

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОИСШЕСТВИЙ В ЧЕЛОВЕКОМАШИННЫХ СИСТЕМАХ.

Основным методом исследования безопасности опасных производственных объектов (ОПО) является моделирование возникновения и развития аварийных процессов на них. Выбор такого метода исследования обуславливается объективной редкостью событий-аварий и невозможностью проведения натуральных экспериментов по экономическим и гуманистическим соображениям.

Возможные подходы к моделированию сложных систем можно разделить на два класса: 1) построение иерархических моделей, состоящих из множества микроуровневых, и 2) построение приближённых макроуровневых моделей [1].

В иерархических моделях сложность исследуемой системы преодолевается декомпозицией ее на более простые подсистемы вплоть до требуемого уровня вложенности. При этом должны быть учтены основные связи между микроуровневыми моделями подсистем, что позволяет создавать достаточно полные и точные модели сложных системы в целом. Однако при этом существенно увеличивается трудоемкость моделирования, возрастает число ошибок при реализации связей между отдельными объектами, время на модификацию модели. Поэтому для систем, сложность которых превосходит некоторый порог, точность и практическая ценность информации результатов моделирования становятся исключаящими друг друга характеристикам [2].

В отличие от универсальных иерархических моделей приближенные макроуровневые имеют более узкую применимость, ограниченную рамками предметной области, и предназначены для оценки лишь интересующих параметров при заданных ограничениях. В соответствии с целью настоящего

исследования – оценка риска аварии и оптимизация мер безопасности на ОПО – целесообразно рассмотреть макроуровневую имитационную модель процесса возникновения аварии в системе «Персонал-Оборудование-рабочая Среда» (ПОРС) – см рис. 1. Эта имитационная модель, опираясь на энергоэнтропийную концепцию природы аварийности и травматизма [3] и известный принцип неопределенности сложных систем Л.Заде [2], реализует своего рода компромисс между точностью получаемых количественных оценок и неопределенностью исходных данных.

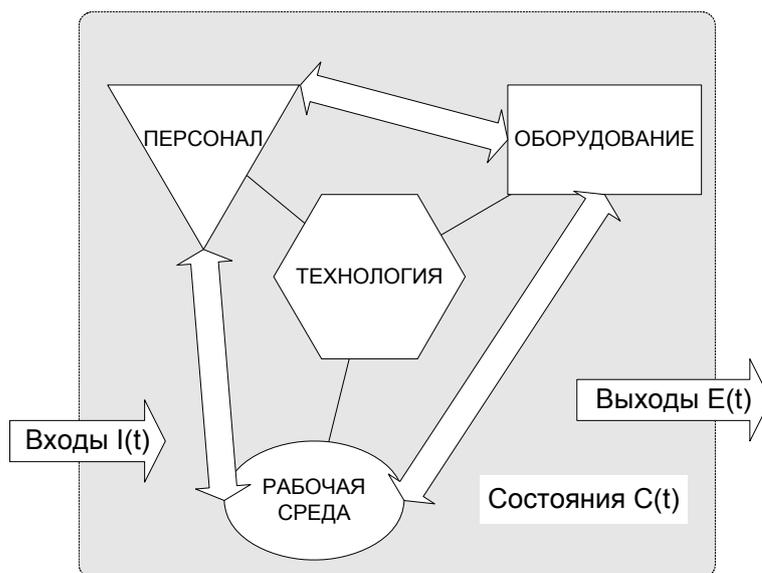


Рис. 1. Модель ОПО – человекомашинная система ПОРС.

Анализ статистических данных об аварийности и травматизме (см., напр., [3]) показывает, что основными причинами происшествий являются: 1) ошибки персонала, 2) отказы оборудования и 3) нерасчетные внешние воздействия со стороны рабочей и внешней среды. Кроме того, наблюдается устойчивость распределения вкладов этих причин в аварийность и травматизм при рассмотрении большинства типов ОПО (см. данные Госгортехнадзора России за 2001 г [4] и ранее). По данным [3] общие причины аварийности и травматизма распределяются, как показано ниже на рис. 2:

