

Министерство образования и науки РФ
Иркутский национальный исследовательский технический университет

Хамидуллина Е.А., Тимофеева С.С.

Моделирование опасных процессов в техносфере
(Управление рисками. Системный анализ и моделирование)
Методические указания к практическим работам

для студентов, обучающихся
по направлению 20.04.01 «Техносферная безопасность»,
программа «Народосбережение. Управление профессиональными,
аварийными и экологическими рисками»
квалификации «магистр»

Издательство
Иркутского государственного технического университета
2015

УДК 543.0 : 389.

ББК 24.4

Хамидуллина Е.А. Тимофеева С.С. Моделирование опасных процессов в техносфере: практические работы и методические указания по их выполнению / . – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. – 137с.

Практические работы и методические указания к их выполнению соответствуют требованиям ФГОС для магистрантов по направлению 20.04.01 «Техносферная безопасность», программа «Народосбережение. Управление профессиональными, экологическими и аварийными рисками»

Предлагаются практические и самостоятельные работы по моделированию опасных процессов в техносфере

Предназначено для студентов технических университетов, обучающимися по направлению магистратуры 20.04.01 «Техносферная безопасность», также слушателями курсов повышения квалификации и профессиональной переподготовки кадров, специалистов по охране труда промышленных предприятий и широкого круга заинтересованных читателей.

Рецензент:

доктор химических наук профессор кафедры промышленной экологии и БЖД ИрГТУ **С.А. Медведева**

© Хамидуллина Е.А., 2015

© Тимофеева С.С., 2015

© ИРНИТУ, 2015

Практическая работа № 1

Использование имитационного моделирования для оценки надежности технической системы

Цель работы: научиться оценивать надежность технической системы с помощью имитационных моделей.

Задание: оценить надежность простейшей системы с помощью метода статистического оценивания – метода Монте-Карло.

Теоретические положения

Построение имитационной модели системы с целью проведения расчетов характеристик надежности начинается с изучения структурной схемы системы и стратегии ее функционирования. На основании структурной схемы строится надежность схема системы, которая характеризует статическую составляющую системы. В качестве аппарата для представления схем системы используется аппарат теории графов. Элементы системы изображаются в виде вершин графа, связи между элементами - в виде дуг. После построения надежности схемы системы в виде графовой модели ее необходимо представить в виде функциональной зависимости (формализованное представление структуры системы). При построении имитационных моделей для формализованного представления надежности схемы системы рекомендуют использовать аппарат алгебры логики. Используя этот аппарат, вероятностные характеристики надежности системы, такие как вероятность отказа или вероятность безотказной работы, вычисляют через логические функции работоспособности.

Следующим этапом построения имитационной модели является отображение стратегии ее функционирования. На этом этапе осуществляется построение динамической составляющей модели системы. В качестве примера рассмотрим достаточно общую стратегию функционирования системы. Пусть в моменты времени $T_k, 2T_k, \dots, nT_k$ производятся контрольные мероприятия по проверке исправности элементов системы. Если в момент проведения контроля исправности элементов обнаруживается отказ, то начинаются восстановительные мероприятия. Могут быть ситуации, когда при проведении контрольных проверок отказ не обнаруживается, и элемент простаивает в состоянии отказа до следующего момента контроля. Функционирование системы продолжается до момента времени T_p , если система не отказала, или до момента отказа. В момент времени T_p начинается плановая профилактика, в момент отказа системы начинается аварийная профилактика. После проведения профилактического обслуживания система полностью обновляется, и процесс функционирования начинается заново.

Будем считать заданными периоды между проведением контрольных проверок T_k и период времени T_p , при достижении которого система подвергается восстановлению. Для организации процесса моделирования

необходимо также задать вероятность обнаружения отказа P_0 и исходные данные для моделирования отказов и восстановлений элементов, а именно, плотность распределения наработки до отказа для каждого элемента, входящего в состав системы, $-f_{oi}(\theta_i, t)$, где i - порядковый номер элемента; θ_i - вектор параметров закона распределения, плотность распределения времени восстановления для каждого элемента $-f_{bi}(w_i, t)$, w_i - вектор параметров закона распределения времени восстановления.

После задания всех исходных параметров переходим к организации процесса моделирования. Процесс функционирования элементов системы приведен на рис. На рисунке ступеньками обозначены периоды исправного функционирования элементов системы, линиями - периоды простоя элементов в неисправном состоянии до момента начала контроля и обнаружения неисправности, заштрихованной ступенькой обозначено время восстановления элемента после обнаружения отказа.

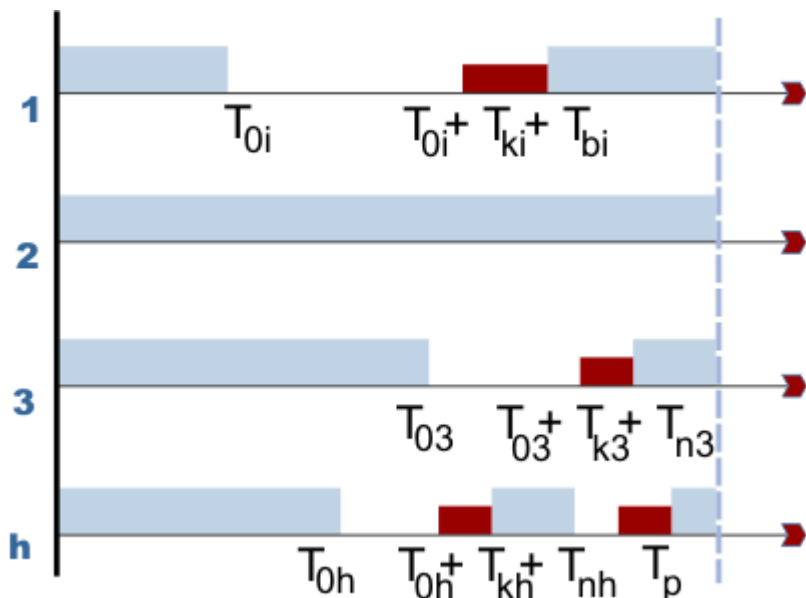


Рис. 1. Иллюстрация процесса функционирования элементов системы

Статистическое оценивание вероятности безотказной работы системы производится по следующей схеме. Для каждого элемента системы моделируется случайное время наработки до отказа T_{0i} . Моделирование осуществляется на основании заданной плотности распределения наработки до отказа $f_{oi}(\theta, t)$. Далее, на основании заданной вероятности обнаружения отказа моделируется событие, состоящее в обнаружении или необнаружении отказа. Если отказ обнаружен, то после ближайшего к наработке до отказа данного элемента момента контроля начинается восстановление элемента. Если выпало событие, состоящее в том, что в ближайший момент контроля отказ не обнаружен, то элемент находится в состоянии отказа до следующего момента контроля. В следующий момент контроля заново моделируется событие, состоящее в обнаружении или необнаружении отказа. Если отказ обнаружен, начинается восстановление элемента. Случайное время восстановления

элемента моделируется на основании заданной плотности распределения времени восстановления.

После того как смоделированы наработки до отказа и времена восстановления каждого элемента из всего набора наработок T_{0i} , выбирают такие, для которых выполняется соотношение $T_{0i} < T_p$. Здесь необходимо отметить, что изменение состояния системы может произойти только в моменты изменения состояния элементов. Следовательно, для обнаружения отказа системы необходимо просматривать только изменения состояний элементов. Поэтому для каждого T_{0i} , для которого выполняется соотношение $T_{0i} < T_p$, проверяем условие

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{0i} < T_{0l} < T_{0i} + T_{ki} + T_{bi} \\ T_{0l} < T_{0i} < T_{0l} + T_{kl} + T_{bl} \end{array} \right.$$

по всем $l = 1, h$ где h - количество элементов в системе. Проверка этого условия состоит в обнаружении элементов, находящихся в состоянии отказа в тот период, когда в состоянии отказа был i -й элемент. Введем идентификатор состояния элемента p_l . Определим его следующим образом: $p_l = 0$, если в данный период $[T_{0i}, T_{0i} + T_{ki} + T_{bi}]$ i -элемент находился в состоянии отказа и $= 1$, если элемент был работоспособен. Естественно, что в проверяемый момент $[T_{0i}, T_{0i} + T_{ki} + T_{bi}]$ i -й элемент находится в состоянии отказа и для него $p = 0$. Сформировав массив $\{p_l\}$, на основании логической функции работоспособности определяем, был ли в данном интервале времени отказ системы. Если был, $p = 0$, если отказа не было, $p = 1$. Если в рассматриваемый промежуток времени отказа системы не было, переходим к следующему интервалу времени. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет равна нулю величина p_c . Если на одном из проверяемых периодов величина приняла значение 0, это значение запоминается и начинается следующая итерация моделирования. Если ни на одном из рассматриваемых интервалов до момента T_p величина p_c не приняла значение 0, то отказа системы не было, и значение p_c в данном испытании равно 1. Проводя данную процедуру N раз, получаем N значений величины. Статистическую оценку вероятности безотказной работы системы находим по формуле

где — значение величины в i -м испытании.

Описанная модель является концептуальной. После ее составления переходят к программной реализации и исследованию модели на ЭВМ.

Пример имитационного моделирования – оценка надежности простейших систем методом Монте-Карло

Метод Монте-Карло называют методом статистических испытаний и широко используют для исследования различного рода сложных систем –

систем автоматического управления, экономических, биологических и т.д.

|

Сущность метода Монте-Карло состоит в следующем:

требуется найти значение a некоторой изучаемой величины. Для этого выбирают такую случайную величину X , математическое ожидание которой равно a : $M(X) = a$.

Для использования метода Монте-Карло необходимо уметь разыгрывать случайные числа, при этом используется генератор случайных чисел.

Рассмотрим задачу оценки надежности простейших систем методом Монте-Карло.

Пусть система состоит из 2-х блоков, соединенных последовательно. Система отказывает при отказе хотя бы одного блока. Первый блок содержит 2 элемента: А и В, соединенных параллельно и отказывает при одновременном отказе обоих элементов. Второй блок содержит один элемент С и отказывает при отказе этого элемента.

Найти

а) методом Монте-Карло оценку надежности P^* (ВБР) системы, зная ВБР элементов: $P(A) = 0.8$; $P(B) = 0.85$; $P(C) = 0.6$;

б) абсолютную погрешность $\square P - P^* \square$, где P – надежность системы, вычисленная аналитически. Произвести 30 испытаний.

Решение:

Выберем из таблицы случайных чисел три случайных числа: 0.10; 0.09 и 0.73; по правилу разыгрывания противоположных событий разыграем события А, В и С, состоящие в безотказной работе соответственно элементов А, В и С. Для записи результатов испытаний подготовим таблицу.

Поскольку $P(A) = 0.8$ и $0.10 < 0.8$, то событие А наступило, т.е. элемент А в этом испытании работает безотказно. Так как $P(B) = 0.85$ и $0.09 < 0.85$, то событие В наступило, т.е. элемент В работает безотказно. Таким образом, оба элемента первого блока работают; следовательно, работает и сам первый блок. В соответствующих клетках таблицы ставим знак плюс.

Так как $P(C) = 0.6$ и $0.73 > 0.6$, то событие С не наступило, т.е. элемент С получает отказ; другими словами, второй блок, а значит и вся система, получают отказ. В соответствующих клетках таблицы ставим знак минус. Аналогично разыгрываются и остальные испытания.

Произведя 50 испытаний, получим, что в 28 из них система работала безотказно. В качестве оценки искомой надежности P примем относительную величину $P^* = 28/50 = 0.56$.

Найдем надежность системы P аналитически. Вероятности безотказной работы первого и второго блоков соответственно равны:

$$P_1 = 1 - P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B}) = 1 - 0.2 \cdot 0.15 = 0.97$$

$$P_2 = P(C) = 0.6$$

Вероятность безотказной работы системы

$$P = P_1 \cdot P_2 = 0.97 \cdot 0.6 = 0.582$$

Искомая абсолютная погрешность $\square P - P^* \square = 0.582 - 0.56 = 0.022$

Таблица результатов испытаний

№ исп	Блок	Случайные числа, моделирующие элементы			Заключение о работе				
					элементов			блоков	системы
		А	В	С	А	В	С		
1	Первый второй	0.10	0.09	0.73	+	+	-	+	-
2	Первый второй	0.25	0.33	0.76	+	+	-	+	-
3	Первый второй	0.52	0.01	0.35	+	+	+	+	+
4	Первый второй	0.86	0.34	0.67	-	+	-	+	-
5	Первый второй	0.35	0.48	0.76	+	+	-	+	-

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими положениями и алгоритмом выполнения работы
2. Получить задание у преподавателя
3. Выполнить расчет, оформить отчет и сформулировать выводы, которые должны содержать полученные результаты, оценку адекватности результатов в сравнении с аналитическими методами расчета

Контрольные вопросы:

1. Опишите область применения имитационного моделирования.
2. Какие исходные данные требуются для построения имитационной модели?
3. В чем суть метода Монте-Карло, для каких целей он применим?
4. В чем отличие расчета вероятности при параллельном и последовательном соединении элементов?
5. Назовите ограничения метода Монте-Карло.
6. Сформулируйте преимущества метода Монте-Карло перед другими методами имитационного моделирования

Практическая работа №2

Использование теоремы Байеса при обеспечении адекватности модели и системы

Цель работы: научиться применять теорему Байеса для оценки качества работы системы при появлении дополнительной информации

Теоретические положения

При построении моделей систем важным вопросом является вопрос обеспечения адекватности модели и системы, для которой строится данная модель. От качества модели зависит достоверность результатов анализа, проводимого с помощью модели.

Одним из параметров, обеспечивающих качество модели, является точность задания показателей и характеристик составных частей модели, описывающих характер функционирования этих частей в процессе жизненного цикла системы и используемых в результате расчетов модели.

Выборки экспериментальных данных о функционировании анализируемых систем и их составных частей присутствуют в ограниченном объеме, следовательно, для получения оценок показателей объектов анализа с высокой степенью достоверности необходимо использовать дополнительную информацию – информацию о функционировании объектов-аналогов, различного рода субъективную информацию, учитывающую опыт и квалификацию персонала и т.д.

Учет дополнительной информации может быть осуществлен с помощью подхода, основанного на применении формулы Байеса.

Рассмотрим схему оценивания согласно которой предполагается, что у исследователя имеется априорная информация об исследуемых показателях объектов-аналогов.

Пусть на предприятии готовятся к проведению реконструкции. Для успешного проведения работ по реконструкции отдельных систем необходимо приобрести некоторое оборудование и поставить его вместо отработавшего свой ресурс. Реконструкция целесообразна, если показатели надежности вновь поставляемого оборудования будут выше этих показателей для устройств, которые хотят замерить.

Предприятию предлагают приобрести оборудование, причем завод-изготовитель утверждает, что показатели надежности находятся на высоком уровне. Например, утверждается вероятность безотказной работы (ВБР) изделия в течение требуемого времени не менее чем $P_{зи}$. Однако, из опыта работы аналогичных устройств на других объектах известно, что показатель ВБР меньше, чем утверждает завод-изготовитель и находится на уровне $P_{оп}$. Если надежность, такая как утверждает завод-изготовитель, то предприятию выгодно приобрести его и провести реконструкцию. Если надежность, такая

как сообщает предприятие, где эксплуатируется данное оборудование, то реконструкцию проводить нецелесообразно.

Пусть заказчик сомневается как в заявлении завода-изготовителя, так и в информации предприятия. Заказчик может сформулировать свою неуверенность следующим образом: «Вероятность того, что прав завод-изготовитель, равна p_1 , вероятность того, что верно заявление предприятия, равна $p_2 = 1 - p_1$ ». Перед тем как принять решение о покупке изделий, заказчик намерен провести их испытания. Пусть он провел испытания k изделий в течение времени T , в результате которых m изделий отказало.

Метод вычисления вероятностей, используемых при принятии решения, дает теорема Байеса:

Пусть событие A – отказало m из k устройств.

Примем гипотезы - $B1$ – прав завод-изготовитель;

$B2$ – верно заявление предприятия, эксплуатирующего данное оборудование.

Вероятность того, что прав завод-изготовитель, при условии, что при испытании m из k устройств отказало (событие A наступило), равна

$$P_A(B1) = \frac{P(B1) \cdot P_{B1}(A)}{P(A)}$$

$P(B1) = P_{zu} = p_1$ – первоначальное мнение заказчика, что информация завода-изготовителя верна;

$P_{B1}(A) = C_k^m (1 - P_{zu})^m P_{zu}^{k-m} = C_k^m p_2^m p_1^{k-m}$ - вероятность отказа при испытании m из k устройств, при условии, что прав завод-изготовитель;

$P(A)$ – полная вероятность события, что m из k устройств откажут, вычисляется следующим образом

$$P(A) = P(B1) \cdot P_{B1}(A) + P(B2) \cdot P_{B2}(A) = p_1 \cdot C_k^m \cdot p_1^m \cdot p_2^{k-m} + p_2 \cdot C_k^m \cdot p_2^m \cdot p_1^{k-m}$$

Рассмотрим числовой пример решения задачи о целесообразности покупки оборудования.

Пусть завод-изготовитель утверждает, что ВБР изделия равна 0.98. Предприятие, имеющее опыт эксплуатации указанных изделий, оценивает ВБР на уровне 0.9. Заказчик считает, что вероятность того, что завод-изготовитель верно оценил надежность оборудования, равна 0.4; вероятность того, что верно заявление предприятия, равна 0.6. Далее предприятие-заказчик производит испытания двух объектов в течение времени T и оба объекта за этот период времени отказывают.

