенты рассчитываются по следующим формулам:

$$K_{Hj} = 1 + (3,40/H_j); K_{Fj} = [(1,36 + F_j)^2 + V_j(1 - F_j)]^{1/2} - 0,36,$$

а уточненные давления  $-\Delta P_{ji}$ , приводящие к разрушениям каждой из рассмотренных выше четырех степеней тяжести, - таким образом:

$$\Delta P_{ji} = \Delta P_{jcp}(0,07 + 0,37 \cdot i); \Delta P_{jcp} = K_{Hj} \cdot K_{Fj} \cdot \Delta P_{0jcp};$$

Входящий во вторую формулу параметр  $\Delta P_{0jcp}$  определяется экспериментально

*Критерии оценки ущерба.* При известных значениях давлений  $\Delta P_{jcp}$ ,  $\Delta P_{0jcp}$  и  $\Delta P_{ji}$ , следует руководствоваться 1) детерминистскими или 2) вероятностными критериями оценки тяжести ущерба.

В первом случае, например, такими: а) если барическое давление  $\Delta P_{j4}$  превышает  $\Delta P_{j4}$ , то в данной точке зоны поражения будут необратимые повреждения зданий и транспортных средств, массовая гибель людей; б) при давлениях на фронте ВУВ  $\Delta P_{j3} < \Delta P_{\phi} \leq \Delta P_{j4}$ , возможны реставрация неподвижных и подвижных сооружений, выживание людей; в) при  $DR_2 < \Delta P_{\phi} \leq DR_3$  - полное разрушение остекления зданий и увечья людей; г) при  $DR_1 < \Delta P_{\phi} \leq DR_2$  - незначительные повреждения остекления и мелкие ушибы людей.

Во втором случае - при вероятностной оценке исхода фугасного воздействия на здания и сооружения, учитывающей реально наблюдаемый разброс прочностных свойств даже однотипных объектов, можно руководствоваться зависимостью между вероятностями конкретных ( $i$  -ых) степеней повреждения -  $O_i$  и ее средним значением -  $i_{cp}$ .

*Прогноз зон теплового поражения.* Оценка ущерба людским, материальным и природным ресурсам от данного фактора наиболее актуальна при оценке ущерба от аварийного выброса веществ, способных в последующем выделять накопленную в них химическую энергию следующими тремя основными сценариями: а) факельное горение струи топлива, б) поверхностное его выгорание в пределах образовавшегося бассейна, в) испарение сжиженных газов с образованием ТВС, завершающееся вспышкой в форме огненного шара или взрывом типа BLEVE.

Поражающий эффект в первых трех случаях определяется величиной

теплового импульса, излучаемого очагом пожара или взрыва, и зависит от диаметра и массы огненного шара, скорости его выгорания, а также от стойкости подверженных воздействию объектов и полученной ими тепловой дозы.

При определении разрушительного эффекта тепловых факторов, рекомендуется руководствоваться следующим. Для возникновения у людей ожогов первой степени, требуется удельная тепловая мощность не менее  $1,7 \text{ кВт/м}^2$ . Умеренные и тяжелые ожоги второй степени возникают соответственно при получении человеком тепловой энергии в  $42$  и  $84 \text{ кДж/м}^2$ , а тяжелые ожоги третьей степени требуют  $162 \text{ кДж/м}^2$ .

***Лекция 8. Системный анализ и моделирование процессов разрушительной трансформации и адсорбции энергии и вещества в техносфере. Особенности моделирования и оценки ущерба людским, материальным и природным ресурсам.***

*Актуальность и состояние проблемы.* Для определения эффекта токсического поражения человека и других биоособей, необходимо как можно точнее оценить полученную ими ингаляционную дозу химических веществ или экспозиционную - радиоактивных. Рассмотрим метод прогноза полученных людьми токсодоз, исходя из нестационарного концентрационного поля, которое генерируется мгновенным или непрерывным источником, находящимся в точке  $\underline{x}'(x_1', x_2', x_3')$  и извергающим массу вредного вещества  $-M$ , а также учитывая степень его отражения от земли и ветер, обычно совпадающий с осью  $x_1$  и имеющий скорость  $u_1$ .