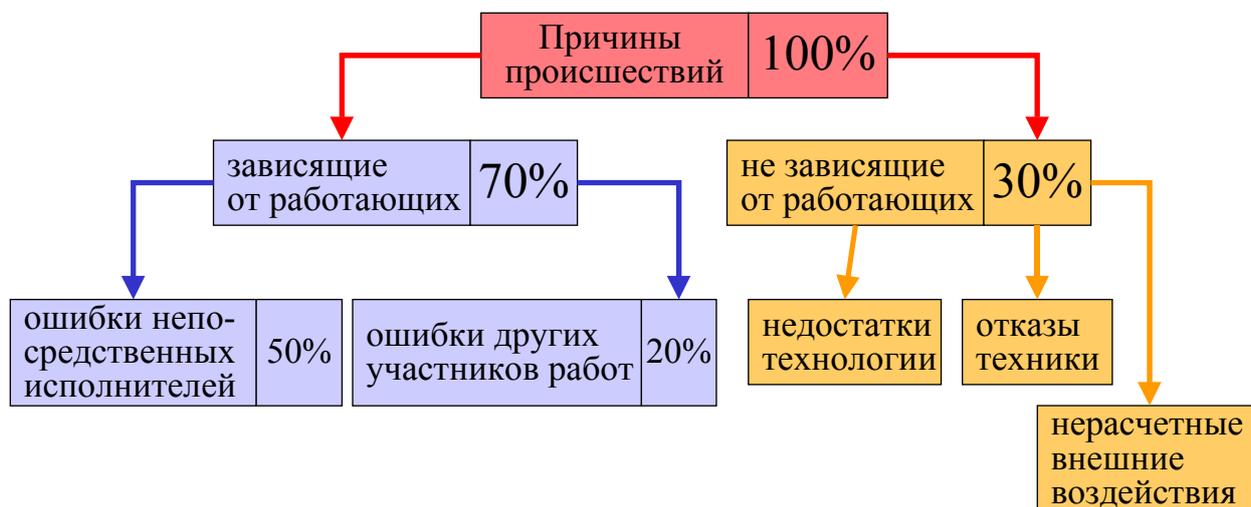


Рис. 2. Основные причины аварийности и травматизма

Из практического опыта также известно, что к аварии обычно приводит не единичная причина, а выстраивающаяся причинная цепь предпосылок. Кроме того, практически все современные технологические процессы проводятся не без участия оператора, а доля ошибок персонала в общих причинах аварийности и травматизма в среднем в промышленности достигает 60-70 %. Поэтому при имитационном моделировании учитывается влияние всех существенных свойств человеко-машинных систем (психофизиологических свойств Человека-оператора, факторов надежности Машины-оборудования, комфортности Рабочей Среды и уровня используемой Технологии) на качество выполнения человеком основных этапов операторской деятельности [3,5]:

- 1) восприятие и дешифровка информации о ходе выполнения операции;
- 2) структурирование и стратификацию полученных данных;
- 3) обнаружение отклонений процесса от требований технологии;
- 4) оценка необходимости и способов вмешательства в него человека;
- 5) сравнение альтернативных действий и выбор из них конкурентоспособных;
- 6) определение степени их приемлемости и эффективности;
- 7) принятие и реализация решения на корректировку операции при необходимости.

В качестве иллюстративного примера для рассматриваемой имитационной модели выбрано типичное распределение причин аварийности и травматизма для технологий хранения опасных и вредных веществ со сливно-наливными операциями (табл.1).

Таблица 1

Состав и характеристики учитываемых факторов опасности.

Компонент	Код	Наименование фактора опасности	Доля в общих причинах аварийности и травматизма	«Возмущения» в ИМ, I_j	
Рабочая среда	C01	Комфортность рабочей среды по физико-химическим параметрам	0,028	0 1	
	C02	Качество информационной модели состояния среды	0,048	0 2	
	C03	Возможность внешних опасных воздействий	0,045	2 0	
	C04	Возможность внешних неблагоприятных воздействий	0,025	1 0	
Персонал	H01	Пригодность по физиологическим показателям	0,02	0 1	
	H02	Технологическая дисциплинированность	0,04	0 2	
	H03	Качество приема и декодирования информации	0,062	0 1 2 3	
	H04	Навыки выполнения работ	0,04	0 1	
	H05	Качество мотивационной установки	0,04	0 1	
	H06	Знание технологии работ	0,033	0 1	
	H07	Знание физической сущности процессов в системе	0,04	0 1	
	H08	Способность правильно оценивать информацию	0,043	0 1	
	H09	Качество принятия решения	0,06	0 1 2	
	H12	Самообладание в экстремальных ситуациях	0,056	0 2	
	H13	Обученность действиям в нестандартных ситуациях	0,047	0 1	
	H14	Точность корректирующих действий	0,06	0 1 2	
	Оборудование	M01	Качество конструкции рабочего места оператора	0,045	0 2
		M02	Степень учета особенностей работоспособности человека	0,015	0 1
M03		Оснащенность источниками опасных и вредных факторов	0,02	1 0	
M04		Надежность вспомогательных узлов и элементов	0,03	0 1	
M05		Безотказность основных узлов и элементов	0,055	0 2	
M06		Длительность действия опасных и вредных факторов	0,007	1 0	
M07		Уровень потенциала опасных и вредных факторов	0,007	1 0	
M08		Безотказность приборов и устройств безопасности	0,026	0 1	
Технология	T01	Удобство подготовки и выполнения работ	0,02	0 1	
	T02	Удобство технического обслуживания и ремонта	0,038	0 2	
	T03	Сложность алгоритмов оператора	0,012	1 0	
	T04	Возможность появления человека в опасной зоне	0,008	1 0	
	T05	Возможность появления других незащищенных элементов в опасной зоне	0,01	1 0	
	T06	Надежность технологических средств обеспечения безопасности	0,02	0 1	

Особо подчеркнем, что рассматриваемая имитационная модель построена таким образом, чтобы всегда можно достаточно легко скорректировать и настроить ее в рамках экспертной системы **tHAZARD** для исследования других

типов ОПО, при наличии достоверной статистической информации о характере распределения общих причин аварийности и травматизма на них.