Подсчитаем вероятность события, состоящего в том, что утверждение предприятия, эксплуатирующего аналогичные объекты, верно:

Событие A – 2 из 2 объектов отказали;

Гипотеза $B1$ – прав завод-изготовитель, $P(B1) = 0.4$;

Гипотеза $B2$ – верно заявление предприятия, $P(B2) = 0.6$;

$$P_A(B2) = \frac{P(B2) \cdot P_{B2}(A)}{P(A)}$$

Рассчитаем каждый из сомножителей:

$$P_{B_2}(A) = C_2^2(1 - 0.9)^2 \cdot 0.9^0 = 0.1^2 = 0.01$$

$$P_{B_1}(A) = C_2^2(1 - 0.98)^2 \cdot 0.98^0 = 0.02^2 = 0.0004$$

$$P_A(B_2) = \frac{0.6 \cdot 0.01}{0.6 \cdot 0.01 + 0.4 \cdot 0.0004} = \frac{0.006}{0.006016} = 0.97$$

Таким образом, вероятность того, что право предприятие, имеющее опыт эксплуатации соответствующего оборудования равно 0.97, следовательно, можно принять решение о нецелесообразности покупки оборудования.

Порядок выполнения работы

1. Познакомиться с теоретическими положениями
2. Получить задание у преподавателя
3. Выполнить расчеты и сформулировать выводы, которые должны содержать результаты расчетов и заключение об адекватности использованной модели

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте теорему Байеса
2. Какие требования предъявляются к исходным данным при необходимости использования теоремы Байеса?
3. Какого рода дополнительная информация позволяет повысить достоверность оценивания?
4. Каким образом оценивается качество работы системы с помощью теорем теории вероятности?

Практическая работа №3

Построение, качественный и количественный анализ дерева происшествий при заданных исходных данных

Цель работы: научиться выявлять закономерности возникновения и предупреждения конкретных происшествий путем построения и анализа дерева происшествий.

Теоретические положения

Широкое распространение в моделировании опасных процессов получили диаграммы причинно-следственных связей, имеющие ветвящуюся структуру и называемые “деревом происшествия” и “деревом событий” – исходов 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). Задачей данной работы является всестороннее изучение дерева происшествий.

Семантическая модель в форме дерева происшествия (рис. 2.1) 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.

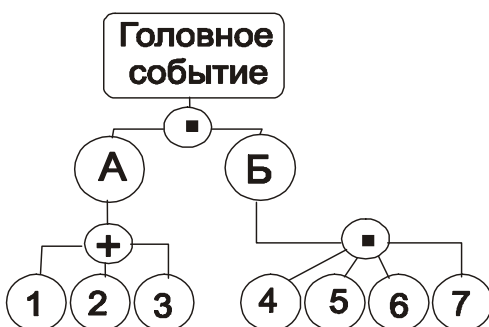


Рис. 2.1 Модель диаграммы типа “дерево происшествий”

Процесс появления конкретного происшествия интерпретируется данной моделью как прохождение некоторого сигнала от каких-либо исходных предпосылок, инициирующих причинную цепь (служащих истоками такого сигнала), к головному событию, являющемуся как бы его стоком. В качестве

промежуточных состояний рассматриваемого дерева применяются предпосылки верхнего и последующих уровней, а узлов-регуляторов потока - логические условия сложения -"или" и перемножения -"и", используемые в булевой алгебре.

При моделировании возможных происшествий с помощью диаграмм причинно-следственных связей типа “дерево происшествий”, обычно используется специальная символика. В ней исследуемые события изображаются в виде прямоугольника или окружности с надписями или цифровыми кодами, логические узлы – кругами с внутренними знаками: “+” (для логического условия “или”) и “•” (для условия “и”), а связи между ними – линиями, иногда со стрелками.

Построение дерева происшествий. Наиболее ответственным и сложным этапом прогнозирования техногенного риска является построение древовидных семантических моделей процессов возникновения происшествий. Это объясняется тем, что лишь адекватные реальности "деревья" позволят, при последующем их анализе, выявить все наиболее существенные предпосылки и количественно оценить возможность появления происшествий. Сложность данного этапа обусловлена отсутствием в настоящее время строгих формальных процедур его реализации, что иногда позволяет относить этот этап скорее к искусству, чем к науке. Дело в том, что обычно не удается обеспечить абсолютной идентичности моделей одного и того же происшествия, построенных различными исследователями, а без этого трудно ожидать требуемой воспроизводимости результатов, полученных с помощью таких моделей.

Существует способ формализации данной процедуры, базирующийся на следующем утверждении: любое происшествие является одновременно и результатом разрушительного неконтролируемого выброса накопленного где-либо энергозапаса (энергии) или вещества, и следствием цепи соответствующих предпосылок.

Рассматриваемая 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. 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.

Следует использовать обратную последовательность прогнозирования предпосылок и условий, в совокупности приводящих к появлению моделируемых происшествий. Иначе говоря, построение дерева происшествия следует начинать не снизу вверх (от исходных ошибок, отказов и опасных внешних воздействий - к головному событию), а наоборот. При этом само головное событие, соответствующие ему предпосылки верхнего и последующих уровней, а также вызвавшие каждую из них причинные цепи необходимо выявлять дедуктивно - на основе знания общих закономерностей

возникновения техногенных происшествий и особенностей их проявления в конкретных обстоятельствах.

При рассмотрении возможных причинно-следственных связей основными носителями опасности следует считать токсичные и взрывоопасные вещества, источники ионизирующих излучений, движущиеся предметы и сосуды, работающие под высоким давлением. В свою очередь старение, загрязнение, увлажнение, перегрев или переохлаждение элементов оборудования 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, произвольные или умышленно допущенные людьми при конструировании, изготовлении, монтаже, техническом обслуживании и ремонте техники. При прогнозировании подобных предпосылок (в том числе трудно предсказуемых несанкционированных действий человека), нужно помнить, что все они могут быть обусловлены: а) внутренними причинами - отсутствием должных психологических установок, знаний и навыков, б) внешними для человека факторами - несовершенством используемых им оборудования и технологии, высокой напряженностью труда или неблагоприятными условиями рабочей среды.

Качественный анализ дерева происшествий. Задача качественного анализа дерева происшествий состоит в установлении цепочек событий (предпосылок), реализация которых приводит к появлению либо к не появлению головного события, а также в количественной оценке вклада соответствующих событий-предпосылок.

Качественный анализ проводят с помощью "минимальных сочетаний предпосылок" - множества событий-предпосылок минимально необходимых и достаточных для достижения конкретного результата. Поскольку нас интересуют два результата: возникновение и предупреждение происшествий, будем иметь дело с двумя типами минимальных сочетаний - пропускным (аварийным) и отсечным (секущим).

Минимальное пропускное сочетание (МПС) включает в себя наименьшее число исходных предпосылок дерева происшествия, одновременное появление которых достаточно для возникновения головного события (прохождения сигнала до него).

Минимальное отсечное сочетание (МОС) формирует условия непоявления головного события, это наименьшее число исходных событий-предпосылок дерева происшествий, 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.

Значимость – это вклад отдельной предпосылки или аварийного сочетания предпосылок в появление головного события.

Критичность - это вклад конкретной предпосылки или аварийного сочетания предпосылок в условия непоявления головного события.

В настоящее время также используются количественные критерии оценки значимости и критичности, обычно характеризующие вероятность или ожидаемое число наступлений головного события на некотором интервале времени. Как правило, одни из них указывают на изменение этих параметров вследствие появления либо не появления конкретных исходных предпосылок и образуемых ими минимальных сочетаний. Другие – на ожидаемое среднее число происшествий, обусловленных такими событиями и их совокупностями за конкретный период.

Основной 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. Минимальные пропускные сочетания используются главным образом для выявления "слабых" мест. Минимальные отсечные сочетания служат для определения наиболее эффективных мер предупреждения аварии.

Количественный анализ дерева происшествий. Целью количественного анализа является расчет вероятности наступления головного события. Следует отметить, что знание вероятности головного события приобретает особую значимость, если нужно отдать предпочтение или принять обоснованное решение: а) о соответствии техногенного риска вновь созданного производственного или транспортного процесса тому его значению, которое предъявлено техническим заданием; б) о выборе (по наименьшей вероятности происшествий) одного из нескольких, подготовленных на конкурсной основе однотипных технических проектов.

Количественный анализ начинаем с построения структурной функции. **Структурная функция** моделирует головное событие с его промежуточными и исходными предпосылками с помощью булевой алгебры. Предпосылки, соединенные логическим знаком «или», объединяются знаком «+», соответственно, предпосылки, соединенные логическим знаком «и»,

объединяются знаком «·».

Вторым шагом количественного анализа является представление вероятности появления головного события через вероятности появления событий-предпосылок. Для этого:

а) аналитическая модель декомпозируется на отдельные блоки – сомножители и слагаемые функции;

б) в выбранных блоках выделяются подмножества событий, которые соединены между собой условиями «и», «или» и имеют известные вероятности появления;

в) проводится расчет вероятностей наступления вершинных для таких блоков событий;

г) структурная функция упрощается путем замены каждого подмножества одним членом, обладающим эквивалентной вероятностью;

д) подобным образом рассчитывается вероятность появления головного события.

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:

$$P_{/m=2} = P_1 + P_2 - P_1 P_2; P_{/m=3} = P_1 + P_2 + P_3 - P_1 P_2 - P_1 P_3 - P_2 P_3 + P_1 P_2 P_3$$

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 большей 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.

Количественная оценка вероятности головного события может быть проведена также с помощью минимальных сочетаний событий - путем

построения нового, эквивалентного исходному дерева, включающего в себя сочетания какого-либо одного типа. Однотипные сочетания соединяются в новом дереве всего одним логическим условием: "или" - для дерева, состоящего из одних МПС, и условием "и" - для дерева из МОС.

Например, если в анализируемом дереве происшествия число МПС равно a , в каждом i -ом из которых содержится m_i исходных событий-предпосылок, то можно построить новое дерево (см. рис. 2.3а), включающее в себя a исходных (промежуточных для прежнего дерева) предпосылок, объединенных логическим условием "или". При этом в каждом из этих новых событий исходные предпосылки прежнего дерева должны быть соединены условием "и".

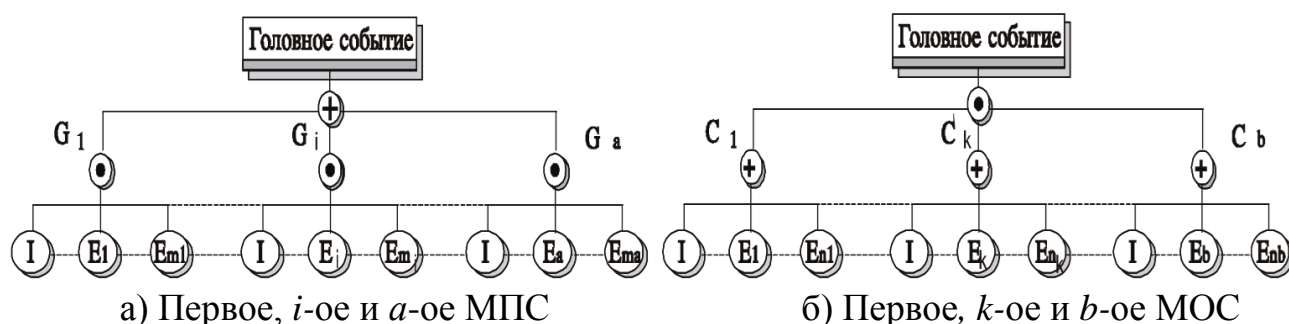


Рис. 2.3. Модификация дерева происшествий

Если же дерево происшествия содержит в себе b штук МОС с n_k исходными предпосылками в каждом из них, то в новом дереве (рис. 2.3б) исходные события следует объединять логическим условием "и", а каждую предпосылку этой упрощенной модели образовывать логическим сложением исходных событий дерева-оригинала. Отсюда следует, что для расчета вероятности возникновения происшествий - Q , могут быть использованы следующие выражения:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^a (1 - \prod_{j=1}^{m_i} P_{ij}) ;$$

$$Q = \prod_{k=1}^b [1 - \prod_{l=1}^{n_k} (1 - P_{kl})] ,$$

где a, b - количество соответственно минимальных пропускных и минимальных отсечных сочетаний дерева происшествия;

m_i, n_k - число исходных предпосылок в каждом его i -ом пропускном и k -ом отсечном минимальных сочетаниях исходных событий-предпосылок.

Пример. Построить дерево происшествия и провести его качественный и количественный анализ для происшествия при заправке топливом транспортного средства.

Процесс заправки топливом транспортного средства представлен на рис.

2.

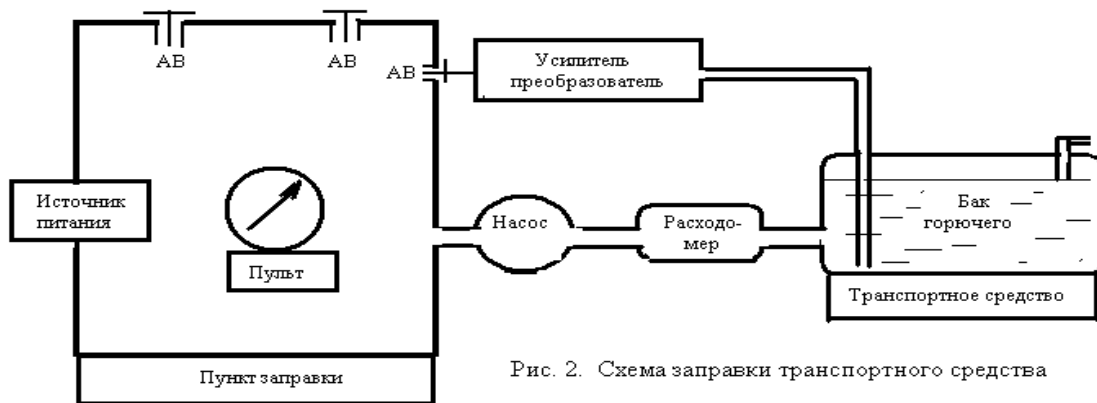


Рис. 2. Схема заправки транспортного средства

Процесс заправки контролируется одновременно автоматической системой дозирования и человеком-оператором. Подающий насос может быть отключен либо автоматически - по сигналу расходомера или датчика уровня, либо вручную - по команде оператора.

Вследствие ошибок оператора или отказов системы возможно переполнение топливных баков и разлива топлива вследствие несвоевременного отключения насоса.

Одна из возможных моделей процесса заправки приведена на рис.3.

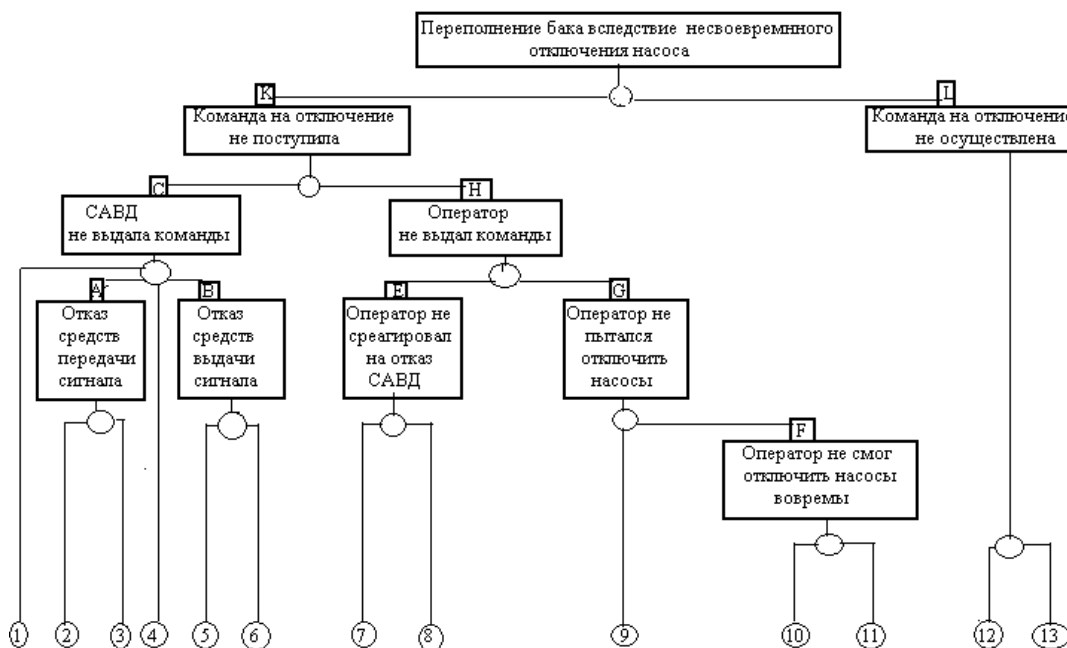


Рис. 3. Модель переполнения топливного бака

Модель имеет промежуточные события, отмеченные латинскими буквами, а в нижней части цифрами показаны постулируемые исходные события предпосылки (табл. 1).

Таблица 1.

Исходные данные модели

№	Наименование событий или состояний модели
1.	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась отключенной (ошибка контроля исходного положения)
2.	Обрыв цепей передачи сигнал от датчиков объема дозы
3.	Ослабление сигнала выдачи дозы помехами (нерасчетное внешнее
4.	воздействие)
5.	Отказ усилителя-преобразователя сигнала выдачи дозы
6.	Отказ расходомера (измерителя потока горючего)
7.	Отказ датчика уровня горючего в баке
8.	Оператор не заметил световой индикации о неисправности САВД (ошибка человека)
9.	Оператор не услышал звуковой сигнализации о неисправности (не исходном состоянии) САВД
10.	Оператор не знал о необходимости отключения насоса по истечении заданного времени
11.	Оператор не заметил индикации хронометра об истечении установленного времени заправки
12.	Отказ датчика времени заправки (хронометра) Отказ автоматического выключателя электропривода насоса
13.	Обрыв цепей управления приводом насоса подачи горючего

Качественный анализ приведенной на рис.3. модели позволяет выделить три ветви прохождения сигнала к головному событию: АВСК, EFGKH и L, а также указать связанные с ними минимальные *проходные* и *отсечные* сочетания исходных предпосылок. Очевидно, что переполнение топливного бака (достижение головного события) равносильно появлению любой из двух предпосылок верхнего уровня К или L, что в свою очередь эквивалентно произведению событий -предпосылок второго уровня С и Н или сумме исходных предпосылок 12 и 13 нижнего, т.е. постулируемого уровня.