*Способы прогноза токсического ущерба.* В общем случае концентрация  $c(\underline{x}, t)$  будет считаться функцией двух основных параметров - расстояния между источником загрязнения и местом расположения поражаемых ресурсов (между точками  $\underline{x}'$  и  $\underline{x}$ ), а также длительности времени с момента выброса вредного вещества -  $t_0$ , длительности воздействия таких вредных веществ  $\tau = t - t_0$  и их концентрации в конкретной точке  $\underline{x}(x_1, x_2, x_3)$  в данный момент времени -  $t$ . Параметр  $t_0$  может обозначать как момент начала выброса вредных веществ источником, так и начало их поглощения человеком, не имеющим средств защиты органов дыхания и оказавшимся в зоне рассеяния токсичных веществ. Смысл символов  $t$ ,  $t_0$  и  $\tau$  будет оговариваться в каждом конкретном случае.

Возможный поражающий эффект вредных веществ (например, процент гибели людей  $-y$  или других биоособей) может быть оценен *двумя способами*, каждый из которых основывается на расчете поглощенных токсодоз и использовании зависимостей “доза-эффект”. При прогнозе разрушительного эффекта, должны также учитываться параметры стойкости потенциальных жертв, зависящие от их возраста, состояния здоровья и интенсивности физической нагрузки (объема вдыхаемого загрязненного воздуха).

*Первый способ - приближенный.* Он базируется на допущении о стационарности поля концентраций ( $C=c(\underline{x}, t)=\text{const}$ ) и применении известных пробит-функций. Мощность получаемой за этот период токсодозы

рассчитывается по такой формуле:  $DP=C^n \cdot \tau$ . Входящий в эту формулу показатель степени  $n$  и другие постоянные коэффициенты, совместно со смертельно опасными концентрациями типичных вредных веществ  $-LCy$  ( $мг/м^3$ ), приведены в таблицах.

*Второй* (более точный) способ базируется на специальных моделях поглощения и разрушительного воздействия вредных веществ на человека и другую биоту. В отличие от первого, здесь предполагается нестационарное концентрационное поле, которое создается выбросом количества  $K=M$  таких веществ из точки  $\underline{x}'$  и их распространением под воздействием движущейся воздушной или водной среды, с учетом эффектов турбулентного или дисперсионного обмена между ними. Общее выражение для концентрации в интересующей нас точке  $\underline{x}$  имеет такой вид:

$$C(x,t) = M \cdot G(\underline{x}, \underline{x}', \tau),$$

где  $G(\underline{x}, \underline{x}', \tau)$  - функция, называемая "фактором метеорологического разбавления" вредных веществ в зоне рассеяния.

*Модификация и упрощение моделей.* Если принять, что  $t_0=0$  и определить  $\tau$  как разность между началом и концом времени ингаляции ( $t_H - t_K$ ), то суммарную дозу  $D_H$ , полученную людьми от источника *непрерывных* выбросов (для всех  $t > \tau$ ) следует складывать из двух частей: а)токсодозы, приобретенной в период работы источника, и б)токсодозы, полученной после прекращения вредных выбросов, считая, что люди остались подверженными их воздействию, хотя интенсивность его будет неуклонно снижаться.

*Анализ опасности режимов выброса.* Практический интерес представляет сравнительная оценка доз, полученных людьми от одного и того же количества  $M$  вредных веществ за время  $\tau=0-t_K$ , при условии, если их выброс был: а)мгновенным и б)непрерывным, с постоянной интенсивностью  $m=M/\tau$ . Это нетрудно сделать с помощью вышеприведенной формулы.