Топологической основой для имитационного моделирования выбрана логико-лингвистическая модель возникновения происшествия в человеко-машинной системе [3,5], которая представлена на рис. 3.

Компоненты человеко-машинной системы в соответствии с их изначальными свойствами взаимодействуют между собой и к оператору поступает информация об управляемом процессе.

Руководствуясь знанием технологии работ и имеющимся у него опытом, оператор обычно создает концептуальную модель выполняемой операции. Такая концептуальная модель облегчает выполнение работ и позволяет оператору после выполнения конкретных действий ожидать поступление соответствующей информации об управляемом процессе, и подготовиться затем к последующим действиям.

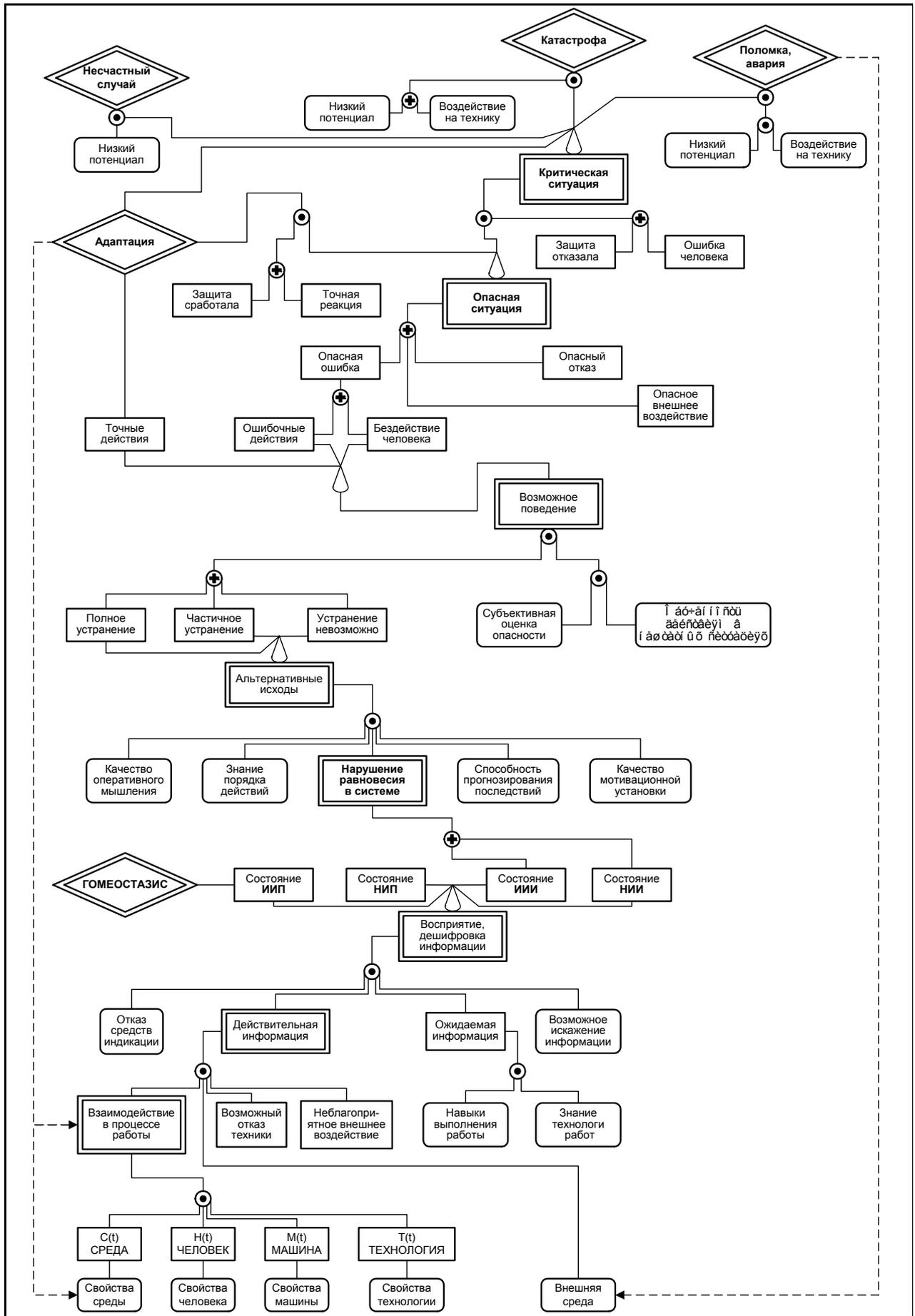


Рис. 3. Логико-лингвистическая модель процесса возникновения происшествия в человеко-машинной системе.