Подобным способом исследуются условия достижения узлов С и Н. В результате можно выделить 27 минимальных пропускных сочетаний постулируемых исходных событий, из которых 20 штук - по два события: 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.11, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11; пять - по три: 5.6.7, 5.6.8, 5.6.9, 5.6.10, 5.6.11 и два - по одному событию: 12 и 13.

Предупреждение возникновения рассматриваемого происшествия может быть достигнуто нарушениями вышеуказанных условий, т.е. пресечением

возможности прохождения сигнала до головного события. Это делается исключением одновременно обеих предпосылок первого (верхнего) уровня К и L, что равносильно недопущению любой из предпосылок второго уровня С и Н и сразу двух постулируемых событий 12 и 13. Следовательно, если анализировать аналогичным путем условия пресечения сигнала от исходных предпосылок до событий С и Н, то легко установить три минимальных отсечных сечения, каждое из которых включает по семь событий: 1.2.3.4.5.12.13, 1.2.3.4.6.12.13, 7.8.9.10.11.12.13.

Проведенные результаты предварительного качественного анализа процесса возникновения конкретного происшествия позволяют *оценить условия* его появления и предупреждения. Наиболее критичными и значимыми (в указанном смысле) предпосылками являются не исходные отказы, которые связаны с невозможностью своевременного отключения насоса, а также не учитываемое моделью возможное разрушение стенок бака, а наименьшую - отказы таких элементов, как расходомер и датчик уровня.

Количественный анализ сводится к определению вероятности появления головного события и значимости и критичности конкретных предпосылок.

Очевидно, что мера значимости или критичности конкретной предпосылки обратно пропорциональна количеству смежных с ней других событий в минимальном проходном сечении и пропорциональна числу содержащих ее минимальных отсечных сочетаний.

Определим вероятности происшествий разных уровней.

$$P_A = 1 - (1 - P_2) (1 - P_3) = 1 - (1 - 0,001) (1 - 0,002) = 0,002998 ;$$

$$P_B = P_5 * P_6 = 0,002 * 0,001 = 0,000002;$$

$$P_E = 1 - (1 - P_7)(1 - P_8) = 1 - (1 - 0,001) (1 - 0,002) = 0,002998;$$

$$P_F = 1 - (1 - P_{10}) (1 - P_{11}) = 1 - (1 - 0,002) (1 - 0,001) = 0,002998;$$

$$P_G = 1 - (1 - P_9) (1 - P_F) = 1 - (1 - 0,03) (1 - 0,002998) = 0,0329;$$

$$P_H = 1 - (1 - P_E) (1 - P_G) = 1 - (1 - 0,002998) (1 - 0,0329) = 0,0358;$$

$$P_C = 1 - (1 - P_1) (1 - P_A) (1 - P_4) (1 - P_B) = 1 - (1 - 0,03) (1 - 0,002998) (1 - 0,001) (1 - 0,000002) = 0,0339;$$

$$P_K = P_C * P_H = 0,0339 * 0,0358 = 0,0012;$$

$$P_L = 1 - (1 - P_{12}) (1 - P_{13}) = 1 - (1 - 0,001) (1 - 0,001) = 0,002;$$

$$Q = 1 - (1 - P_K) (1 - P_L) = 1 - (1 - 0,0012) (1 - 0,002) = 0,0032 = 3,3 * 10^{-3}$$

Значение вероятности наступления головного события можно получить более простым способом - с помощью выявленных ранее минимальных отсечного и пропускного сочетаний формулируемых исходных событий предпосылок. Для этого следует использовать формулы (1.4) и (1.5), учитывая, что $a = 27$, $m_i = 2$ для $i = 1...20$; $m_i = 3$ для $i = 21...25$; $m_i = 1$ для $i = 26, 27$; $b = 3$, $n_k = 7$ для всех конечных значений k .

Используя формулу (4), получим

$$Q = 1 - [(1 - P_1 P_7) (1 - P_1 P_8) (1 - P_1 P_9) (1 - P_1 P_{10}) (1 - P_1 P_{11}) (1 - P_2 P_7) (1 - P_2 P_8) * (1 - P_2 P_9) (1 - P_2 P_{10}) (1 - P_2 P_{11}) (1 - P_3 P_7) (1 - P_3 P_8) (1 - P_3 P_9) (1 - P_3 P_{10}) (1 -$$

$$P_3P_{11})*(1 - P_4P_7) (1 - P_4P_8) (1 - P_4P_9) (1 - P_4P_{10}) (1 - P_4P_{11}) (1 - P_5P_6P_7) (1 - P_5P_6P_8) \\ *(1 - P_5P_6P_9) (1 - P_5P_6P_{10}) (1 - P_5P_6P_{11}) (1 - P_{12}) (1 - P_{13})] = 1 - [(1 - 0,030*0,002) (1 - \\ 0,030*0,001) (1 - 0,030*0,030) (1 - 0,030*0,002)*(1 - 0,030*0,001) (1 - 0,0001*0,002) \\ (1 - 0,001*0,001) (1 - 0,001*0,030) (1 - 0,0001*0,002) (1 - 0,001*0,001) (1 - \\ 0,002*0,002) (1 - 0,002*0,001) (1 - 0,002*0,030)* \\ *(1 - 0,002*0,002) (1 - 0,002*0,001) (1 - 0,001*0,002) (1 - 0,001*0,001) (1 - \\ 0,001*0,030) (1 - 0,001*0,002) (1 - 0,001*0,001) (1 - 0,002*0,001*0,002) (1 - \\ 0,002*0,001*0,001) (1 - 0,002*0,001*0,030) (1 - 0,002*0,001*0,002) (1 - \\ 0,002*0,001*0,001)(1 - 0,001)(1-0,001)] = 0,003 = 3*10^{-3}.$$

Величину вероятности появления головного события можно определить, используя формулу (5)

$$Q = [1-(1-P_1) (1-P_2) (1-P_3) (1-P_4) (1-P_5) (1-P_{12}) (1-P_{13})]*[1-(1-P_1) (1-P_2) (1-P_3) \\ (1-P_4) (1-P_6) (1-P_{12}) (1-P_{13})]*[(1-P_7) (1-P_8) (1-P_9) (1-P_{10}) (1-P_{11}) (1-P_{12}) (1-P_{13})] = \\ = [1-(1-0,030)(1-0,001) (1-0,002) (1-0,001) (1-0,002) (1-0,001) (1-0,001)] * [1- \\ (1-0,030)(1-0,001) (1-0,002) (1-0,001) (1-0,001) (1-0,001) (1-0,001)]* [1-(1- \\ 0,002)(1-0,001) (1-0,030) (1-0,002) (1-0,001) (1-0,001) (1-0,001)]= 0,047 = 5,4*10^{-5}$$

Для небольшого числа маловероятных исходных событий-предпосылок ($P_i < 0,01$ и $i = 1 \dots m < 10$) можно использовать приближенную формулу

$$Q = (P_1+P_2+P_3+P_4) (P_7+P_8+P_9+P_{10}+P_{11}) + P_{12} + P_{13}= \\ (0,030+0,001+0,002+0,001)*(0,002+0,001+0,030+0,002+0,002) +0,001+0,001 = \\ 0,0033= 3,3*10^{-3}$$

Как следует из результатов расчетов по всем формулам получаются достаточно близкие значения вероятности наступления головного события (переполнения бака).

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными понятиями и определениями метода моделирования с использованием «дерево происшествий».
2. Для «дерева происшествий», представленного на рис. 3. определить типы логических узлов
3. Используя формулы (1) и (2) определить вероятности происшествий разного уровня ($P_A, P_B, P_C, P_E, P_F, P_G, P_H, P_K, P_L$).
4. Используя формулы (1) – (4) определить вероятность головного события Q.
5. Оценить значимость и критичность предпосылок, используя формулу (5).

Вероятности исходных предпосылок приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Варианты заданий исходных предпосылок

№	Вероятности исходных предпосылок												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,030	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,030	0,002	0,001	0,001	0,001

2	0,002	0,006	0,001	0,010	0,003	0,001	0,002	0,002	0,011	0,001	0,002	0,014	0,013
3	0,022	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,010	0,012	0,020	0,003	0,001	0,020
4	0,020	0,004	0,001	0,003	0,008	0,001	0,010	0,008	0,008	0,009	0,004	0,002	0,012
5	0,011	0,006	0,002	0,008	0,007	0,001	0,005	0,011	0,007	0,012	0,005	0,003	0,005
6	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003	0,006	0,006	0,005	0,020	0,006	0,004	0,006
7	0,003	0,006	0,002	0,008	0,005	0,003	0,020	0,001	0,020	0,007	0,007	0,015	0,007
8	0,005	0,005	0,002	0,004	0,010	0,002	0,003	0,002	0,009	0,016	0,008	0,006	0,011
9	0,012	0,005	0,002	0,001	0,001	0,013	0,004	0,013	0,008	0,021	0,009	0,007	0,012
10	0,013	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,006	0,014	0,007	0,009	0,001	0,012	0,009
11	0,014	0,005	0,001	0,002	0,002	0,005	0,011	0,005	0,011	0,014	0,002	0,004	0,005
12	0,015	0,001	0,003	0,001	0,001	0,004	0,003	0,006	0,015	0,028	0,003	0,006	0,014
13	0,016	0,004	0,001	0,001	0,001	0,007	0,008	0,007	0,008	0,005	0,004	0,012	0,013
14	0,017	0,002	0,002	0,002	0,008	0,002	0,003	0,008	0,003	0,012	0,005	0,009	0,009

Практическая работа № 4

Моделирование масштабов заражения токсическими веществами при авариях на химически опасных объектах и транспорте с помощью компьютерной программы «Токси+»

Цель работы: познакомиться с методикой оценки последствий аварий при выбросе в атмосферу опасных химических веществ и научиться моделировать и анализировать процессы распространения опасных веществ в приземном слое.

Теоретические положения

Методика «ТОКСИ» предназначена для количественной оценки последствий химических аварий на промышленном объекте с выбросом ОХВ в атмосферу.

Методика позволяет определить количество поступивших в атмосферу опасных веществ при различных сценариях аварии; пространственно-временное поле концентраций опасных веществ в атмосфере; размеры зон химического заражения, соответствующие различной степени поражения людей, в том числе с учетом накопления токсидозы; размеры зон дрейфа взрывопожароопасных облаков, в пределах которых сохраняется способность к воспламенению и размеры зон распространения пламени или детонации.

Методика используется при разработке декларации промышленной безопасности опасных производственных объектов; при разработке мероприятий по защите населения и персонала; при разработке планов локализации и ликвидации последствий аварий, связанных с выбросом опасных веществ; при проектировании объектов, на которых производятся, используются, транспортируются или хранятся опасные химические вещества (ОХВ).

При разработке методики приняты следующие допущения:

- газообразное ОХВ считается идеальным газом, свойства которого не зависят от температуры;
- жидкое ОХВ считается несжимаемой жидкостью, свойства которой не зависят от температуры;
- истечение ОХВ и его испарение происходят с постоянной скоростью;
- в образовавшемся сразу после выброса облаке находится только ОХВ без подмешанного воздуха;
- разлив жидкой фазы происходит по твердой, не впитывающей поверхности с высотой разлившегося слоя 0,05 м;
- при расчете рассеяния ОХВ в атмосфере используется гауссова модель диффузии пассивной примеси, осаждение ОХВ на подстилающую поверхность и его химические превращения не учитываются;
- метеоусловия остаются неизменными в течение времени экспозиции, а характеристики атмосферы - постоянны по высоте.

В зависимости от агрегатного состояния ОХВ в оборудовании и характера разрушения оборудования методика позволяет провести расчеты для следующих сценариев аварии:

Сценарий 1. Разрушение оборудования с выбросом всего объема ОВ, образование первичного облака, рассеяние первичного облака и воздействие на окружающую среду;

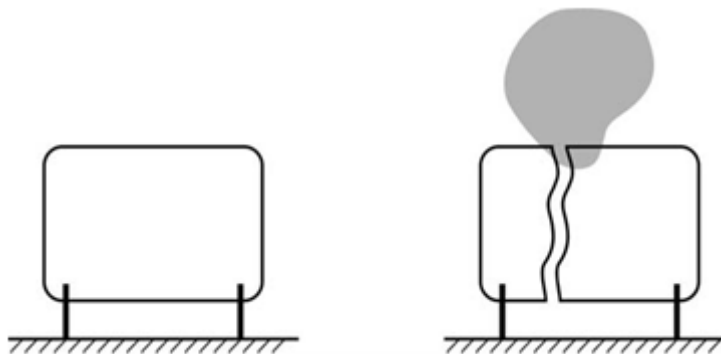


Рис. 1. Мгновенное разрушение емкости с газом

Сценарий 2. Разрушение оборудования и истечение газа из разрушенного оборудования при отсутствии пролива жидкой фазы; рассеяние облака и воздействие на окружающую среду.

При истечении газа из разрушенного трубопровода возможно отсечение (либо в результате использования запирающей арматуры, либо в результате остановки компрессоров, подающих ОВ в трубопровод, либо в результате и того и другого) аварийного участка трубопровода и истечение ОВ из него. При этом также образуется облако, которое рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

Возможно прекращение выброса путем ликвидации отверстия разгерметизации.

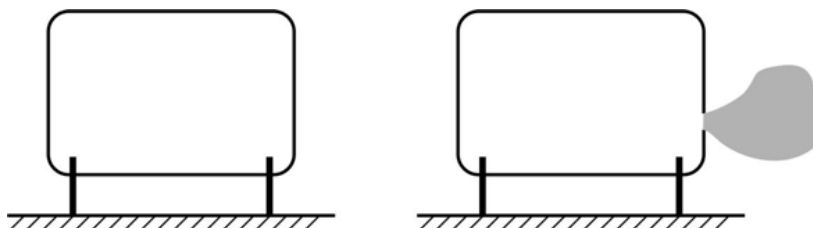


Рис. 2. Разгерметизация емкости с газом

Сценарий 3. Разрушение оборудования с жидким ОВ, выброс ОВ в окружающую среду, при наличии перегрева у жидкой фазы возможно ее вскипание с образованием в атмосфере газочапельного облака. Часть жидкой фазы может пролиться на подстилающую поверхность — либо в обвалование, либо на неограниченную площадь. Если температура кипения жидкости при этом меньше температуры поверхности, то произойдет вскипание жидкости

при ее соприкосновении с подстилающей поверхностью. Из газовой фазы, содержащейся в оборудовании, из образовавшейся при вскипании за счет перегрева жидкой фазы газокапельной фазы и из газа, образующегося при кипении пролива, образуется первичное облако, которое рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

Из пролива происходит испарение ОВ, в результате чего образуется вторичное облако, которое также рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

Возможно прекращение поступления ОВ в окружающую среду путем ликвидации пролива.

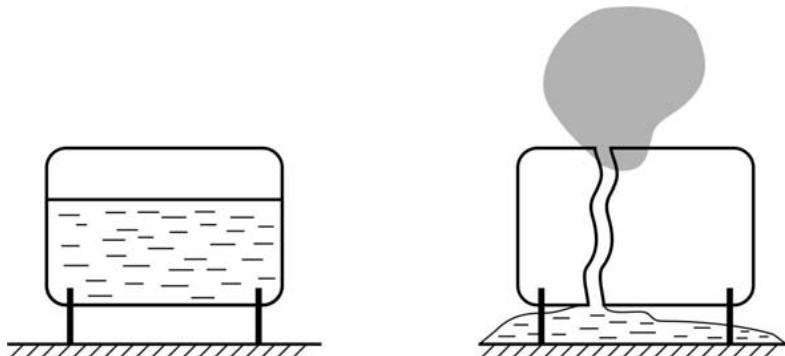


Рис. 3. Мгновенное разрушение емкости с жидкой фазой

Сценарий 4. Нарушение герметичности (частичное разрушение) оборудования, содержащего ОХВ в жидком состоянии.

Сценарии 1 и 3 применимы только к емкостному оборудованию, сценарии 2 и 4 – как к емкостному оборудованию, так и к трубопроводам.

Исходными данными для расчета являются:

- физико-химические и токсикологические характеристики ОХВ;
- количество и технологические параметры ОХВ;
- параметры оборудования, в котором обращается ОХВ;
- вероятный сценарий выброса ОХВ в атмосферу;
- топографические характеристики территории вблизи аварийного объекта;
- метеоусловия на момент аварии;
- время экспозиции.

Определение количественных характеристик выброса

Сценарий 1.

Масса ОХВ, образующая **первичное** облако Q_i , кг для всех сценариев (i – номер сценария) равна

$$Q_i = \begin{cases} Q, & \text{если известна масса ОХВ в оборудовании;} \\ (\mu/R) (V_1 P_1 / T_1), & \text{если известны объем оборудования } V_1, \text{ м}^3, \\ & \text{давление } P_1, \text{ Па и температура } T_1, \text{ К в} \\ & \text{оборудовании и молекулярная масса ОХВ } \mu, \\ & \text{кг/моль} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь R - универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(град/моль).

Плотность ОХВ в первичном облаке $\rho_1^{\text{выб}}$, кг/м³ равна

$$\rho_1^{\text{выб}} = \rho_1 (P_0/P_1)^{1/k}, \quad (2)$$

где $\rho_1 = Q_1/V_1$ - плотность ОХВ в оборудовании, кг/м³; P_0 - давление в окружающей среде, принимаемое равным 100000 Па; k - показатель адиабаты газа.

Размер первичного облака в начальный момент времени R_1 , м равен

$$R_1 = \sqrt[3]{3Q_1 / (4\pi\rho_1^{\text{выб}})} \quad (3)$$

Сценарий 2.

Первичное облако не образуется, т.е. $Q_2 = 0$.