Оказывается, что для мгновенного выброса, токсодоза, полученная человеком, всегда *превышает* соответствующее ее значение от непрерывного источника на величину  $\Delta D > 0$ . Иначе говоря, имеют место такие зависимости:

$$D_M(\underline{x}, t) = D_H(\underline{x}, t) + \Delta D; \quad \Delta D = (M/t_K) \cdot \int_0^{t_K} G(\underline{x}, \underline{x}', \lambda) (t_K - \lambda) d\lambda.$$

Последние соотношения *справедливы* для любых источников вредных выбросов, всех функций метеорологического разбавления, в том числе - для каждой из тех моделей их распространения, которые были рассмотрены нами в предыдущем параграфе.

Заметим, однако, что для прогноза разрушительного эффекта токсичных и радиоактивных веществ, недостаточно знания одних лишь доз  $D_H$  и  $D_M$ , имеющих размерность  $[кг \cdot ч/м^3]$ . Для перехода к ингаляционной дозе токсичного вещества  $-DP_T$  или экспозиционной мощности дозы - радиоактивного  $-DP_R$ , и использования известных для них зависимостей "доза-эффект", в каждом конкретном случае необходимо перемножать дозу

$D$  на объем воздуха  $V$  [ $\text{м}^3/\text{ч}$ ], прошедшего через органы дыхания человека или иной биособи во время пребывания их в зоне заражения.

#### ***Раздел 4. Моделирование и системный синтез управления производственно-экологической безопасностью***

#### ***Лекция 9. Общие принципы программно-целевого планирования и управления процессом совершенствования безопасности.***

Выбор приемлемых для системной инженерии безопасности специальных методов осуществляется с учетом специфики ее объекта и предмета. Специфичность рассматриваемого здесь объекта определяется объективной сложностью системы «ч-м-с», обусловленной наличием в ее составе самих по себе сложных и взаимосвязанных компонентов. Такие компоненты как человек и машина могут вести себя самым неожиданным образом вследствие случайных воздействий внешней среды, нестабильностью собственных параметров. Например, посмотрим, как внешние условия влияют на работу человекомашинной системы: высокая информационная насыщенность труда человека-оператора снижает вероятность своевременного обнаружения им возможных отклонений параметров. Незначительная эмоциональная напряженность более благотворно влияет на трудовую деятельность в сравнении с полным отсутствием таковой или постоянным пребыванием в стрессовых ситуациях. Далее, повышение мотивации и добросовестное отношение к работе способствуют росту безошибочности людей, однако излишняя ответственность приводит их к ненормальной возбужденности и возможным срывам. Приобретение навыков повышает надежность выполнения технологических операций, но слишком богатый практический опыт часто приводит человека к излишней самонадеянности. Все это в совокупности и указывает на объективную сложность рассматриваемого здесь объекта и предмета исследования.

Поэтому, в качестве основного метода исследования безопасности нами выбрана системная инженерия, а в качестве основного аппарата - моделирование. Их использование является наилучшим способом практической реализации таких требований, как объективность и всесторонность рассмотрения интересующих нас явлений и объектов. Неслучайно системную инженерию называют "прикладной диалектикой", а моделирование - "инструментарием современного исследователя". Основными этапами их итеративного применения являются эмпирический системный анализ, проблемно-ориентированное описание, теоретический системный анализ (*так называемая гибкая системная методология*).

В качестве основного метода обеспечения безопасности вновь создаваемых объектов и совершенствования - уже существующих нами выбрано программно-целевое планирование и управление такими процессами, а в виде аппарата - математическая теория организаций. Это обусловлено большой продолжительностью производственных процессов, многообразием факторов, определяющих их безопасность, и

необходимостью привлечения для ее достижения специальных сил и средств. Вот почему, для обеспечения и совершенствования безопасности требуется не проведение разового мероприятия, а длительная, планомерная и целенаправленная работа.