После приёма, преобразования и дешифровки оператором информации о действительном состоянии выполняемых работ и сравнения ее с ожидаемой, возможны следующие альтернативные исходы:

- 1) действительная информация идентична ожидаемой и правильно воспринята работающим (см. на рис. 3 - состояние ИИП);
- 2) действительная информация не идентична ожидаемой, но правильно (без искажений) воспринята и преобразована человеком - состояние модели НИП;
- 3) оба вида информации в действительности идентичны, однако реальная информация искажена работающим при ее приеме, преобразовании или декодировании (состояние ИИИ);
- 4) оба вида информации в действительности не идентичны, при этом информация о реальном состоянии выполняемой работы дополнительно искажена человеком в процессе ее восприятия и дешифровки - состояние НИИ.

В трех последних случаях уместно утверждать о появлении возмущений в рассматриваемой ПОРС-системе, приводящих к нарушению ее равновесия, тогда как в первом из них можно предполагать, что выполняемая операция закончится успешно, и в ПОРС-системе будет наблюдаться состояние динамического равновесия - *гомеостазиса*.

При *нарушении равновесия* в человеко-машинной ПОРС-системе принципиально возможны следующие альтернативные *исходы*: полное или частичное восстановление равновесия, а также невозможность своевременного устранения возмущения (см. на рис. 3 соответствующие события в центральной части модели - слева). После обнаружения человеком-оператором возникших возмущений, он может принять решение о вмешательстве в процесс - с целью его корректировки. В этом случае человек обычно руководствуется субъективно оцениваемой им мерой потенциальной опасности и собственными возможностями, определяемыми его психофизиологическими качествами - степенью внимания, оперативностью мышления, способностью точного прогноза, уровнем мотивации и знанием

порядка действий в подобных нестандартных ситуациях. С учетом этого он выбирает «оптимальную» для него альтернативу и осуществляет необходимые (наилучшие - в его представлении) действия, которые в действительности могут быть либо точными, либо ошибочными. Отказ от каких-либо действий в такой ситуации, например, вследствие временного замешательства или потери самообладания, рассматривается как отдельная альтернатива – *бездействие человека* (рис. 3).

Если принятое решение и действия работающего окажутся точными, то они могут привести человеко-машинную ПОрС-систему в состояние равновесия - за счет *адаптации* к возникшему возмущению. В других случаях может возникнуть *опасная ситуация*. Критичные отказы оборудования или опасные внешние воздействия со стороны рабочей или внешней среды также могут привести к возникновению опасной ситуации в человеко-машинной ПОрС-системе.

В свою очередь, опасная ситуация может перерасти в *критическую*, т.е. привести к взаимному совмещению незащищенных элементов системы и зоны действия поражающих факторов или завершиться *адаптацией*. Возможность адаптации к опасной ситуации будет зависеть от качества конкретных компонентов рассматриваемой ПОрС-системы и их взаимной совместимости - от надежности технических и технологических средств защиты, обученности работающих точным действиям в нештатных ситуациях и т.п.

В определенных условиях критическая ситуация может привести к появлению *происшествия*, т.е. к возникновению одного из событий в верхней части рис. 3. Конкретный вид происшествия (несчастный случай, авария, катастрофа) определяется спецификой возникшей критической ситуации: тем, каков потенциал опасного воздействия, какие элементы оказались в его зоне и подверглись влиянию.

Напомним, что для имитационного моделирования принимались в рассмотрение только наиболее существенные причины аварийности и

травматизма, разделенные на четыре группы по компонентам ПОРС системы – факторы влияния условий рабочей среды, надежности оборудования, уровня используемой технологии и факторы человека-оператора (см. пример в табл. 1).

Каждый такой фактор влияния в имитационной модели представляется в виде связки детерминистского и стохастического узла (см. левую часть на рис. 4).