Расход ОХВ во вторичное облако, образующееся при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования $q_2^{\text{гн}}$, кг/с равен

$$q_2^{\text{гн}} = 0,8S \min \left\{ \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_2 \rho_2 \left[\left(\frac{P_0}{P_2} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_0}{P_2} \right)^{k+1/k} \right]}, \sqrt{P_2 \rho_2 k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k+1/k-1}} \right\} \quad (4)$$

Здесь **min** – минимальное из всех значений, например, $3 = \min(3,6)$; S – площадь отверстий разгерметизации, м².

Продолжительность истечения газообразного ОХВ из разрушенного оборудования $\tau_2^{\text{гн}}$, с равна

$$\tau_2^{\text{гн}} = \min \left[\frac{Q + Q_{\text{тр}}}{q_2^{\text{гн}}}, \tau_{\text{отс}} + \frac{Q_{\text{тр}}}{q_2^{\text{гн}}}, \tau_{\text{ликв}} \right], \quad (5)$$

если известна масса ОХВ в оборудовании Q и

$$\tau_2^{\text{гн}} = \min \left[\frac{m V_2 P_2}{R T_2 q_2^{\text{гн}}} + \frac{Q_{\text{тр}}}{q_2^{\text{гн}}}, \tau_{\text{отс}} + \frac{Q_{\text{тр}}}{q_2^{\text{гн}}}, \tau_{\text{ликв}} \right], \quad (5a)$$

если известны объем оборудования V_2 , м³, давление P_2 , Па и температура T_2 , К в оборудовании.

Здесь $Q_{\text{тр}}$ – общая масса ОХВ в отсекаемом участке аварийного трубопровода, кг; $\tau_{\text{отс}}$ - время отсечения аварийного участка трубопровода, с; $\tau_{\text{ликв}}$ - время ликвидации отверстий разгерметизации, с.

Начальный размер вторичного облака ОХВ, образующегося при истечении из разрушенного трубопровода $R_2^{\text{гн}}$, м равен

$$R_2^{\text{гн}} = \sqrt{\frac{q_2^{\text{гн}}}{\pi \rho_2^{\text{гн}} U}}, \quad (6)$$

где U - скорость ветра на высоте 10 м; $\rho_2^{\text{гн}}$ – плотность газообразного ОХВ во вторичном облаке в начальный момент времени определяется по формуле (2) для условия сценария 2; $\rho_2 = (\mu/R) (P_2/T_2)$ – плотность газообразного ОХВ в оборудовании, кг/м³.

Сценарий 3.

Масса ОХВ, образующая первичное облако Q_3 , кг складывается из массы ОХВ, переходящей в первичное облако при мгновенном вскипании перегретого ОХВ $Q_3^{\text{ж}}$, массы ОХВ, переходящей в первичное облако в виде аэрозоля $Q_3^{\text{ж}}$, массы ОХВ, переходящая в первичное облако при кипении пролива $Q_3^{\text{н}}$ и

массы газообразного ОХВ в оборудовании Q^r , т.е.

$$Q_3 = Q_3^r + Q_3^ж + Q_3^и + Q^r \quad (7)$$

Если величина Q^e заранее неизвестна, то ее можно определить по формуле

$$Q^e = \alpha \frac{\mu V_3 P_3}{R T_3}, \quad (8)$$

где α – объемная доля оборудования, заполненная газовой фазой.

$$Q_3^e = Q^e \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{C_p (T_3 - T_{кип} + |T_3 - T_{кип}|)}{2\Delta H_{кип}} \right] \right\}, \quad (9)$$

$$Q_3^ж = \min (Q_3^r, Q^ж - Q_3^r), \quad (10)$$

$$Q_3^и = \min \left\{ \frac{T_n - T_{кип} + |T_n - T_{кип}|}{\Delta H_{кип}} \sqrt{\frac{\lambda_n C_n \rho_n}{\pi}} \frac{F_{конт}^2}{F} \sqrt{\tau_{кип}}, Q^ж - Q_3^e - Q_3^ж \right\} \quad (11)$$

Здесь площадь поверхности разлива F принимается равной площади обваловки (поддона), а при разливе на грунт определяется по формуле

$$F = \frac{Q^ж - Q_3^и - Q_3^ж}{0,05 \rho_{ж}}; \quad (12)$$

площадь контакта с твердой поверхностью $F_{конт}$ включает в себя как подстилающую, так и боковую поверхность обваловки; при проливе на грунт $F_{конт} = F$;

$T_{п}$, $\lambda_{п}$, $C_{п}$, $\rho_{п}$ – соответственно, температура, теплопроводность, теплоемкость и плотность подстилающей поверхности. Теплофизические характеристики основных типов подстилающих поверхностей приведены в приложении I.

Продолжительность поступления ОХВ в первичное облако при интенсивном кипении жидкого ОХВ за счет подвода теплоты от подстилающей поверхности $\tau_{кип}$, с равна

$$\sqrt{\tau_{кип}} = \min \left[\frac{T_n - T_{кип} + |T_n - T_{кип}|}{2\Delta H_{кип}} \sqrt{\frac{\lambda_n C_n \rho_n}{\pi}} \frac{1}{\sqrt{\mu 10^{-6} (5,83 + 4,1U) P_{нас}}} \frac{F_{конт}}{F}, \sqrt{\frac{2\sqrt{F}}{U}} \right] \quad (13)$$

$P_{нас}$ – давление насыщенного пара, мм. рт. ст., определяемое по формуле

$$P_{нас} = 760 \exp \left[\frac{\Delta H_{кип}}{R} \left(\frac{1}{T_{кип}} - \frac{1}{T_{возд}} \right) \right]. \quad (14)$$

Расход ОХВ во вторичное облако, образующееся при испарении ОХВ из пролива $q_3^и$, кг/с равен

$$q_3^и = F \sqrt{\mu} 10^{-6} (5,83 + 4,1 U) P_{нас} \quad (15)$$

Продолжительность поступления ОХВ во вторичное облако $\tau_3^и$, с равна

$$\tau_3^и = (Q - Q_3) / q_3^и \quad (16)$$

Плотность ОХВ в первичном облаке в начальный момент времени $\rho_3^{\text{выб}}$ кг/м³ определяется по формулам

$$\rho_3^{\text{выб}} = \begin{cases} \rho_{\text{кип}} \frac{Q_3}{Q_3^2 + Q_3^u + Q^2}, & \text{если } T_3 > T_{\text{кип}} \text{ или } T_{\text{п}} > T_{\text{кип}} \\ \frac{\mu P_3}{R T_3} \left(\frac{P_0}{P_3}\right)^{1/k} & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (17)$$

Радиус первичного облака определяем по формуле (3), заменяя нижний индекс 1 на 3.

Определение высоты источника выброса.

Высота источника выброса h , м, принимается при наличии обваловки равной высоте последней, в остальных случаях $h = 0$.

Определение полей концентрации ОХВ

Величина дисперсии в зависимости от расстояния x определяется по формулам

$$\sigma_x = \frac{C_3 x}{\sqrt{1 + 0,0001x}} \quad (18)$$

$$\sigma_y = \begin{cases} \sigma_x (220,2 * 60 + x/U) / (220,2*60 + 600), & \text{если } x/U \geq 600 \\ \sigma_x, & \text{если } x/U < 600. \end{cases} \quad (19)$$

$$\sigma_z = f(z_0, x) * g(x), \quad (20)$$

где $q(x) = \frac{A_1 x^{B_1}}{1 + A_2 x^{B_2}};$

$$f(z_0, x) = \begin{cases} \ln[C_1 x^{D_1} (1 + C_2 x^{D_2})], & \text{при } z_0 < 0,1 \text{ м} \\ \ln[C_1 x^{D_1} / (1 + C_2 x^{D_2})], & \text{при } z_0 \geq 0,1 \text{ м} \end{cases}$$

z_0 – коэффициент, характеризующий шероховатость подстилающей поверхности (приложение II)

Значения коэффициентов $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1, D_2$ приведены в приложениях III и IV. Значения коэффициентов A_1, A_2, B_1, B_2, C_3 зависят от класса устойчивости атмосферы, зависящего от скорости ветра и интенсивности теплого потока у поверхности земли (приложение V)

Предельные значения σ_z равны 640 – для конвекции, 400 – для изотермии и 220 – для инверсии. Если результаты расчета по формуле (20) дают большие значения σ_z , то следует использовать приведенные предельные значения.

Концентрация ОХВ при прохождении первичного облака (для всех сценариев)

$$c(x, y, z, \tau) = G_3(x, y, z, \tau) \frac{Q_i}{2,67\pi R_i^3 + (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \quad (21)$$

$$G_3(x, y, z, \tau) = \exp\left[-\frac{x-U\tau}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] * \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (22)$$

Концентрация ОХВ при прохождении вторичного облака, образующегося при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования при наличии пролива

$$\begin{aligned} c_i^c(x, y, z, \tau) &= G_n(x, y, z) \frac{q_i^c}{U[2\pi(R_i^c)^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z]}, \text{ при } x \leq x_{\text{гр}}(\tau_i^c) \text{ и } \tau > x/U_B; \\ &= 0, \text{ при } \tau \leq x/U; \\ &= G_n(x, y, z, \tau) \frac{q_i^c \tau_i^c}{2\pi(R_i^c)^2 \tau_i^c U + (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \text{ при } x > x_{\text{гр}}(\tau_i^c) \text{ и } \tau > \tau_i^{mc} \end{aligned} \quad (24)$$

Здесь τ_i^{Γ} – длительность истечения газообразного ОХВ из разрушенного оборудования при наличии пролива, с;

$$G_n(x, y, z) = \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] * \left\{\exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\} \quad (25)$$

Концентрация ОХВ при прохождении вторичного облака, образующегося при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования в отсутствие пролива $c_i^{cu}(x, y, z, \tau) = G_n(x, y, z) \frac{q_i^{cu}}{U[2\pi(R_i^{cu})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z]}$, при $x \leq U\tau_i^{\Gamma H}/(C_3$

$$\begin{aligned} &\sqrt{2\pi}) \text{ и } \tau > x/U; \\ &= 0, \text{ при } x \leq U\tau_i^{\Gamma H}/(C_3\sqrt{2\pi}) \text{ и } \tau \leq x/U; \\ &= G_n(x, y, z, \tau - \tau_i^c) \frac{q_i^{cu} \tau_i^{cu}}{2\pi(R_i^{cu})^2 U \tau_i^c + (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \text{ при } x > U\tau_i^{\Gamma H}/(C_3\sqrt{2\pi}). \end{aligned} \quad (26)$$

Здесь $\tau_i^{\Gamma H}$ – длительность истечения газообразного ОХВ из разрушенного оборудования в отсутствие пролива, с;

$q_i^{\Gamma H}$ – расход ОХВ во вторичном облаке, образующемся при испарении ОХВ из оборудования в i -том сценарии.

Концентрация ОХВ при прохождении вторичного облака, образующегося при испарении ОХВ из пролива.

$$\begin{aligned} c_i^H(x, y, z, \tau) &= \\ &= G_n(x, y, z) \frac{q_i^H}{2q_i^H/\rho_i^H + U2\pi\sigma_y\sigma_z}, \text{ при } x \leq U\tau_i^H/(C_3\sqrt{2\pi}) \text{ и } \tau > \tau_i^{\Gamma} + \tau_i^{\Gamma H} + x/U; \\ &= 0, \text{ при } x \leq U\tau_i^H/(C_3\sqrt{2\pi}) \text{ и } \tau < \tau_i^{\Gamma} + \tau_i^{\Gamma H} + x/U_B; \\ &= G_3(x, y, z, \tau - \tau_i^c - \tau_i^{cu}) \frac{q_i^H \tau_i^H}{2q_i^H \tau_i^H / \rho_i^H + (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \text{ при } x > U\tau_i^H/(C_3\sqrt{2\pi}) \text{ и} \\ &\tau > \tau_i^{\Gamma} + \tau_i^{\Gamma H}. \end{aligned} \quad (27)$$

Здесь τ_i^H – длительность испарения ОХВ из пролива в i -том сценарии, с;
 q_i^H – расход ОХВ во вторичном облаке, образующемся при испарении
ОХВ из пролива в i -том сценарии, кг/с.

Концентрация ОХВ при прохождении вторичного облака, образующегося при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования

$$c_i^{Ж} (x, y, z, \tau) =$$

$$= G_H(x, y, z) \frac{q_i^{Ж}}{U[2\pi(R_i^{Ж})^2 + 2\pi\sigma_x\sigma_y\sigma_z]}, \text{ при } x \leq U\tau_i^{Ж}/(C_3\sqrt{2\pi}) \text{ и } \tau > x/U;$$

$$= 0, \text{ при } x \leq U\tau_i^{Ж}/(C_3\sqrt{2\pi}) \text{ и } \tau \leq x/U; \quad (28)$$

$$= G_3(x, y, z, \tau) \frac{q_i^{Ж}\tau_i^{Ж}}{2\pi(R_i^{Ж})^2 U\tau_i^{Ж} + (2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z}, \text{ при } x > U\tau_i^{Ж}/(C_3\sqrt{2\pi}).$$

Здесь $\tau_i^{Ж}$ – длительность истечения жидкого ОХВ из разрушенного оборудования в i -том сценарии, с;

$q_i^{Ж}$ – расход ОХВ во вторичном облаке, образующемся при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования в i -том сценарии, кг/с.

Определение полей токсидозы ОХВ

Составляющая токсидозы при прохождении **первичного** облака (для всех сценариев)

$$D_i(x, y, z) = G_H(x, y, z) \frac{Q_i(2\pi)^{1/2}\sigma_x}{U[2,67\pi R_i^3 + (2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z]} \quad (29)$$

Составляющая токсидозы при прохождении вторичного облака, образующегося при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования.

$$D_i^{ГН} (x, y, z) = G_H(x, y, z) \frac{q_i^{2u} \min[\tau_i^{2u}, 0,5(\tau_{экс} - \tau_i^{Ж} - \tau_i^2 + |\tau_{экс} - \tau_i^{Ж} - \tau_i^2|)]}{U[2\pi(R_i^{2u})^2 + 2\pi\sigma_x\sigma_y\sigma_z]},$$

при $x \leq U\tau_i^{ГН}/(C_3\sqrt{2\pi})$;

$$= G_H(x, y, z) \frac{q_i^{2u}\tau_i^{2u}(2\pi)^{1/2}}{U[2\pi(R_i^{2u})^2 U\tau_i^{2u} + (2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z]},$$

при $x > U\tau_i^{ГН}/(C_3\sqrt{2\pi})$.

Составляющая токсидозы при прохождении вторичного облака, образующегося при испарения ОХВ из пролива

$$D_i^H (x, y, z) = \quad (30)$$

$$= G_H(x, y, z) \frac{q_i^H \min[\tau_i^{2u}, 0,5(\tau_{экс} - \tau_i^{Ж} - \tau_i^2)]}{2q_i^H / \rho_i^H + 2\pi U\sigma_y\sigma_z}, \text{ при } x \leq U\tau_i^H/(C_3\sqrt{2\pi});$$

$$= G_H(x, y, z) \frac{q_i^H\tau_i^H(2\pi)^{1/2}\sigma_x}{U[2q_i^H\tau_i^H / \rho_i^H + (2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z]}, \text{ при } x > U\tau_i^H/(C_3\sqrt{2\pi}).$$

Здесь $\tau_{экс}$ – время экспозиции, с.

Составляющая токсидозы при прохождении вторичного облака,

образующегося при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования.

$$D_i^{\text{ж}}(x, y, z) = G_{\text{н}}(x, y, z) \frac{q_i^{\text{жс}} \min(\tau_i^{\text{жс}}, \tau_{\text{экс}})}{U[2\pi(R_i^{\text{жс}})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z]}, \text{ при } x \leq w_{\text{в}} \tau_i^{\text{ж}} / (C_3 \sqrt{2\pi});$$

$$= G_{\text{н}}(x, y, z) \frac{q_i^{\text{жс}} \tau_i^{\text{жс}} (2\pi)^{1/2} \sigma_x}{U[2\pi(R_i^{\text{жс}})^2 U \tau_i^{\text{жс}} + (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z]}, \text{ при } x > w_{\text{в}} \tau_i^{\text{ж}} / (C_3 \sqrt{2\pi}).$$

(31)

Истинная токсодоза определяется суммированием всех составляющих токсодоз для данной точки.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с содержанием методики моделирования распространения паро-газовоздушного облака в приземном слое атмосферы (методика ТОКСИ).

2. Получить задание (номер варианта) у преподавателя (табл.1) и рассчитать поля концентраций и токсодоз.

3. Полученные данные занести в протокол (табл. 2 и 3).

4. Определить протяженности зон ущерба порогового и летального поражения.