Иначе говоря, необходимо *управление* процессами обеспечения и совершенствования безопасности, под которым подразумевается совокупность взаимосвязанных мероприятий, осуществляемых в целях установления, обеспечения, контроля и поддержания требуемых (оптимальных по выбранным критериям) показателей безопасности. При этом эффективное управление безопасностью достигается: а) *стратегическим планированием* (обоснованием требований к ее уровню и разработкой целевых программ их обеспечения) и б) *оперативным управлением* выполнением таких программ (своевременным контролем и поддержанием заданного уровня безопасности).

Перечисленные задачи должны решаться в течение всего жизненного цикла производственных и транспортных объектов, начиная от их проектирования и кончая утилизацией выработавшего ресурс технологического оборудования.

### ***Цели и задачи системы обеспечения безопасности***

Уяснение природы аварийности и травматизма свидетельствует о необходимости создания *системы* обеспечения безопасности, под которой условимся понимать совокупность взаимосвязанных нормативных актов, организационно-технических и иных мероприятий, а также соответствующих им сил и средств, предназначенных для снижения ущерба от техногенно-производственных и природно-экологических опасностей.

Как следует из данного определения, в *составе* данной системы можно выделить, по меньшей мере, таких три компонента:

а) нормативные акты (руководящие документы), регламентирующие требования по обоснованию, обеспечению, контролю и поддержанию приемлемого уровня безопасности;

б) организационно-технические, природоохранные и другие мероприятия, выполняемые при подготовке, проведении и окончании работ с целью снижения ущерба от происшествий (аварийных выбросов вещества и энергии) и ограничения непрерывного рассеяния двух последних;

в) ресурсы (т.е. силы и средства), необходимые для практического осуществления таких мероприятий и выполнения других требований безопасности.

При уточнении предназначения (или цели) данной системы, следует учитывать и реальные практические возможности человека, т.е. «безопасность» не следует интерпретировать в общепринятом смысле, предполагающем отсутствие опасностей, т.е. невозможность причинения какого-либо ущерба. Поэтому принятие в качестве цели данной системы этого реально недостижимого условия нельзя считать применимым.

В качестве *цели* целесообразно принять либо а) максимально возможное сокращение (минимизацию) ущерба от аварийности и

травматизма в техносфере, либо б) удержание величины такого ущерба на самом низком уровне, определяемом доступными для безопасности средствами.

Обратим внимание на три наиболее существенных момента в каждой из только что предложенных формулировок цели:

1. предполагается не абсолютный, а относительный уровень безопасности, учтенный в сделанном ранее ее определении вероятностью происшествий и приемлемым ущербом от перманентных выбросов энергии или вредного вещества;
2. цель системы обеспечения безопасности рассматривается не как главная задача, а как подчиненная обеспечению жизнедеятельности людей, т.е. безопасность техносферы – не самоцель, а средство выживания;
3. наконец, обе формулировки цели являются как бы условными, поскольку учитывают необходимость соблюдения технологии процессов и ограниченность ресурсов на обеспечение безопасности их проведения.

Указанные цели позволили сформулировать *главные задачи* данной системы. К ним мы отнесли: а) предупреждение гибели, других несчастных случаев и профзаболеваний людей; б) исключение аварий на производстве и транспорте; в) минимизация их вредных выбросов в окружающую людей рабочую и природную среду; г) заблаговременная подготовка к проведению возможных аварийно-спасательных работ; д) эффективное использование сил и средств, выделенных для предупреждения и ликвидации последствий техногенных происшествий.

#### ***Показатели качества системы обеспечения безопасности***

При обосновании показателей качества рассматриваемой здесь системы, мы исходили из следующих основных *требований*:

а) показатели качества должны быть связаны с показателями эффективности и экономичности производственных процессов; *это требование исходит из того, что аварийность снижает рентабельность производственных процессов, поэтому показатели качества должны показывать насколько уровень безопасности сказывается на результативности таких процессов;*

б) параметры должны характеризовать качество соответствующих человеко-машинных систем и интенсивность использования их отдельных компонентов, *поскольку безопасность достигается требуемым качеством системы и взаимной совместимостью их компонентов.*

в) универсальность, наглядность и чувствительность к изменениям своих параметров на различных этапах жизненного цикла.