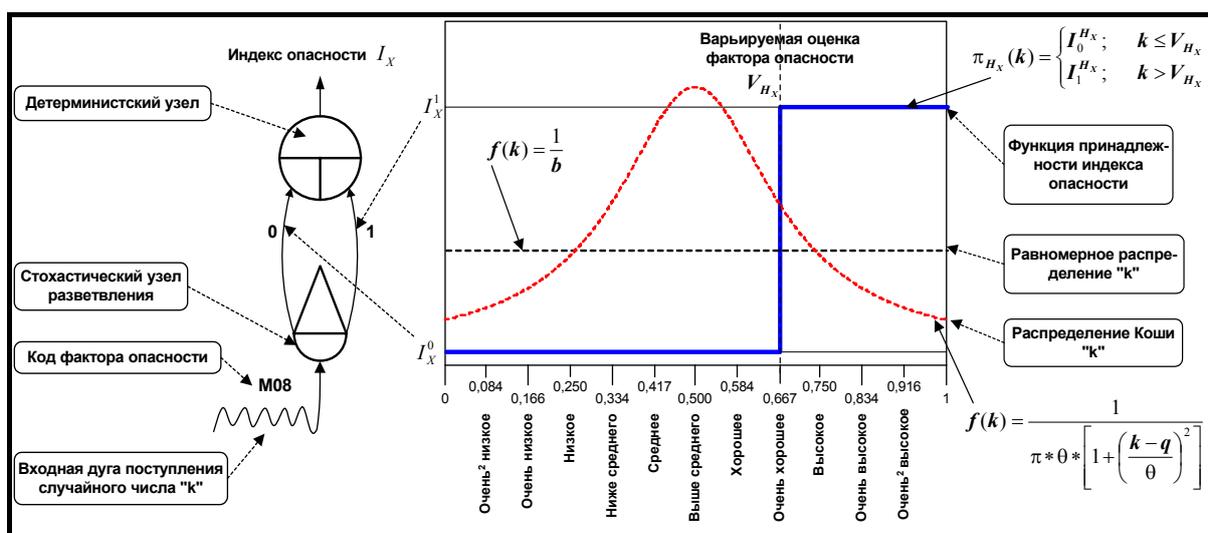


Рис. 4. Подмодель фактора влияния

На вход последнего в имитационной модели поступает случайное число k , которое обрабатывается в соответствии с видом функции принадлежности индекса опасности $\pi_{H_x}(k)$, положение «ступеньки» (см. рис. 4 справа) в которой зависит от оценки качества данного фактора влияния. Т.е., чем лучше оценка фактора, тем чаще на выходе подмодели фактора будет появляться нулевое значение индекса опасности, накопленное значение которого характеризует состояние человеко-машинной системы с точки зрения безопасности (чем выше – тем ближе система к аварии).

Такие подмодели факторов опасности организовываются в сетевую структуру (рис. 5) в соответствии с логикой возникновения происшествия в человеко-машинной системе (рис. 3). «Возмущения», вбрасываемые в сеть

подмоделями факторов опасности (см. посл. столбец табл. 1), выстраиваются в моделируемую причинную цепь аварии, которая может, как обрываться (умножение на ноль), так и приводить к модельному происшествию. В процессе моделирования фиксируется число благоприятных (обрыв цепи) и неблагоприятных исходов (достижение головного события на рис. 5), и по их отношению оценивается вероятность аварии для исследуемой ПОРС-системы.