Таблица 1

Варианты задания исходных данных

№	ОХВ	М, т	Характер разлива	Время и условия аварии	Т-ра воздуха, °С	Скорость воздуха, м/с	Время после аварии, ч
1	Аммиак (изотермич. хранение)	100	поддон	День, умерен инсоляция	0	1	1,0
2	Мышьяковистый водород	5	Поддон	День, интенсивная инсоляция	20	2	0,5
3	Фтористый водород	6	Свободно	День, слабая инсоляция	-20	3	1,0
4	Хлористый водород	7	Поддон	День, умерен. инсоляция	20	4	0,5
5	Бромистый водород	10	Поддон	День, интенсив. инсоляция	15	5	1,0
6	Цианистый водород	25	Поддон	Ночь, >5.8 обл.	23	6	0,5

				покрова			
7	Сероводород	5	Поддон	День, умерен инсоляция	0	7	1,0
8	Сероуглерод	10	Свободно	Ночь, <3/8 обл. покрова	10	1	0,5
9	Формальде- гид	5	Поддон	День, слабая инсоляция	15	2	1,0
10	Фосген	50	Поддон	День, интенс. инсоляция	25	3	0,5
11	Фтор	10	Свободно	Ночь, >5.8 обл. покрова	-10	4	1,0
12	Хлор	10	Свободно	День, слабая инсоляция	0	5	0,5
13	Аммиак (хранение под давлением)	50	Свободно	День, умерен инсоляция	20	6	1,0
14	Мышьяко- вистый водород	10	Поддон	Ночь, <3/8 обл. покрова	15	7	0,5
15	Фтористый водород	10	Поддон	День, Интенсив. инсоляция	20	1	1,0
16	Хлористый водород	10	Поддон	День, слабая инсоляция	-10	2	0,5
17	Бромистый водород	5	Поддон	День, умерен инсоляция	-5	3	1,0
18	Цианистый водород	15	Поддон	Ночь, <3/8 обл. покрова	0	4	0,5
19	Сероводород	15	Свободно	День, интенсив. инсоляция	5	5	1,0
20	Сероуглерод	5	Свободно	Ночь, >5.8 обл.	10	6	0,5

				покрова			
21	Формальдегид	10	Свободно	День, умерен инсоляция	15	7	1,0
22	Фосген	25	Свободно	День, слабая инсоляция	20	1	0,5
23	Фтор	15	Свободно	Ночь, >5.8 обл. покрова	20	2	1,0
24	Хлор	15	Свободно	День, интенсив. инсоляция	15	3	0,5
25	Хлорциан	10	поддон	День, умерен инсоляция	10	4	1,0

Таблица 2

Результаты расчетов

№	Параметр	Величина
1	Глубина зоны порогового поражения, м	
2	Глубина зоны летального поражения, м	
3	Общее количество ОХВ в первичном облаке, кг	
4	Общее количество ОХВ во вторичном облаке	
5	Время поступления ОХВ во вторичное облако, с	
6		

Таблица 3

Рассчитанные значения токсодоз

Координаты, м		Токсодоза, мг.мин/л
x	y	

Порядок выполнения работы

1. Открыть программу ТОКСИ
2. В окне «Оценка последствий химической аварии» выбрать состояние ОХВ (газообразное или жидкое в соответствии с заданием);
3. Выбрать характер разрушения (полное разрушение или нарушение герметичности);
4. В окне «Ввод исходных данных» ввести данные в соответствии с заданием, нажать кнопку «Параметры»;

5. В открывшемся окне заполнить все позиции, нажать кнопку «Запомнить»

6. В окне «Ввод исходных данных» нажать кнопку «Начать моделирование»

7. В окне «Графики концентраций и токсодоз» нажать кнопку «Расчет». В правой колонке выбрать значения токсодоз, значимых в рассматриваемом варианте расчета;

8. Нажать кнопку «Результаты» и в появившемся окне «Результаты расчетов» последовательно нажать кнопки «Отчет» и «Редактировать»;

9. Появившиеся значения основных параметров занести в протокол работы (табл. 2).

10. Закрывать окно «Результаты расчетов» и нажать клавишу «Графики»;

11. В открывшемся окне установить продолжительность времени (0 – 3333 с.), задать размеры поля и нажать кнопку «Построить»;

12. Последовательно подводя курсор к 5 точкам на оси газового шлейфа в каждой точке два раза нажать левую клавиши мышки и записать в табл.3 значения x , y и D .

13. В трех сечениях шлейфа таким же образом определить распределение токсодоз по сечению шлейфа. Занести данные в табл. 3.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I

Теплофизические характеристики подстилающих поверхностей

Тип поверхности	$\rho_{п}$ кг/м ³	$\lambda_{п}$ Вт/(м*К)	$C_{п}$ Дж/(кг*К)
Бетон	220	1,42	770
Песок	1380	0,35	840
Лед	920	2,23	2080

Приложение II

Коэффициент шероховатости подстилающей поверхности

Тип поверхности	z_0
Ровная местность, покрытая снегом	0,1
Ровная местность с высотой травы до 1 см	0,1
Ровная местность с высотой травы до 15 см	1,0
Ровная местность с высотой травы до 60 см	5,0
Местность, покрытая кустарником	12,0
Лес высотой до 10 м	40,0
Городская застройка	100,0

Приложение III

Значения коэффициентов C_1, C_2, D_1, D_2 в зависимости от шероховатости подстилающей поверхности

z_0	C_1	C_2	D_1	D_2
1	1,56	0,000625	0,048	0,45
4	2,02	0,000776	0,027	0,37
10	2,73	0	0	0
40	5,16	0,0538	-0,098	0,225
100	7,37	0,000233	-0,096	0,6

Приложение IV

Значения коэффициентов A_1, A_2, B_1, B_2, C_3 в зависимости от класса устойчивости атмосферы

Класс устойчивости	A_1	A_2	B_1	B_2	C_3
Конвекция	0,112	0,0009 2	0,92 0	0,71 8	0,1 1
Изотермия	0,098	0,0013 5	0,88 9	0,68 8	0,0 8
Инверсия	0,060 9	0,0019 6	0,89 5	0,68 4	0,0 6

Приложение V

Классы устойчивости атмосферы

Скорость ветра на высоте 10 м., w_B , м/с	День			Ночь	
		Инсоляция			Тонкая сплошная облачность или
	Интенсивная	Умеренная	Слабая	>5/8 обл. покровы	<3/8 обл. покровы

≤ 2	Конвекция	Конвекция	Конвекция	Инверсия	Инверсия
2...3	Конвекция	Конвекция	Конвекция	Инверсия	Инверсия
3...5	Конвекция	Конвекция	Конвекция	Изотермия	Инверсия
5...6	Конвекция	Конвекция	Конвекция	Изотермия	Изотермия
> 6	Конвекция Конвекция Изотермия	Конвекция Изотермия Изотермия	Конвекция Изотермия Изотермия	Изотермия	Изотермия

Приложение VI

Свойства ОХВ

№	ОХВ	μ , $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$	$\rho_{\text{г}}$, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho_{\text{ж}}$, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$t_{\text{кип}}$, °С	C_p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$k = \frac{C_p}{C_v}$	$D_{\text{пор}}$, $\frac{\text{мг}\cdot\text{мин}}{\text{л}}$	$D_{\text{лет}}$, $\frac{\text{мг}\cdot\text{м}}{\text{ин}} \cdot \frac{\text{л}}{\text{л}}$	$\Delta H_{\text{кип}}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
1	Аммиак	17,0	0,8	681	-33,4	4,6	1,34	15,0	150	1360
2	Мышьяк- ковис- тый водород	77,9	3,5	1640	-62,5	0,5	1,30	0,2	6,0	242
3	Фторис- тый водород	20,4	0,92	989	19,4	1,42	1,30	4,0	40,0	1560
4	Хлорис- тый водород	36,5	1,64	1191	-85,1	0,8	1,41	2,0	20,0	300
5	Бромис- тый водород	80,9	3,50	1490	-67,8	0,36	1,42	2,4	24,0	217
6	Цианист ый водород	27,0	0,9	689	25,6	1,33	1,31	0,2	6,0	933
7	Серовод ород	34,1	1,5	964	-60,4	1,04	1,30	1,0	15,0	310
8	Сероугле род	76,1	6,0	1263	46,2	0,67	1,24	30,0	500	352
9	Формаль дегид	30,0	1,03	815	-19,3	1,32	1,30	0,6	6,0	273
10	Фосген	98,9	3,48	1420	8,2	0,67	1,30	0,55	3,2	158

1 1	Фтор	38,0	1,7	151 2	- 188, 0	3,32	1,30	0,2	3,0	727
1 2	Хлор	70,1	3,2	155 3	-34,1	0,92	1,30	0,6	6,0	288
1 3	Хлорциан	61,5	2,1	125 8	12,6	0,73	1,30	0,75	11,0	208
1 4	Оксид углерода	28,0	0,97	100 0	- 191, 6	1,04	1,29	10,0	37,5	216
1 5	Оксид этилена	44,0	1,7	882	10,7	1,72	1,30	2,2	25,0	320

Практическая работа № 5

Априорная оценка риска аварии при эксплуатации ОПО на примере методики, реализованной в экспертном программном комплексе *tHAZARD*

Цель работы: познакомиться с проблемой априорной оценки риска аварии при эксплуатации опасного производственного объекта (ОПО) на примере методики, реализованной в экспертном программном комплексе *tHAZARD*; научиться использовать методику оценки риска аварии.

Теоретические положения

Экспертный программный комплекс *tHAZARD* разработан в рамках федеральной целевой научно-технической подпрограммы "Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф" коллективом авторов под руководством А.И. Гражданкина (НТЦ "Промышленная безопасность"), П.Г. Белова (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Экспертная система оценки техногенного риска опасных производственных объектов является одним из альтернативных методов анализа риска, вычислительным ядром системы является имитационная модель процесса возникновения происшествий в человекомашинных системах. Такое моделирование менее чувствительно к неточности и нечеткости исходных данных и дает возможность одновременно учитывать десятки разрозненных входных параметров.

Отличительные особенности рассматриваемой модели:

1. Имитация зарождения и обрыва причинной цепи предпосылок возникновения происшествия.
2. Учет до 30 факторов, влияющих на безопасность человекомашинных систем
3. Использование метода Монте-Карло для количественной оценки вероятности возникновения происшествия в человекомашинной системе.
4. Возможность диагностирования таких состояний системы "человек-машина-рабочая среда", как гомеостазис, опасная и критическая ситуации, адаптация к неблагоприятным событиям.

В основу идеи моделирования положен учет влияния психофизиологических свойств человека-оператора, факторов надежности машины-оборудования, комфортности рабочей среды и уровня технологии на качество выполнения человеком операторской деятельности. В основу идеи моделирования положен учет влияния психофизиологических свойств человека-оператора, факторов надежности машины-оборудования, комфортности рабочей среды и уровня технологии на качество выполнения человеком операторской деятельности. Ее основные этапы:

восприятие и дешифровка информации о ходе выполнения операции; структурирование и стратификация полученных данных; обнаружение отклонений процесса от требований технологии; оценка необходимости и способов вмешательства в него человека; сравнение альтернативных действий и выбор из них конкурентоспособных; определение степени их приемлемости и эффективности; принятие и реализация решения по корректировке операции при необходимости.

В самом общем виде работу имитационной модели можно свести к нахождению точечного значения функциональной зависимости между оценками факторов опасности (см. табл. 1) и вероятностью неблагоприятных событий в человекомашинной системе Q , т.е.

$$Q = f(x_1, x_2, \dots, x_k),$$

где x_1, x_2, \dots, x_k - формализованные оценки факторов опасности. Неявный вид этой зависимости определяется особенностями функционирования имитационной модели процесса возникновения происшествия в человекомашинной системе, который характеризуется следующими основными моментами:

1. Производственная деятельность человека потенциально опасна, так как связана с энергопотреблением (выработка, хранение, преобразование тепловой, механической, электрической, химической и других видов энергии).
2. Производственная опасность проявляется в результате несанкционированного или неуправляемого выхода энергии, накопленной в технологическом оборудовании.
3. Возникновение происшествий - следствие развития причинной цепи предпосылок, инициаторами и составными частями которой являются ошибочные действия работающих, неисправности и отказы технологического оборудования, а также воздействующие на них внешние факторы. Именно реализация вышеприведенных принципов и заложена в рассматриваемой имитационной модели. В частности, "возмущениями" в модели служат ошибки, отказы и неблагоприятные внешние воздействия, появление которых имитируется стохастическим выбросом в сеть определенной для каждого фактора числовой информации с распределениями, зависящими от первоначальных оценок факторов опасности x_1, x_2, \dots, x_k . Такие "возмущения" в соответствии с логикой сети выстраиваются в причинную цепь предпосылок, которая может, как обрываться (сработала защита, оператор устранил ошибку - умножение на ноль), так и приводить к "модельному" происшествию (достижение узлов "несчастный случай", "катастрофа", "поломка", "авария"). Число благоприятных и неблагоприятных исходов моделирования фиксируется, затем вычисляется частота возникновения происшествия.

Для формализации исходных данных по факторам опасности использована система балльных оценок, опирающаяся на универсальную

лингвистическую шкалу ("очень низко", "низко", "средне", "хорошо" ... - всего 11 разрядов-оттенков), что позволяет унифицировать как качественные, так и количественные исходные данные. Этот подход находит все большее применение при решении вопросов анализа риска.

Экспертная система при оценке факторов опасности позволяет выдавать пользователю необходимые разъяснения с опорой на действующие ГОСТы и нормативные документы. Например, для оценки фактора С01 "Комфортность по физико-химическим параметрам рабочей среды" используется следующий набор правил:

Если	содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны = 2,1 - 4,0 ПДК; эквивалентный уровень шума на рабочем месте превышает ПДУ до 10 дБ; электрические поля промышленной частоты \leq ПДУ (для всего рабочего дня); уровень общей вибрации допустимый; параметры световой среды оцениваются как вредно (1-я степень); показатели микроклимата допустимые,
то	комфортность по физико-химическим параметрам рабочей среды - средняя.

Заключительная лингвистическая оценка фактора С01 "Комфортность по физико-химическим параметрам рабочей среды" для конкретного опасного производственного объекта определяется с помощью Руководства "Гигиенические критерии оценки и классификация условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса" и сводной табл. 2.

Таблица 2

Оценка фактора "Комфортность по физико-химическим параметрам рабочей среды"

Фактические условия труда по Р 2.2.2006-05	Оценка условий труда	
	по Р 2.2.2006-05	лингвистическая
Более 1 фактора 4.0	4.0	Очень, очень низкая
1 фактор 4.0, более 1 фактора 3.4	4.0	Очень низкая
1 фактор 3.4, более 1 фактора 3.3	3.4	Низкая

1 фактор 3.3, более 1 фактора 3.2	3.3	Ниже среднего
1 фактор 3.2, более 2 факторов 3.1	3.2	Средняя
2 фактора 3.1	3.1	Выше среднего
1 фактор 3.1	3.1	Хорошая
Более 10 факторов 2.0	2.0	Очень хорошая
До 10 факторов 2.0	2.0	Высокая
Все факторы 1.0	1.0	Очень высокая

Не все факторы опасности поддаются подобной однозначной лингвистической оценке. В табл. 3 представлен пример балльной оценки фактора опасности М07 "Уровень потенциала опасных и вредных факторов" для конкретного опасного производственного объекта - изотермического хранилища жидкого аммиака.

Балльные и лингвистические оценки каждой составляющей фактора опасности (см. табл. 3) выбираются в соответствии с нормативными документами. Например, составляющая "Объем запасенного аммиака" оценивается согласно Федеральному закону "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" от 21.07.97 N 116-ФЗ и табл. 4, в которой приводится балльная и лингвистическая оценка запаса опасных веществ.

Таблица 3

Оценки фактора опасности "Уровень потенциала опасных и вредных факторов"

Составляющие фактора опасности М07	Значимость (0-1,0)	Оценка составляющей		
		балльная(0-10)	лингвистическая	средневзвешенная
Объем запасенного аммиака	0,3	9	Чрезвычайно большой (8000 т)	2,7
Класс опасности аммиака	0,15	4	Опасный (IV степень)	0,6
Рабочее напряжение электроустановок	0,1	8	Высокое (380 В)	0,8
Рабочее давление сжатых газов	0,1	4	Среднее (до 1,5 МПа)	0,6

Перепад высот	0,1	7	Очень большой (до 25 м)	0,7
Механическая энергия подвижных элементов	0,1	6	Большая	0,6
Взрыве-, пожароопасность	0,15	2	Низкая	0,3
Итого по М07	1,0	-	Большой	6,3

Таблица 4

Балльная и лингвистическая оценка запаса опасных веществ

Предельное количество опасных веществ	Оценка запаса	
	балльная	лингвистическая
Отсутствует	0	Отсутствует
Менее 0,0003	1	Пренебрежительно малый
0,0003-0,001	2	Очень малый
0,001-0,003	3	Малый
0,003-0,01	4	Ниже среднего
0,01-0,3	5	Средний
0,3-1	6	Выше среднего
1-3	7	Большой
3-10	8	Очень большой
10-30	9	Чрезвычайно большой (огромный)
Более 30	10	Катастрофически большой

После процедур оценки исходных факторов опасности и определения с помощью имитационной модели вероятности возникновения происшествия на опасном производственном объекте возможна постановка задачи оптимизационного выбора предполагаемого комплекса мер безопасности на рассматриваемом объекте.

В настоящее время концепция описанной выше экспертной системы реализована в виде программного комплекса technoHAZARD, который

разработан в рамках федеральной целевой научно-технической подпрограммы "Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф". Программа работает под управлением операционной системы Windows и имеет доступный интерфейс. Типичный уровень пользователя соответствует примерно уровню инженера по технике безопасности.

Задачи, успешно решаемые при использовании экспертного программного комплекса **HAZARD**:

- количественная оценка вероятности аварии (происшествия) с учётом особенностей исследуемого ОПО;
- оценка эффективности мероприятий, направленных на совершенствование безопасности;
- выбор набора мер безопасности, оптимального при заданных критериях и ограничениях.

Проблема оценки техногенного риска

Риск – мера опасности. В самом простом случае мера опасности может быть оценена математическим ожиданием ущерба при функционировании ОПО.

$$R = R_A + R_{\emptyset} = \sum_{i=1}^{n-1} P(B_i) \cdot y_i + P(B_n) \cdot \sum_{j=1}^m \overline{y_{nj}} \quad (1)$$

где R – полный техногенный риск эксплуатации ОПО;

R_A - риск аварии;

R_{III} - штатный риск эксплуатации ОПО;

$[P(B_n) \approx 1]$ - вероятность причинения ущерба при штатном функционировании;

$P(B_i)$ - вероятность причинения ущерба вреда при i -ом сценарии аварии;

$\overline{y_i}$ - ущерб при i -ом сценарии аварии;

$\overline{y_{nj}}$ - размер средних ущербов причиняемых ОПО или сторонним объектам при штатном функционировании ОПО. К основным из них относятся платы за загрязнение окружающей среды $\overline{y_{ин}}$ и ущербы от хозяйственной деятельности $\overline{y_{дй}}$.

Штатный риск существует при нормативном функционировании ОПО и связан с известным негативным воздействием на человека, имущество и окружающую среду. Задачей рассматриваемой методики является априорная оценка риска аварии - R_A , обусловленного возможностью возникновения происшествия на ОПО.