Оказалось, что лучше всего предъявленным требованиям удовлетворяют вероятностно-возможностные показатели. Именно эта группа показателей - интегральная характеристика качества систем, где явления и процессы носят стохастический характер. Так, вероятность возникновения происшествий при выполнении конкретных работ, ожидаемый от них средний ущерб и предполагаемые средние затраты на обеспечение безопасности могут наглядно указывать не только на возможность появления

таких событий, но и на связанные с ними издержки.

Поэтому, в качестве *базового показателя* системы обеспечения безопасности использовалась вероятность  $P_{\delta}(\tau)$  проведения конкретного технологического процесса без происшествий в течение времени  $\tau$  и в условиях, установленных нормативно-технической документацией. Физический смысл этого показателя – объективная мера невозможности появления происшествий при таких обстоятельствах.

Другими *показателями* качества системы обеспечения безопасности могут служить следующие, связанные с - базовым:

$Q(\tau) = 1 - P_{\delta}(\tau)$  - вероятность возникновения хотя бы одного (любого) происшествия (катастрофы, аварии, несчастного случая) в подобных обстоятельствах;

$M_{\tau}[Z]$  - математическое ожидание величины задержек ( $Z$ ) времени выполнения конкретного процесса вследствие необходимости работ по ликвидации последствий возможных происшествий (*ожидаемые средние задержки*);

$M_{\tau}[Y]$  - математическое ожидание величины (риск) социально-экономического ущерба ( $Y$ ) от происшествий и непрерывных вредных выбросов в течение времени  $\tau$ ,

$M_{\tau}[S]$  - математическое ожидание величины стоимостных и/или временных затрат (*экономических расходов*) ( $S$ ) на обеспечение безопасности выполнения конкретного процесса в это же время.

Анализ приведенных показателей подтвердил возможность применения вероятности  $P_{\delta}(\tau)$ , риска ущерба (*показатель тяжести последствий*)  $M_{\tau}[Y]$ , средних задержек  $M_{\tau}[Z]$  и затрат  $M_{\tau}[S]$  для оценки качества системы обеспечения безопасности и результативности производственных и транспортных процессов в целом. Вероятность  $P_{\delta}(\tau)$  и задержки  $M_{\tau}[Z]$  могут быть учтены при оценивании эффективности производственных процессов, направленных, например, на снабжение электроэнергией или сырьем, решение транспортных проблем.  $M_{\tau}[Y]$  показатель тяжести последствий должен учитываться при калькуляции издержек, связанных с проведением отдельных техносферных процессов. Все перечисленные показатели следует рассматривать как компоненты вектора  $E(t)$ , т.е. выходной характеристики объекта исследования.

### ***Моделирование и системный анализ процесса обоснования требований к уровню безопасности***

*Нормирование* в настоящее время понимается как вынужденное соотношение между возможностью возникновения происшествий в техносфере и реально доступными в это время технико-экономическими возможностями их предупреждения и снижения тяжести последствий.

Другими словами, приемлемый уровень безопасности определяется теми издержками, которые готово нести общество за обладание ею, т.е. соотношения между затратами на обеспечение безопасности и ценой ущерба от предполагаемых техногенных происшествий.

Возникает вопрос – как выработать этот приемлемый уровень риска?  
Есть три известных ныне способа –

1. установление приемлемых показателей аварийности и травматизма на производстве и транспорте путем приравнивания их величины к частоте возникновения стихийных бедствий или бытовых несчастных случаев;
2. выбор величины показателей безопасности в соответствии с теми их значениями, которые достигнуты в наиболее благополучных отраслях техносферы;
3. обоснование оптимальных по выбранным критериям количественных показателей безопасности.