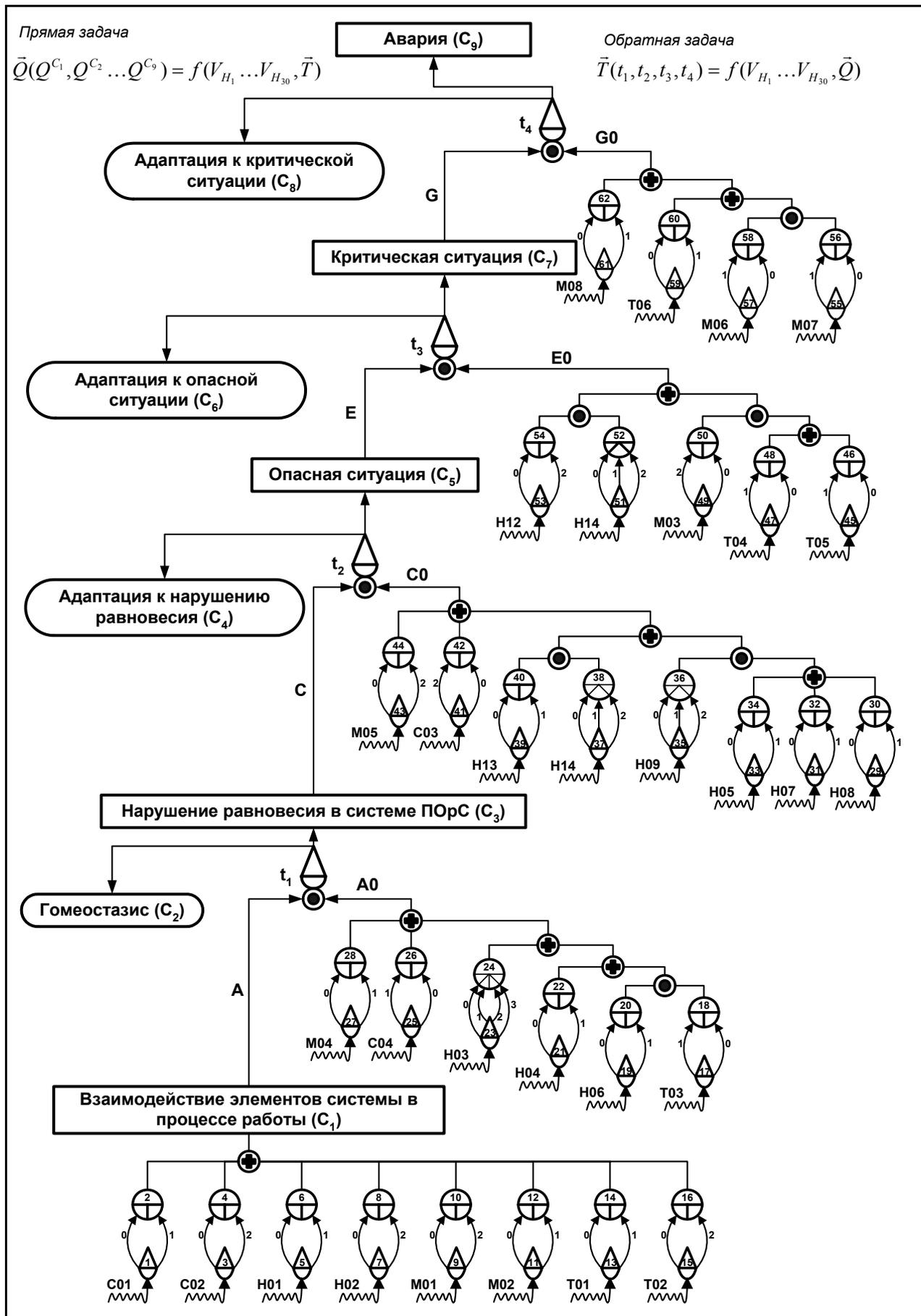


Рис. 5. Имитационная модель процесса возникновения аварии в ПОрС-системе

В самом общем виде работу имитационной модели можно свести к нахождению точечного значения функциональной зависимости между оценками факторов опасности и вероятностью аварии $P(A)$ на ОПО:

$$P(A) = Q^{C_9} = f(V_{H_1}, V_{H_2}, \dots, V_{H_i}, \dots, V_{H_{30}}), \quad (1)$$

где V_{H_i} - формализованная балльно-лингвистическая оценка i -го фактора влияния.

При имитационном моделировании безопасности различные ОПО отличаются друг от друга различными оценками факторов влияния V_{H_i} . Поэтому была разработана подсистема автоматизированной оценки факторов влияния, в которой использована универсальная балльно-лингвистическая шкала («очень низко», «низко», «средне», «хорошо» ...- всего 10 разрядов-оттенков).

Использование балльно-лингвистической шкалы позволяет унифицировать как качественные, так и количественные имеющиеся исходные данные. Такой подход находит все большее применение при решении вопросов анализа риска аварий и широко известен специалистам в области промышленной безопасности (см, например, [6]).

Применение экспертной системы при оценке факторов влияния позволяет выдавать пользователю необходимые разъяснения с опорой на действующие нормативные документы в области промышленной безопасности и охраны труда. Например, для оценки фактора С01 «Комфортность по физико-химическим параметрам рабочей среды» используется следующий набор производственных правил:

- «ЕСЛИ Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны = 2,1 - 4,0 ПДК
- И Эквивалентный уровень шума на рабочем месте = Превышение ПДУ до 10 дБА
- И Электрические поля промышленной частоты = < ПДУ (для всего рабочего дня)
- И Уровень общей вибрации = Допустимо
- И Параметры световой среды = Вредно (1 степень)

И Показатели микроклимата = Допустимо,

ТО Комфортность по физ.-хим. параметрам рабочей Среды = СРЕДНЯЯ».

Заключительная лингвистическая оценка фактора С01 для исследуемого ОПО определяется с помощью «Гигиенических критериев оценки и классификация условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса» (Р 2.2.755-99) и сводной таблицы 2.

Таблица 2

Балльно-лингвистическая оценка «Комфортности по физико-химическим параметрам рабочей среды» (фактор С01)

Фактические условия труда по шкале Р 2.2.755-99	Оценка условий труда по 2.2.755-99	Оценка в экспертной системе	
		лингвистическая	балльная
>1 фактора 4.0	4.0	Чрезвычайно низкая	1
1 фактор 4.0, >1 фактора 3.4	4.0	Очень низкая	2
1 фактор 3.4, >1 фактора 3.3	3.4	Низкая	3
1 фактор 3.3, >1 фактора 3.2	3.3	Ниже среднего	4
1 фактор 3.2, >2 факторов 3.1	3.2	Средняя	5
2 фактора 3.1	3.1	Выше среднего	6
1 фактор 3.1	3.1	Хорошая	7
>10 факторов 2.0	2.0	Очень хорошая	8
До 10 факторов 2.0	2.0	Высокая	9
Все факторы 1.0	1.0	Очень высокая	10

Отметим, что не все факторы влияния (табл. 1) поддаются подобной однозначной оценке. В таблице 3 представлен пример балльной оценки М07 «Уровня потенциала опасных и вредных факторов» с использованием метода средневзвешенного для изотермического хранилища жидкого аммиака.

Таблица 3

Балльно-лингвистическая оценка «Уровня потенциала опасных и вредных факторов» (фактор М07)

Составляющие фактора М07			Оценка составляющей		
№	Название	Вес (0-1,0)	Балльная (0-10)	Лингвистическая	Средневзвешенная
1	Объем запасенного аммиака	0.3	9	Чрезвычайно большой (8000т)	2.7
2	Класс опасности аммиака	0.15	4	Опасный (IV степень)	0.6
3	Рабочее напряжение электроустановок	0.1	8	Высокое (380В)	0.8

4	Рабочее давление сжатых газов	0.1	4	Среднее (до 1.5 МПа)	0.6
5	Перепад высот	0.1	7	Очень большой (до 25м)	0.7
6	Механическая энергия подвижных элементов	0.1	6	Большая	0.6
7	Взрыво- пожароопасность	0.15	2	Низкая	0.3
ИТОГО по М07		$\Sigma=1,0$	-	БОЛЬШОЙ	6.3

Бальные и лингвистические оценки каждой составляющей фактора (см. табл. 3) выбираются с опорой на соответствующие нормативные документы. Например, первая в таблице 3 составляющая «Объем запасенного аммиака» оценивается согласно Приложению 2 ФЗ № 116 от 21.07.97 и таблицы 4.