В настоящее время достаточно хорошо разработано моделирование сценариев развития аварий в случае их возникновения, позволяющее оценивать последствия – степень разрушений, повреждений, число жертв, отравлений, а также оптимизировать выбор мероприятий, направленных на снижение тяжести последствий. Поэтому зачастую на практике меры улучшения безопасности направлены в основном на ликвидацию последствий и уменьшение ущерба при возникновении аварии. Однако, как показывает та же практика, меры по снижению вероятности аварии на 2-3 порядка эффективнее мер, направленных

на снижение возможных последствий по критерию “затраты-результаты”. Выяснение причин аварий и оптимальный подбор мероприятий, направленных на их предотвращение – более сложная задача. В данной лабораторной работе предлагается ознакомиться с методикой оценки риска аварии, позволяющей учесть особенности конкретного ОПО, подобрать и оценить мероприятия, снижающие вероятность аварии. Для этого сначала, используя соотношение (2), выполняется оценка риска аварии.

$$R_A = P(A) \cdot \left[\sum P_{C_i}(A) \cdot y_i \right], \quad (2)$$

где R_A - риск аварии (условные денежные единицы);

$P(A)$ - вероятность происшествия;

Y_i - ущерб ОПО или сторонним объектам;

$P_{C_i}(A)$ - условная вероятность реализации аварии (события A) по i -му сценарию;

k – число возможных сценариев аварии.

Правый сомножитель (в квадратных скобках) – средний ущерб (вред) от возможной аварии - считается заданным. Задача данной лабораторной работы – оценка вероятности происшествия – величины $P(A)$. Для этого используется имитационная модель процесса возникновения происшествия в системе “Персонал - Оборудование - рабочая Среда” (ПОРС), основанная на типовом алгоритме деятельности человека-оператора. Оцениваемые с помощью имитационной модели величины используются при вычислении критериев сравнения эффективности мероприятий по совершенствованию безопасности. Задав множество возможных мероприятий можно моделировать применение их подмножеств к ОПО и сравнивать эффективность, т.е. в конечном счете, эффективно расходовать ресурсы, направляемые на обеспечение безопасности труда в промышленности.

Краткое описание входных и выходных данных

Большую часть входных данных модели составляют свойства факторов опасности: лингвистическая оценка, уровень доверия, индексы опасности.

Фактор опасности – любой фактор, негативно воздействующий на любой компонент системы «человек-машина-внешняя среда».

Для формализации исходных данных по факторам опасности использована система балльных оценок, опирающаяся на универсальную лингвистическую шкалу (“очень низко”, “низко”, “средне”, “хорошо” ... - всего 11 разрядов-оттенков), что позволяет унифицировать как качественные, так и количественные исходные данные. Каждой лингвистической оценке соответствует балльная оценка, представленная ниже:

$$V \in \{0.084, 0.166, 0.250, 0.334, 0.417, 0.500, 0.584, 0.667, 0.750, 0.834, 0.916\}$$

Например, “Качество информационной модели” – ХОРОШЕЕ – это лингвистическая оценка, ей соответствует балльная оценка 0,334.

Уровень доверия может оцениваться как низкий, средний или высокий.

Индекс опасности I_j безразмерная величина - численная мера опасности, имитирующая предрасположенность фактора H_n к формированию предпосылок

происшествия.

Основными выходными данными модели является Q - вектор вероятностей состояний, где нумерация в соответствии с рис. 1 Q_1 - вероятность взаимодействия в процессе работы, Q_2 - вероятность гомеостаза, ..., Q_9 - вероятность происшествия $P(A)$.

Для решения оптимизационной задачи дополнительно требуется описание комплекса мероприятий, из которых осуществляется выбор. В этом случае результатом будет множество, представляющее набор мероприятий - возможные варианты решения оптимизационной задачи. Для каждого из них вычисляются: финансовые затраты на внедрение (S); изменение вероятности происшествия при возможном внедрении ($-AQ_9$); выгода от возможного внедрения: $R = -AQ_9 \cdot Y$ (Y - средний ущерб от возможного происшествия, выраженный денежными единицами); коэффициент эффективности: $\hat{E}_Y = \frac{R}{S}$.

Содержание методики двухуровневой оценки техногенного риска ОПО

Предусмотрено два уровня пользователей: *инженеры* и *эксперты*. Первые оценивают техногенный риск и подбирают мероприятия улучшения безопасности. Вторые создают необходимые для этого методики, модули экспертной оценки факторов опасности, базы данных для этих модулей и базовые модели для классов ОПО. Все необходимые процедуры осуществляются в рамках рассматриваемой экспертной системы **tHAZARD**.

В задачи эксперта входит:

1. Создание базовых моделей классов ОПО для нескольких уровней качества (низкое, нормальное, высокое). Например, традиционный сосуд, современный сосуд. Классы могут быть более узкими, например, грузоподъемный механизм или даже изотермическое хранилище жидкого аммиака. Из них создаются депозитарии для разных предметных областей. Главное содержание этого этапа - установить каждому фактору опасности лингвистическую оценку (V), соответствующую качеству базовой модели и зависящую от класса объекта. Устанавливается уровень доверия к исходным данным.

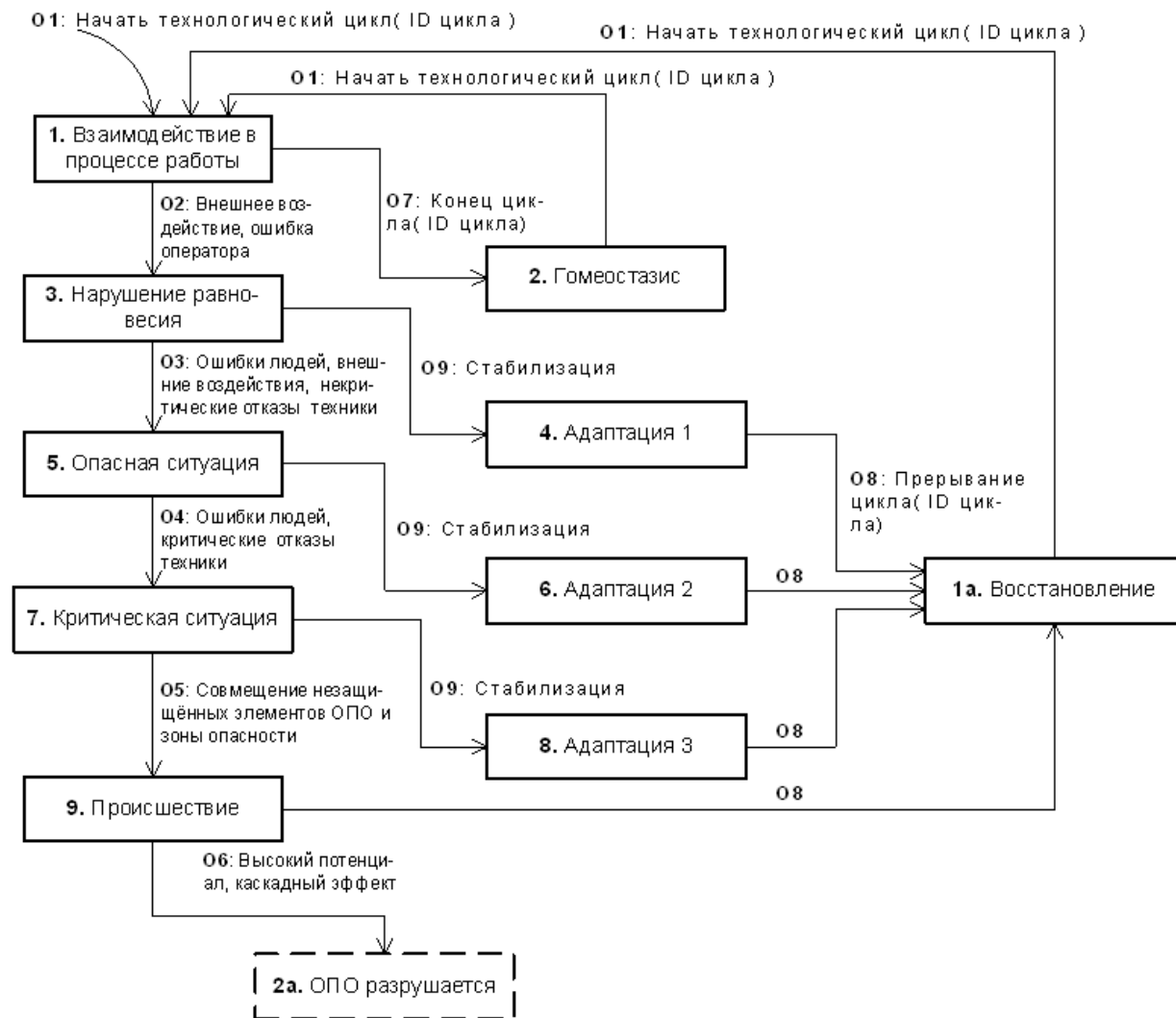


Рис. 1. Модель состояний ОПО

2. Установка области определения каждого фактора опасности. Используемая шкала лингвистических оценок позволяет любому фактору иметь 11 градаций качества. Если имеется дополнительная информация, эксперт ограничивает область определения, указывая распределение чувствительности к изменению оценки фактора. Это второй механизм, позволяющий учесть особенности конкретных классов ОПО.
3. Установка индексов опасности каждого фактора опасности (\bar{I}). Выполняется на основе статистических данных о значимости фактора среди причин аварийности и травматизма.
4. Калибровка модели на статистические вероятности: “Нарушение равновесия”, “Опасная ситуация”, “Критическая ситуация”, “Происшествие”. Заключительный этап настройки модели на класс ОПО. Процедура калибровки выполняется автоматически и приводит к получению внутренних параметров модели, при которых получаются среднестатистические вероятности состояний определенного типа ОПО.
5. Разработка методики вычисления лингвистических оценок (V) факторов опасности. Во многих случаях может использоваться стандартный модуль оценки, основанный на методике средневзвешенной оценки и поставляемый с **tHAZARD**.

В задачи инженера входит:

1. Выбор из депозитария наиболее подходящей для данного ОПО базовой модели.
2. Подключение модели к **tHAZARD** вместе с прилагаемым модулем экспертной оценки и соответствующими данными.
3. Модификация модели на соответствие исследуемому ОПО (вручную, либо с помощью модуля экспертной оценки). Изменение лингвистических оценок (V) и уровней доверия (K) факторов опасности.
4. Описание комплексов мероприятий (M) совершенствования безопасности ОПО. Объединение в комплексы выполняется по признакам общности. Позволяет упростить манипуляции при большом количестве мероприятий и уменьшить трудоёмкость оптимизации.
5. Использование модели для оценки опасности ОПО и оптимизации выбора мероприятий по совершенствованию безопасности ОПО. Первая задача выбора: при ограниченных финансовых затратах найти мероприятия, обеспечивающие максимальное снижение вероятности происшествия. Вторая: минимальными финансовыми затратами обеспечить уровень безопасности не меньше заданного.

Объект анализа и задачи данной практической работы

Целью данного сравнительного анализа является оценка предложенных к рассмотрению альтернативных мероприятий с точки зрения их влияния на уменьшение возможности возникновения аварийной ситуации на складе жидкого аммиака с изотермическим хранилищем.

Основные задачи настоящего сравнительного анализа следующие:

1. Оценка возможности возникновения аварийной ситуации на складе жидкого аммиака с изотермическим хранилищем до проведения реконструкционных мероприятий.
2. Оценка возможности возникновения аварийной ситуации на складе жидкого аммиака после возможного внедрения реконструкционных мероприятий, разработанных головной организацией.
3. Оценка возможности возникновения аварийной ситуации после фактически выполненных реконструкционных мероприятий на складе жидкого аммиака.
4. Сравнение предложенных к рассмотрению альтернатив проведения реконструкции с точки зрения их влияния на уменьшение возможности возникновения аварийной ситуации.
5. Предложение рекомендаций, направленных на снижение возможности возникновения аварийной ситуации.

Выполнение работы

На данном этапе работа экспертов считается уже выполненной – имеется подготовленная базовая модель для класса объектов – “изотермические хранилища” (уровень качества: НОРМАЛЬНЫЙ).

Ознакомление с базовой моделью и переход к исследуемому ОПО

Индексы опасности (вектор \bar{I}) установлены на основе среднестатистических данных по аварийности и травматизму при выполнении сливо-наливных операций. Средние значения лингвистических оценок (V) факторов опасности установлены для уровня качества НОРМАЛЬНЫЙ.

Многие факторы опасности определены только на части лингвистической шкалы оценок, поэтому для них указана область определения. Модель откалибрована на следующие статистические вероятности: P (Нарушение равновесия) = **0.0006**; P (Опасная ситуация) = **0.0001**; P (Критическая ситуация) = **0.000007**; P (Происшествие) = **0.000001**.

Приступим к исполнению действий характерных для инженеров по технике безопасности при использовании **tHAZARD**.

Таблица 1.

Базовая и адаптированная модели

<i>Компонент</i>	<i>Код</i>	<i>Фактор опасности</i>	<i>Индексы опасности</i> \bar{I}	<i>Лингвистическая оценка V (базовая / адаптированная)</i>	<i>Область определения</i>
<i>Рабочая среда</i>	C01	Комфортность по физ.-хим. параметрам рабочей среды	0v1	Выше среднего	*
				Средняя	
	C02	Качество информационной модели состояния среды	0v2	Хорошее	Низкое - Высокое
				Выше среднего	
	C03	Возможность внешних опасных воздействий	2v0	Ниже среднего	Очень низкая – Очень большая
				Ниже среднего	
	C04	Возможность внешних неблагоприятных воздействий	1v0	Ниже среднего	*
				Ниже среднего	
<i>Персонал</i>	H01	Пригодность по физиологическим показателям	0v1	Хорошая	Ниже среднего – Высокая
				Хорошая	

	H02	Технологическая дисциплинированность	0v2	Хорошая	Средняя – Высокая
				Очень хорошая	
	H03	Качество приёма и декодирования информации	0v1v2v3	Хорошее	Низкое – Высокое
				Очень хорошее	
	H04	Навыки выполнения работы	0v1	Очень хорошие	Ниже среднего – Очень, очень высокие
				Очень высокие	
	H05	Качество мотивационной установки	0v1	Среднее	Низкое – Высокое
				Выше среднего	
	H06	Знание технологии работ	0v1	Хорошее	Среднее – Высокое
Очень хорошо					
H07	Знание физической сущности процессов в системе	0v1	Среднее	Низкое – Хорошее	
			Среднее		
H08	Способность правильно оценивать информацию	0v1	Хорошая	Средняя – Очень хорошая	
			Хорошая		
H09	Качество принятия решения	0v1v2	Хорошее	Среднее – Очень	
			Хорошее		

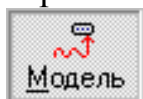
					хорошее
	Н12	Самообладание в экстремальных ситуациях	1v2	Низкое	*
				Очень низкое	
	Н13	Обученность действиям в сложных условиях обстановки	0v1	Хорошая	Средняя - Высокая
				Выше среднего	
	Н14	Точность корректирующих действий	0v1v2	Хорошая	*
				Очень хорошая	
<i>Машина- оборудование</i>	M01	Качество конструкции рабочего места оператора	0v1	Выше среднего	Низкое – Высокое
				Хорошее	
	M02	Степень учета особенностей работоспособности человека	0v2	Выше среднего	*
				Выше среднего	
	M03	Оснащенность источниками опасных и вредных факторов	2v0	Выше среднего	Средняя – Очень высокая
Выше среднего					
M04	Безотказность прочих элементов	0v1	Хорошая	Ниже среднего – Очень высокая	
			Очень хорошая		
M05	Безотказность других	0v2	Очень хорошая	Средняя –	

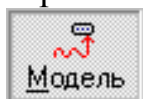
		ответственных элементов		Большая	Очень высокая
	M06	Длительность действия опасных и вредных факторов	1v0	Среднее	*
				Среднее	
	M07	Уровень потенциала опасных и вредных факторов	1v0	Большой	*
				Большой	
	M08	Безотказность приборов и устройств безопасности	0v1	Высокая	Средняя – Очень высокая
				Высокая	
<i>Технология</i>	T01	Удобство подготовки и выполнения работ	0v1	Среднее	Ниже среднего – Очень высокое
				Выше среднего	
	T02	Удобство технического обслуживания и ремонта	0v2	Выше среднего	Ниже среднего – Очень высокое
				Выше среднего	
	T03	Сложность алгоритмов оператора	1v0	Средняя	Ниже среднего – Высокая
				Выше среднего	
	T04	Возможность появления	1v0	Низкая	*

		человека в опасной зоне		Ниже среднего	
	T05	Возможность появления др. незащищенных элементов в опасной зоне	1v0	Низкая	*
				Очень низкая	
	T06	Надежность технологических средств обеспечения безопасности	0v1	Высокая	Средняя – Очень высокая
				Высокая	

Порядок выполнения работы:

Шаг 1, 2. Подходящая модель для класса ОПО “изотермические хранилища” уже выбрана, а необходимые настройки и установка компонент выполнены. Осталось только её открыть. Для этого запустите на выполнение файл “Hazard.exe”. После того как появится главное окно приложения через меню “**Файл.Загрузить**”, откройте модель “Isothermal Storehouse.hzd”. **tHAZARD** имеет однодокументный интерфейс. После загрузки появятся два окна: монитор модели и монитор комплексов мероприятий. Первый служит для редактирования, калибровки и прогона модели; второй – для редактирования, ранжировки и оптимизации мероприятий улучшения безопасности. В панели



инструментов нажмите кнопку . В таблице 1 находятся параметры открытой модели. Чтобы их увидеть переключитесь в редактор модели. Каждый из двух мониторов содержит 3 вложенных страницы, являющихся мониторами и редакторами различного назначения. Переключение между ними производится с помощью закладок, расположенных слева (вертикально). Выбрав закладку “**Модель**” вы попадёте в редактор модели.