Охарактеризуем возможности применения каждого из указанных подходов.

По первому способу необходимо использовать статистические данные о частоте возникновения несчастных случаев с людьми как на производстве так и вне его.

Допустимые значения частоты или вероятности возникновения происшествий при проведении конкретных процессов могут устанавливаться пропорционально данным таблицы. Например, в ядерной энергетике Франции допустимая вероятность появления происшествия с неприемлемыми последствиями не может превышать одной миллионной для всех ее ядерных реакторов (что соизмеримо с частотой естественных стихийных бедствий), тогда как возникновение расчетной аварии за год эксплуатации одного реактора должно быть менее вероятно в десять раз.

При использовании второго подхода учитывается накопленный опыт ведущих отраслей промышленности, а достигнутые в них результаты могут служить нормой для остальных. Например, нормами МАГАТЭ учтены реальные возможности современной ядерной энергетики, что проявилось в назначении таких максимально возможных значений вероятности тяжелой аварии на тех же АЭС:  $10^{-4}$  за год работы одного ныне существующего реактора и  $10^{-5}$  – для уже строящегося или еще проектируемого.

Известна также попытка применения данного подхода в Великобритании, когда в качестве эталонной частоты смертельных несчастных случаев была предложена так называемая социально приемлемая цена риска, оцениваемая для корпорации «Империал кемикал индастриз» гибелью двух работников за 10 млн человекочасов выполнения производственных процессов или величиной ущерба в 200 тыс фунтов стерлингов. Это предложение встретило сопротивление остальных отраслей промышленности, которые сочли невозможным (по экономическим соображениям) законодательно введение столь высоких требований к безопасности.

Рассмотренные два подхода - это сугубо эмпирический подход, нелишенный недостатков. Использование для нормирования безопасности одного лишь опыта и общественного мнения, которые могут даже интерпретироваться по-разному, не гарантирует успеха.

Третий подход - обоснование оптимальных значений количественных



показателей безопасности. При этом в качестве критерия оптимизации выберем суммарные экономические издержки, связанные как с предупреждением возможных происшествий, так и с ликвидацией последствий их появления.

Очевидно также, что повышение рентабельности отдельных производственных предприятий и обеспечение безопасности их персонала будут всегда проявляться как единство и борьба противоположностей. Представляется, что общество интуитивно учитывает это при регулировании на практике уровня безопасности отдельных производств и технологий, в том числе и оптимизируя его по критерию минимума суммарных социально-экономических издержек, обусловленных объективно существующими там опасностями.

Однако имеются и не совсем удачные попытки «интуитивной оптимизации», например, уровня безопасности эксплуатации ядерного реактора. Трагедия Чернобыля – следствие такой крайне неудачной «экономии» на средствах обеспечения безопасности наших АЭС в процессе их функционирования в штатных и экстремальных ситуациях. Это проявилось, в частности, в игнорировании следующих рекомендаций МАГАТЭ, предусмотренных не только для защиты ядерных реакторов от разного рода опасных внешних воздействий, но и для снижения последствий возникновения там «расчетных аварий»:

А) закрытие реакторов монолитными железобетонными колпаками обтекаемой формы – для защиты от падающих летательных аппаратов и ограничения (фильтрации) массовых вредных выбросов из его разгерметизированного корпуса;

Б) заблаговременное обустройство саркофага под реактором и оснащение его фундамента детонирующим удлинненным зарядом – для вынужденного оперативного захоронения реактора в случае тяжелой аварии.

Подобное отношение часто наблюдается и при эксплуатации энергоустановок и есть много других примеров.

Теперь рассмотрим социально-экономические издержки, обусловленные объективно существующими в техносфере опасностями, т.е. из чего складывается ущерб и затраты на его снижение.