Таблица 4

Бальная и лингвистическая оценка «Запаса опасных веществ»

<i>Запас опасных веществ</i>	<i>Оценка</i>	
	<i>бальная</i>	<i>лингвистическая</i>
Отсутствие	0	Отсутствие
Менее 0.0003 ПКОВ**	1	Пренебрежительно малый
От 0.0003 до 0.001 ПКОВ	2	Очень малый
От 0.001 до 0.003 ПКОВ	3	Малый
От 0.003 до 0.01 ПКОВ	4	Ниже среднего
От 0.01 до 0.3 ПКОВ	5	Средний
От 0.3 до 1 ПКОВ	6	Выше среднего
От 1 до 3 ПКОВ	7	Большой
От 3 до 10 ПКОВ	8	Очень большой
От 10 до 30 ПКОВ	9	Чрезвычайно большой (огромный)
Более 30 ПКОВ	10	Катастрофически большой
**ПКОВ - Предельное количество опасных веществ по №116-ФЗ от 21.07.97		

После решения вопроса об оценке вероятности возникновения аварии правомерна постановка и решение задачи об оптимизации предполагаемых мер безопасности на исследуемом ОПО. Из практического опыта вытекают две возможные альтернативы оптимизационной задачи:

Задача 1. При фиксированных средствах Z_{\max} выбрать такой набор мер безопасности $\{z_i\}$, стоимостью z каждое, из m возможных, внедрение которого максимально снижает риск аварии $R_A(Y)$:

$$\begin{cases} \Delta R_A(Y) \rightarrow \max \\ Y = f(\dots, \{z_i\}, \dots), \\ \sum z_i \leq Z_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

Задача 2. Минимизировав затраты Z , выбрать такой набор мер безопасности $\{z_i\}$, стоимостью z каждое, из m возможных, внедрение которого снижает риск аварии $R_A(Y)$ до допустимого (заданного) уровня - R_A^{lim} :

$$\begin{cases} Z = \sum z_i \rightarrow \min \\ R_A(Y) \leq R_A^{\text{lim}}, \\ Y = f(\dots, \{z_i\}, \dots) \end{cases} \quad (3)$$

где Y - случайная величина ущерба от аварии, которая в общем случае определяется как основными характеристиками источника опасности (вероятность аварии $Q^{C_0} = P(A)$, энергозапас и др.) и восприимчивостью потенциальных жертв (уязвимость, живучесть и др.), так и применяемыми мерами безопасности $\{z_i\}$. В частности, вероятность аварии после внедрения i -го набора мер безопасности, оценивается с помощью имитационной модели как:

$$Q_i^{C_0} = P_i(A) = f(V_{H_1} + \Delta V_{H_{1i}}, V_{H_2} + \Delta V_{H_{2i}}, \dots, V_{H_j} + \Delta V_{H_{ji}}, \dots), \quad (4)$$

где $\Delta V_{H_{ji}}$ - улучшение оценки j -го фактора опасности при внедрения i -го набора мер;

V_{H_j} - оценка j -го фактора опасности до внедрения мер безопасности;

Для решения вышеприведенных оптимизационных задач при их высокой вычислительной емкости в экспертном программном комплексе **tHAZARD** используются в том числе и алгоритмы динамического программирования.

С помощью базы данных экспертной системы **tHAZARD** можно скорректировать функциональную зависимость (1), что позволяет 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.

В настоящее время концепция описанной выше экспертной системы реализована в виде программного комплекса **tHAZARD**, который разрабатывался в МГТУ им. Н.Э. Баумана и в ГУП "НТЦ "Промышленная

безопасность" Госгортехнадзора России. Программа работает под управлением операционной системы Windows 9x, NT, 2k и имеет доступный интерфейс (см. рис. 6). Типичный уровень пользователя соответствует примерно инженеру по технике безопасности.