Параметры факторов опасности, указанные в таблице 1, доступны для просмотра и редактирования. Каждому фактору в редакторе соответствует один слот, изображённый на рис. 2. Как и в таблице 1 слоты факторов разделены на 4 группы, соответствующие компонентам: человек, машина, рабочая среда, технология. Графа “**Лингвистическая оценка**” таблицы 1 имеет два значения на каждый фактор. Сейчас загружена базовая модель и оценки соответствуют тем, которые в ячейках находятся сверху. Осталось только убедиться в правильности калибровки модели. Для этого переключитесь в “**Монитор калибровки модели**” с помощью соответствующей закладки (вертикально слева). В группе “**Параметры калибровки**” Вы увидите 4 строки ввода, где указаны искомые вероятности состояний: 0.0006; 0.0001; 0.000007; 0.000001. Вызвав через меню “**Файл.Модуль вычисления оценок ФО**” менеджер конфигураций модулей оценки, можно убедиться, что модели назначен правильный модуль оценки (“Универсальный модуль...”) с нужной конфигурацией (“Хранилище аммиака”).

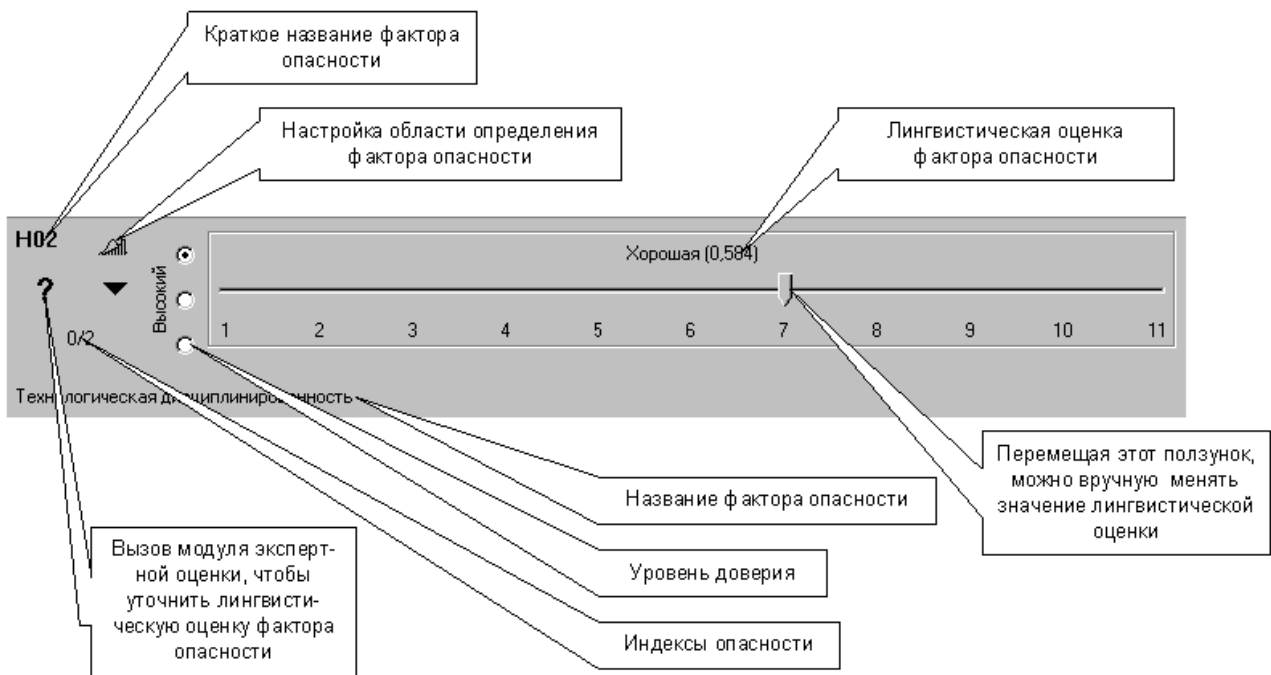
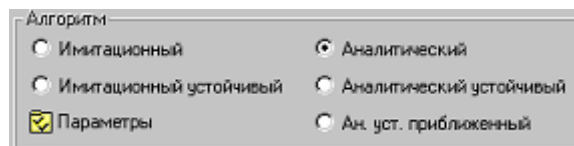


Рис. 2. Слот редактора модели развития происшествия на ОПО

Шаг 3. Теперь нужно адаптировать базовую модель под исследуемый в данной работе ОПО – изотермическое хранилище жидкого аммиака фирмы ХХХ (10000т, на подобном хранилище произошла крупная авария в г. Ионава). Для этого понадобится уточнить лингвистические оценки факторов опасности. Сохраните модель в новом файле, используя меню **“Файл.Сохранить в новом файле”**. Все факторы опасности устанавливаются вручную, по заготовленным значениям из таблицы 1. Выполните это с помощью ползунка (см. рис. 2) слотов редактора модели, используя значения, указанные в нижних ячейках (выделены жирным шрифтом) графы **“Лингвистическая оценка V”** таблицы 1. Сохраните модель через меню **“Файл.Сохранить”**.

Шаг 4. Оценим вероятность происшествия до внедрения каких-либо мероприятий. Для этого переключимся в монитор модели и выберем вертикальной закладкой **“Редактор модели”**. В группе **“Алгоритм”** (внизу окна) установите радиокнопку **“Аналитический”**:



Данный алгоритм не учитывает уровни доверия оценок факторов опасности, но хорошо подходит для нашей задачи благодаря своей скорости и точности. Далее переключитесь на закладку **“Прогон”**, чтобы попасть в монитор модели (рис. 7.). Нажмите кнопку **“Запуск моделирования”**.

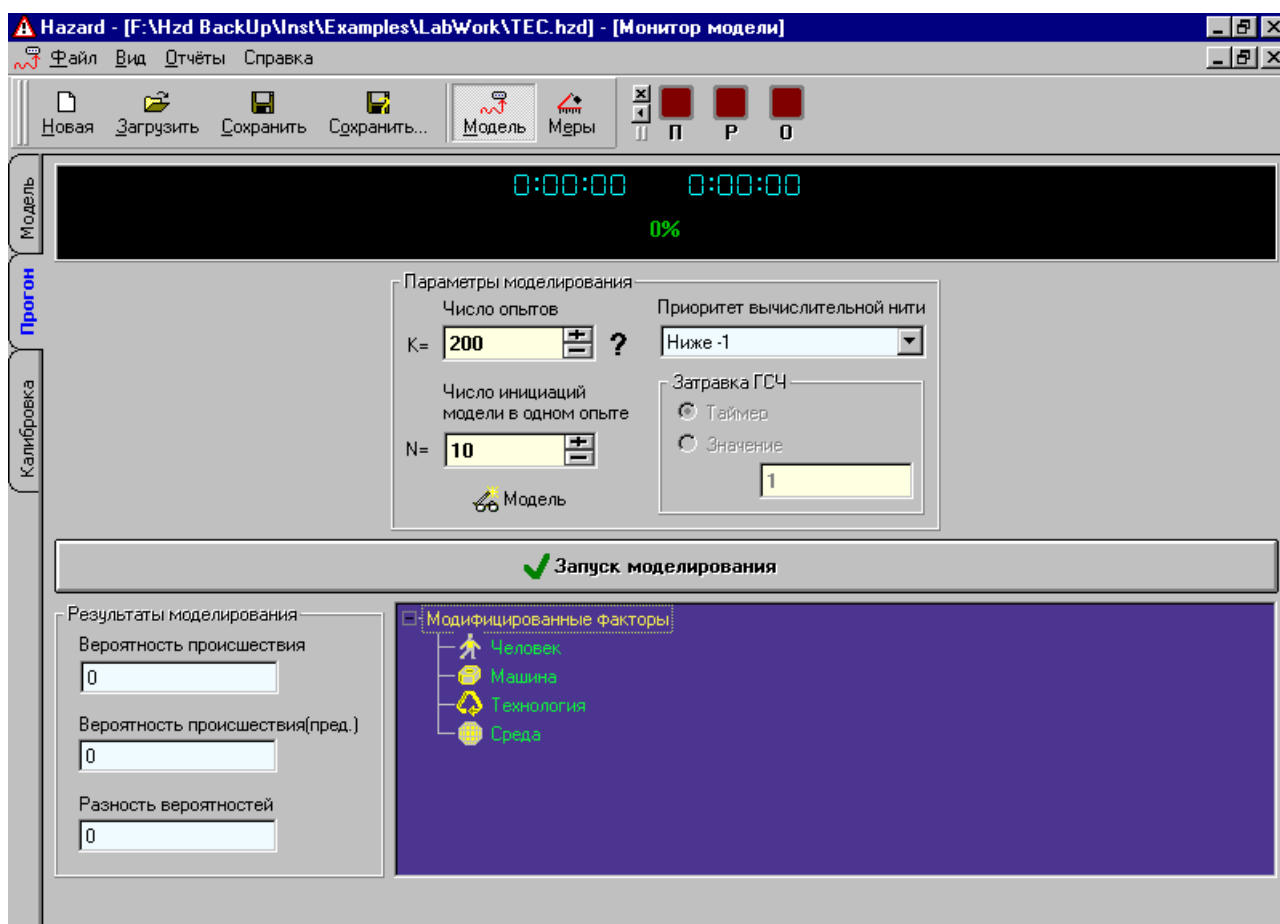




Рис. 7. Монитор модели

Результат появится в строке ввода **“Вероятность происшествия”**. Подробный отчёт можно увидеть, открыв генератор отчётов клавишей **F7** (на странице **“Модель”**).

Состояние			Индекс опасности			
Состояние	Частота	Среднее кв. отклонение	Min	Max	Матем. ожидание	Ср. кв. отклонение
Гомеостазис	0,999677722424882	-	0	60,0	15,7925	10,0392
Нарушение ==	0,000322277575118	-	63,0	84,0	67,3626	3,7438
Адаптация D	0,000224721726602	-	0	280,0	162,4339	80,6611
Оп. ситуация	0,000097555848516	-	288,0	1008,0	383,1893	81,0026
Адаптация F	0,000090145661479	-	0	1701,0	515,1598	534,7509
Кр. ситуация	0,000007410187038	-	1728,0	8064,0	2109,6872	421,7747
Адаптация H	0,000006432160469	-	0	3528,0	1120,349	1143,8977
Происшествие	0,000000978026569	-	3564,0	24192,0	4631,1369	1091,221

Обратите внимание на кнопки   внизу окна отчётов. Через них доступны контекстные меню генератора отчётов (Рис. 8), которые также доступны при щелчке правой кнопкой мыши на пустом пространстве окна отчётов. Для удобства просмотра рекомендуется через эти меню распахнуть окно отчётов и

установить масштаб 100%. Далее пользуйтесь клавишей **F7**, чтобы включать и выключать это окно.

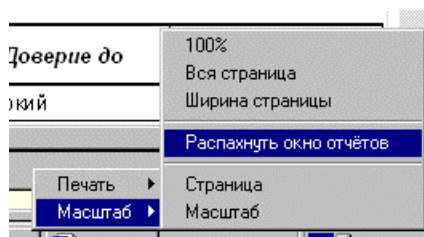


Рис. 8.

Также обратите внимание, что ΔQ (изменение вероятности) отображается с **обратным знаком**.

Просчитанную модель можно далее использовать в качестве “базовой”.

Контрольные вопросы:

1. В чем суть имитационного моделирования, реализованного в экспертном программном комплексе Hazard?
2. Какие задачи решаются с помощью этого комплекса?
3. Каким образом метод Монте-Карло реализуется в комплексе Hazard?
4. Какие группы факторов опасности реализованы в данной модели?
5. Что означает термин «лингвистическая оценка»?
6. Как определяется вероятность возникновения происшествия на промышленном объекте?

Практическая работа № 6

Разработка и оптимизация мер, направленных на снижение техногенного риска эксплуатации ОПО с использованием экспертного программного комплекса tHAZARD

Цель работы: научиться использовать программный комплекс *Hazard* для разработки и оптимизации комплекса мер, способного снизить уровень вероятности возникновения происшествий на опасном производственном объекте.

Теоретические положения

Решение задачи обоснования оптимальных мероприятий по повышению безопасности функционирования человекомашиной системы успешно достигается с помощью экспертного программного комплекса *Hazard*.

Исходя из практического опыта выделяются две возможные цели оптимизации:

А. При фиксированных ресурсах выбрать такой набор мер безопасности, чтобы снижение величины вероятности возникновения происшествий на опасном производственном объекте было максимальным.


В. Выбрать такой комплекс мер безопасности, чтобы уменьшить величину вероятности возникновения происшествий до допустимого уровня при минимальных затратах.


Для решения вышеприведенных оптимизационных задач при их высокой вычислительной емкости в экспертной системе используются алгоритмы динамического программирования.


С помощью базы данных экспертной системы можно скорректировать функциональную зависимость $Q = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, что позволит настраивать и применять имитационную модель для различных типов опасных промышленных объектов (емкости с опасными веществами, баллоны под давлением, грузоподъемные машины и т.д.) на различных этапах их жизненного цикла.

Порядок выполнения работы

Шаг 1. Формализация описания комплексов мер безопасности, которые необходимо оценить.

Добавим предполагаемые мероприятия к модели, для чего переключимся в монитор комплексов мер. С помощью вертикальных (слева) закладок переключитесь в редактор комплексов мер. В сетке **“Комплексы мер”** (слева) Вы увидите список доступных комплексов. Изначально там будет только стандартный комплекс. В сетке **“Меры”** (справа) отображается содержимое текущего выбранного (помеченного чёрным треугольником  **Стар**) комплекса мер, представляющее собой список названий мероприятий. Содержание же выбранного мероприятия отображается в нижнем окне редактора и включает:

стоимость внедрения, список несовместимостей, список воздействий на модель. Список можно редактировать, вызвав редактор мероприятия одним из двух способов: кнопкой ; двойным щелчком левой клавиши мыши на нижнем окне редактора (там, где показано содержание мероприятия).

Создайте новый комплекс мер, дав ему какое-нибудь имя, например “Тест 1”. Для этого щёлкните левой клавишей мыши, указав на последнюю строку () сетки “**Комплексы мер**”. Введите название “Тест 1” и нажмите клавишу “**Enter**” либо перейдите на другую строку сетки (добавление комплекса произойдёт в обоих случаях).


Далее опишем действия, которые надо выполнить для каждого мероприятия из таблицы 3, чтобы добавить его в комплекс “Тест 1”. Убедитесь, что комплекс “Тест 1” – текущий ( - помечен треугольником). Теперь, в сетке “**Меры**” (справа) добавьте ранее описанным способом (через последнюю строку) краткое название мероприятия (в графе “Возможное организационно-техническое мероприятие” таблицы 3 выделено жирным шрифтом и скобками). Удобно выполнить последовательное добавление названий всех 5-ти мероприятий сразу. Теперь, поочерёдно делая мероприятия текущими, введите их содержание в соответствие с таблицей 3.

Таблица 3.

Предполагаемые мероприятия по совершенствованию безопасности

№	Возможное организационно-техническое мероприятие	Стоимость внедрения (руб.)	Воздействие на модель		
			Фактор опасности	Лингвистическая оценка	Уровень доверия
1	Провести дополнительные занятия с обслуживающим персоналом об основных физических законах, применимых к управляемому процессу, о потенциальных опасностях оборудования, о погрешностях и отказах КИП, об отказах оборудования; включить данные вопросы в перечень периодических проверок персонала и уделять им пристальное внимание. (Инструктаж)	1000	H07	+1	Высокий
			H08	+1	Высокий
2	Организовать периодический психологический тренинг персонала по пребыванию в нестандартных и экстремальных ситуациях, инструктажи и тренировки по нестандартным ситуациям. (Психологический тренинг)	2700	H12	+1	Высокий
			H13	+1	Высокий
3	Защитить корпус системного блока управляющего компьютера SCAN XXXX от	1900	M02	+1	Высокий

	несанкционированного или случайного выключения, надежно укрепить его в стеллаже; защитить кабели сигнала и питания, находящиеся в зоне случайного влияния человека. (Модернизация средств защиты)		T05	-1	Высокий
4	<p>Предусмотреть автоматическое срабатывание запорной арматуры по уровню жидкого аммиака.</p> <p>Организовать периодические тренировки по отработке слаженности действий с операторами соседнего цеха при полной аварийной остановке технологического процесса. (Модернизация системы контроля)</p>	5677	M06	+1	Высокий
5	Рассмотреть возможность увеличения частоты обновления видеотерминала системы SCAN XXXX до 85 Гц.	2100	T03	-1	Высокий
	Предусмотреть местное освещение пульта системы SCAN XXXX. (Улучшение эргономики)		C01	+1	Высокий