Затраты на предупреждение техногенных происшествий совместно с возможным от них ущербом составляют заметную долю от совокупных производственных расходов. Они оцениваются более чем в 3% от проектной стоимости производственного оборудования и до 10% от расходов на его эксплуатацию, а в фармакологии, например, эти издержки уже составляют 30-50%.

Что касается непосредственно ущерба от техногенных происшествий, то его причинение является следствием воздействия соответствующих потоков на не защищенные от них людские, материальные и природные ресурсы. Такое непосредственное и разрушительное воздействие приводит к появлению как *прямого*, так и *косвенного* ущерба, т.е. ухудшает свойства не только соответствующей человеко-машинной системы, но и

взаимодействующего с ней окружения.

Ранее мы рассматривали предварительную оценку ущерба людским, материальным и природным ресурсам. В качестве исходных данных, необходимых для определения плотности оказавшихся там ресурсов, следует учитывать число находящихся в этих зонах людей, количество их недвижимого и движимого имущества, а также абиотических и биотических природных ресурсов. (К последнему их виду относят наземную и водную фауну и флору).

Определение ущерба всегда сложная задача, особенно когда это касается оценки ущерба здоровью людей и природной среде, когда учитывается большое число нечетко определенных факторов.

По причине трудности заблаговременного и точного прогноза ущерба в качестве нормируемого показателя безопасности используется вероятность появления техногенного происшествия, а не величина возможного ущерба.

На поддержание безопасности, т.е. свойства соответствующей человеко-машинной системы необходимы затраты, которые зависят от энергоемкости технологических процессов, спектра и объема потребляемых в них токсических и агрессивных в-в.

Для более точного определения того, из чего складываются затраты на обеспечение безопасности проводят их *декомпозицию* по каким-либо признакам.

Используем для этого понятие «безопасность» как свойство соответствующей человеко-машинной системы, разобьем систему на отдельные компоненты и определим затраты для поддержания безопасности каждого компонента, а значит и поддержания всей системы в безопасном состоянии.

В качестве примера рассмотрим структуру затрат на обеспечение безопасности дорожного движения, т.е. на предупреждение автотранспортных происшествий и снижение ущерба от них в случае появления. Мы видим многоаспектность затрат на обеспечение безопасности техносферы, а также возможность их структурирования как по отдельным направлениям, так и внутри них. Так, например, в рассмотренной схеме в каждом блоке есть затраты идущие непосредственно на предупреждение и снижение тяжести дорожно-транспортных происшествий, за счет поддержания:

А) обученности человека – приобретение и поддержание у водителей и пешеходов соответствующих знаний и навыков;

Б) надежности и эргономичности машины – оснащение автомобилей безотказными органами управления и устройствами сигнализации

В) комфортности рабочей среды – обустройство дорог средствами разделения и регулирования потоков автотранспорта и пешеходов

Г) безопасности технологии – организация дорожного движения и оказание своевременной помощи пострадавшим в транспортных происшествиях.

Исчисление затрат на предупреждение происшествий:

в качестве единицы измерения подобных затрат используется

*социальное время*, которое утеряно или затрачено обществом на парирование объективно существующих там опасностей. С этой целью целесообразно использовать *человеко-дни*.

Социально-экономический ущерб, вызванный временной потерей трудоспособности персонала из-за н/с случаев и проф.заболеваний, может оцениваться числом человеко-дней, необходимых для лечения и реабилитации пострадавших. Если следовать рекомендациям Международной организации труда, то ущерб от гибели одного «среднестатистического» человека следует считать равным 6000-7500 потерянных обществом человеко-дней, тогда как ущерб от увечий людей рассчитывается.

Единица измерения в человеко-днях давно используется в расчетах экономической эффективности производственной деятельности людей и имеет эквивалентное денежное выражение. Так, в начале 80-х годов стоимость человеко-дня составляла примерно 30 р., что было рассчитано исходя из вклада одного работника в национальный доход страны и тогдашней продолжительности жизни.