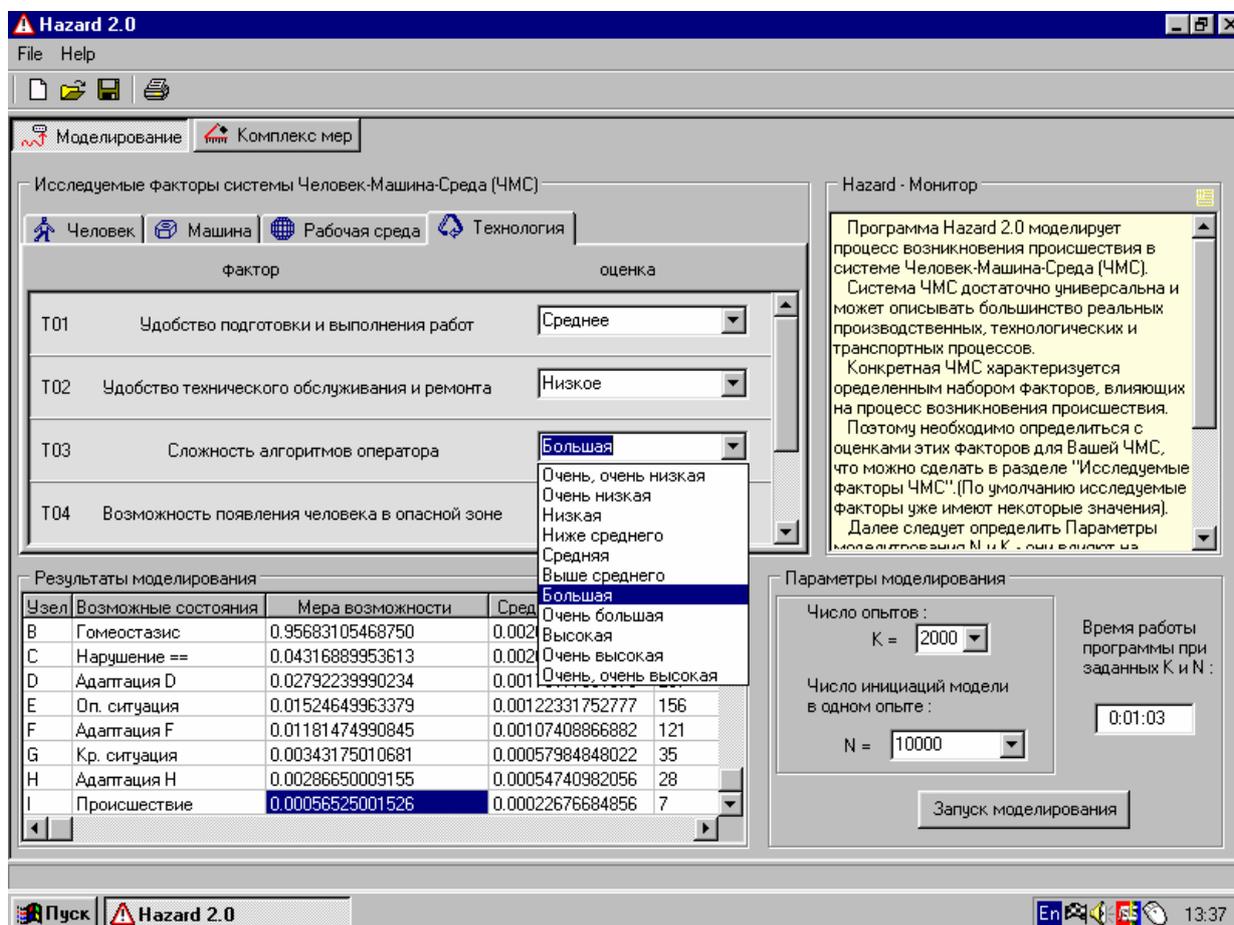


Рис. 6. Интерфейс экспертного программного комплекса tHAZARD 2.0

Экспертный программный комплекс tHAZARD 2.0 прошел апробацию при выработке и оценке мер безопасности на Московской железной дороге, при оценке возможности возникновения аварийной ситуации на складе хлора на проектируемом заводе по производству йода в Краснодарском крае, при сравнительном анализе реконструкционных мероприятий на изотермическом хранилище жидкого аммиака на ОАО "Невинномысский Азот" в Ставропольском крае.

tHAZARD 3.0 использовался в ГУП "НТЦ "Промышленная безопасность" при анализе риска аварий на нефтепроводных системах ЗАО «Каспийский трубопроводный консорциум – Р» и Балтийская трубопроводная система ООО «Балтнефтепровод», НПЗ ОАО «ЛУКОЙЛ-

Нижегороднефтеоргсинтез», Губкинский ГПЗ «Сибур-Тюмень», Очаковская, Волгоградская и Калининградская базы сжиженного газа ФГУП «СГ-Транс» и др.

tHAZARD 3.0 используется в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана на каф. «Экология и промышленная безопасность» в рамках курса «Моделирование опасных процессов в техносфере».

Список литературы

1. **Емельянов В.В., Ясиновский С.И.** Введение в интеллектуальное имитационное моделирование сложных дискретных систем и процессов. Язык РДО. - Москва: «АНВИК», 1998. - 427 с.
2. **Заде Л.А.** Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решения // Математика сегодня. – Москва: «Мир», 1974. – N7.
3. **Белов П.Г.** Теоретические основы системной инженерии безопасности. - М:ГНТП «Безопасность», МИБ СТС. – 1996.
4. Государственный доклад «О состоянии промышленной безопасности опасных производственных объектов, рационального использования и охраны недр Российской Федерации в 2000 году» / Под ред. В.М. Кульчева. – М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2001. – 196 с.
5. **Елисеев С.А.** О психологических предпосылках в производственном травматизме: Диссертация на соискание учёной степени кандидата психологических наук. – Ташкент, 1977 г.
6. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах: Серия 27. Выпуск 1 / Колл. авт. – М.: ГУП "НТЦ "Промышленная безопасность" Госгортехнадзора России, 2000. – 96 с.