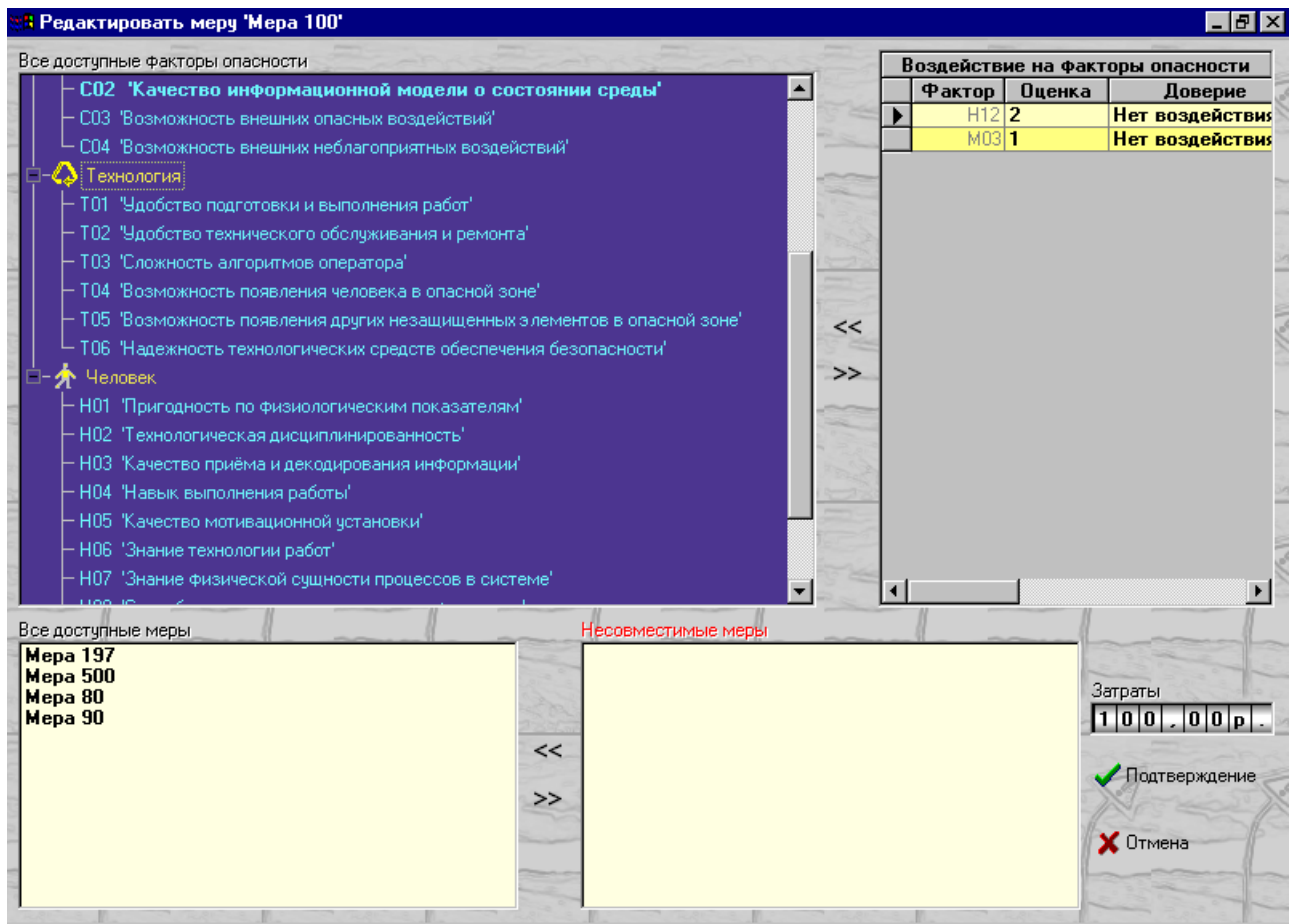
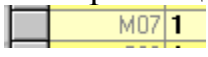
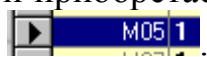


Рис. 4. Редактор мероприятий улучшения безопасности


Воздействия мероприятия на модель показаны в правой верхней сетке (изначально она пуста). Чтобы добавить воздействия на факторы опасности, выделите нужные факторы левой кнопкой мыши в списке всех доступных факторов (левое верхнее окно) и перетащите на сетку (**drag and drop**). Слоты автоматически появятся в сетке. При повторном щелчке мыши на уже выделенном факторе опасности – выделение исчезнет, поэтому на факторе, который выделяется последним, необходимо не отпуская клавишу мыши сразу выполнять перетаскивание. Вместо перетаскивания можно нажать кнопку: **>>**. Удаление факторов из сетки “**Воздействия на факторы опасности**” выполняется аналогично. Перед удалением следует выделять одну или несколько строк щёлкая левой клавишей мыши на метке, находящейся слева: . Курсор мыши над меткой приобретает вид стрелки, а строка после щелчка становится синей: . Для выделения сразу нескольких строк необходимо удерживать нажатой клавишу “**Control**”.

Далее, выберите из выпадающего списка (Рис. 5) воздействия на лингвистическую оценку и на уровень доверия. Мероприятия совершенствования безопасности улучшают оценки факторов, поэтому для стабилизирующих факторов берутся положительные изменения оценки, а для деструктивных – отрицательные. Если у мероприятия имеются

несовместимые мероприятия, то необходимо их добавить в список несовместимости с помощью процедуры “drag and drop”. Когда вся информация будет внесена Вами, закройте редактор кнопкой “Подтверждение”. Сохраните модель.

Воздействие на факторы опасности		
Фактор	Оценка	Доверие
CO1	1	Высокий
M05	1	Нет воздействия
M07	-5	Нет воздействия
CO3	-4	Нет воздействия
	-3	
	-2	
	-1	
	0	
	1	
	2	
	3	
	4	

Рис. 5.

Шаг 2. Оценим вероятность происшествия до внедрения каких-либо мероприятий. Для этого переключимся в монитор модели кнопкой  и выберем вертикальной закладкой “Редактор модели”. В группе “Алгоритм” (внизу окна: Рис. 6) установите радиокнопку “Аналитический”.

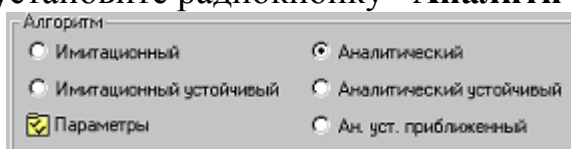



Рис. 6.

Данный алгоритм не учитывает уровни доверия оценок факторов опасности, но хорошо подходит для нашей задачи благодаря своей скорости и точности. Далее переключитесь на закладку “Прогон”, чтобы попасть в монитор модели: рис. 7. Нажмите кнопку “Запуск моделирования”.

Результат появится в строке ввода “Вероятность происшествия”. Подробный отчёт можно увидеть, открыв генератор отчётов клавишей F7 (на странице “Модель”). Рис.9а

Обратите внимание на кнопки  внизу окна отчётов. Через них доступны контекстные меню генератора отчётов (Рис. 8), которые также доступны при щелчке правой кнопкой мыши на пустом пространстве окна отчётов. Для удобства просмотра рекомендуется через эти меню распахнуть окно отчётов и установить масштаб 100%. Далее пользуйтесь клавишей F7, чтобы включать и выключать это окно.

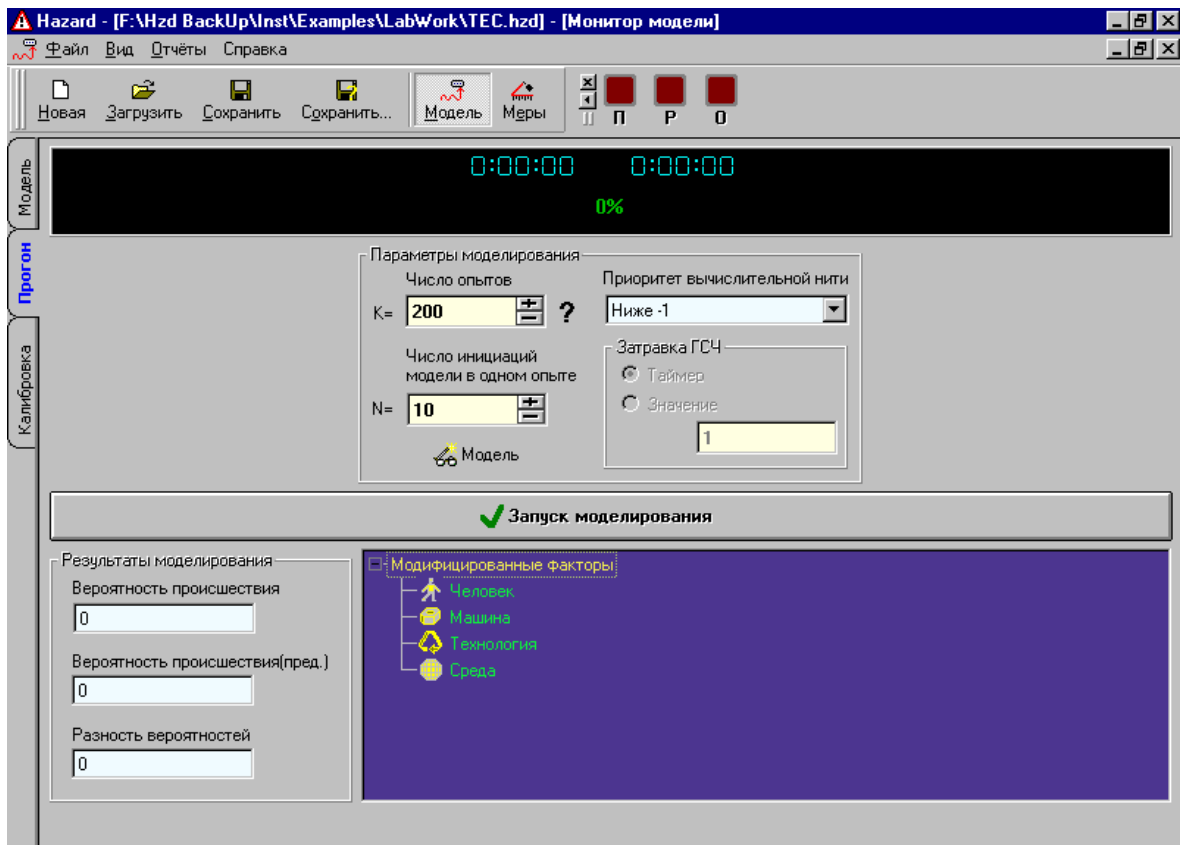


Рис. 7. Монитор модели

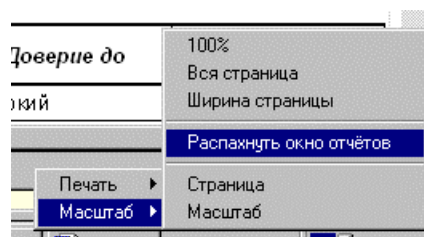




Рис. 8.

Также обратите внимание, что ΔQ (изменение вероятности) отображается с **обратным знаком**.

Просчитанную модель мы будем далее использовать в качестве “базовой”.

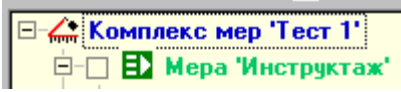
Обратите внимание на кнопку  в мониторах комплексов мер и оптимизации. С помощью неё выполняется копирование просчитанной базовой модели из монитора модели. При этом копируются и настройки алгоритмов, установленные в мониторе модели и редакторе модели.

Шаг 5.2. Оценим эффективность мероприятий 1, 2, 3 (табл.3). Это набор, предлагаемый для исследуемого объекта головной проектной организацией. Для этого переключитесь в “**Редактор комплексов мер**” и убедитесь, что комплекс “**Тест 1**” является текущим. Переключитесь в “**Монитор**

комплексов мер” нажмите , затем нажмите кнопку

“Выполнить” (помечена зелёной галочкой). После завершения ранжировки мероприятий по эффективности сохраните модель.

В правом нижнем углу монитора комплексов мер будет окно, содержащее список мероприятий. Сверните находящееся там дерево щёлкнув мышью

(левой кнопкой) в левом верхнем углу  (на знаке ‘-’ в квадратике). Разверните дерево повторным щелчком мыши и выделите мероприятия 1, 2, 3 в соответствии с таблицей 3 (Рис. 9).

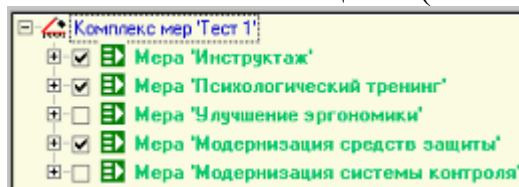


Рис. 9.

Состояние			Индекс опасности			
Состояние	Частота	Среднее кв. отклонение	Min	Max	Матем. ожидание	Ср. кв. отклонение
Гомеостазис	0,999677722424882	-	0	60,0	15,7925	10,0392
Нарушение ==	0,000322277575118	-	63,0	84,0	67,3626	3,7438
Адаптация D	0,000224721726602	-	0	280,0	162,4339	80,6611
Оп. ситуация	0,000097555848516	-	288,0	1008,0	383,1893	81,0026
Адаптация F	0,000090145661479	-	0	1701,0	515,1598	534,7509
Кр. ситуация	0,000007410187038	-	1728,0	8064,0	2109,6872	421,7747
Адаптация H	0,000006432160469	-	0	3528,0	1120,349	1143,8977
Происшествие	0,000000978026569	-	3564,0	24192,0	4631,1369	1091,221

Рис.9а Подробный отчет, появляющийся при нажатии клавиши F7

Нажмите кнопку “Оценить эффективность”. После завершения оценки откройте окно отчётов (клавиша F7) и перейдите на закладку “Комплекс мер”.

Мера	Затраты	Дельта Q	Выгода	Кэ
Инструктаж	1 000,00р.	0,000000480924066	4,81р.	0,0048
Психологический тренинг	2 700,00р.	0,000000288842426	2,89р.	0,0011
Модернизация средств защиты	1 900,00р.	0,00000021451753	2,15р.	0,0011
Суммарные значения	5 600,00р.	0,000000984284022	9,84р.	-
Реальные значения (прогон)	-//-	0,000000732782527	7,33р.	0,0013

Рис. 10. Эффективность набора 1, 2, 3

Теперь отметьте по аналогии с Рис. 9 мероприятия 4 и 5. Нажмите кнопку “Оценить эффективность” и сравните результат.

Мера	Затраты	Дельта Q	Выгода	Кэ
Улучшение эргономики	2 100,00р.	0,000000277103392	2,77р.	0,0013
Модернизация системы контроля	5 677,00р.	-0,00000011287934	-1,13р.	-0,0002
Суммарные значения	7 777,00р.	0,000000164224051	1,64р.	-
Реальные значения (прогон)	-//-	0,000000196262136	1,96р.	0,0003

Рис. 11. Эффективность набора 4, 5

При нажатии кнопки “Оценить эффективность” выполняется пробное применение выбранных мероприятий – исходная модель (находящаяся в мониторе модели) не меняется. Это позволяет вручную получать отчёты и сравнивать эффективность.

Шаг 3. Перейдем к задаче оптимального выбора мероприятий и выдаче рекомендации по совершенствованию безопасности. **tHAZARD** позволяет решать две оптимизационные задачи.

Задача 1. При фиксированных финансовых средствах $S_{дон}$ на внедрение мер по улучшению безопасности ОПО, выбрать такой набор совместимых мер MS_i , который максимально снижает величину вероятности происшествия Q_9 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta Q_9(MS_i) \rightarrow \max \\ |MS_i| \\ \sum_{j=1} S_j \leq S_{\text{дн}} \end{array} \right\}$$

Задача 2. При минимальных затратах внедрения, выбрать такой набор совместимых мер MS_i , который снижает вероятность происшествия $Q_9^{\text{нн}}$ до заданного уровня - $Q_9^{\text{дн}}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_9^{\text{нн}} + \Delta Q_9(MS_i) \leq Q_9^{\text{дн}} \\ |MS_i| \\ \sum_{j=1} S_j \rightarrow \min \end{array} \right\}$$

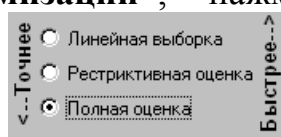
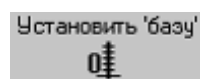
где $\Delta Q_9^i = Q_9^{MS_i} - Q_9^{\text{нн}}$ - снижение вероятности происшествия при внедрении на ОПО i -го набора мероприятий по улучшению безопасности;

S_j - затраты на внедрение j -го мероприятия;

$Q_9^{\text{нн}}, Q_9^{MS_i}$ - соответственно вероятности происшествия до (исходная) и после внедрения i -го набора мер: $Q_9^{MS_i} = f(V_1 + \Delta V_{1i}, V_2 + \Delta V_{2i}, \dots, V_k + \Delta V_{ki})$, где ΔV_{ki} - улучшение оценки k -го фактора опасности при возможном внедрения i -го набора мер (суммарное воздействие мер на данный фактор).

Сначала решим первую задачу.

Переключитесь в “Монитор оптимизации”, нажмите



установите метод полной оценки, в поле ввода “Имеющиеся финансовые средства” введите, например, 3500 и нажмите кнопку “Выполнить”. Появится диалог с запросом на подтверждение

оптимизации – нажмите “Yes”. Прервать запущенную оптимизацию (и прогон модели) можно щёлкнув левой клавишей мыши на индикаторе



(для оптимизации - “О”; для прогона – “П”). После окончания оптимизации в правом окне появится результат – множество возможных выборок мероприятий, отсортированное по выбранному критерию:



Сортировке по абсолютной эффективности соответствует положение **dQ**. Число возвращаемых вариантов не превышает указанное в поле ввода “**Возвращать не более**”. Уже сейчас Вы видите самый существенный результат оптимизации – какие наборы мероприятий самые эффективные для исследуемого объекта.

5.1 Выборка 1

Затраты	ΔQ	Выгода	K_3
3 100,00 р	0,000000623693412	6,24 р	0,002

Меры: инструктаж, улучшение эргономики

При ограниченных финансовых средствах (3500 р.) следует рекомендовать два мероприятия: “**Инструктаж**” и “**Улучшение эргономики**”. Чтобы уточнить абсолютные значения выгоды и коэффициента эффективности, необходимо ввести правильное значение в поле ввода “**Величина среднего ущерба от происшествия**” в мониторе комплексов мер и повторить оптимизацию. Эта величина является правым сомножителем (в квадратных скобках) соотношения (2).

При рассмотрении возможных наборов мероприятий следует обращать внимание не только на самый эффективный вариант, но и на несколько последующих, согласно отношению упорядочивания по эффективности, так как Hazard – это лишь один из многих инструментов оценки. Без сомнения на практике, эффективность наборов может отличаться от оценки Hazard по причине влияния факторов, которые мы не учитываем при моделировании (в модели только 31 фактор) или учитываем недостаточно точно. Поэтому окончательное принятие решения все-таки за человеком. Предложите собственные мероприятия совершенствования безопасности и оцените их эффективность с помощью **tHAZARD**.

Контрольные вопросы:

1. Назовите ограничения для оптимизации мер безопасности
2. По каким параметрам можно выполнить оптимизацию мер безопасности?
3. Опишите на конкретных примерах, как меры безопасности могут повлиять на вероятность возникновения происшествий.