

МОДЕЛИ, ЗНАНИЯ И ОПЫТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ¹

А.Ф. Берман, О.А. Николайчук

Сформулированы общие принципы, подходы, методы исследования и управляющие воздействия, направленные на обеспечение техногенной безопасности. Рассмотрены аварии и техногенные чрезвычайные ситуации, обусловленные разрушением или разгерметизацией уникальных механических систем в составе сложных технологических комплексов, предназначенных для реализации процессов при экстремальных значениях технологических параметров опасных сред. Разработаны базовые положения методики исследования и обеспечения техногенной безопасности.

Ключевые слова: техногенная безопасность, причинно-следственный комплекс, состояния, методика, модели, знания, опыт, информационная технология.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье рассматривается техногенная безопасность, нарушение которой обусловлено авариями на сложных технологических комплексах (СТК), вызываемыми разрушением или разгерметизацией уникальных механических систем (УМС) в их составе, предназначенных для реализации химико-технологических, нефтехимических, энергетических, биотехнологических и других процессов при экстремальных значениях технологических параметров опасных сред. Специфика технологических процессов обуславливает уникальность механических систем, реализующих различные стадии процессов, и неповторимость причинно-следственных связей нарушения безопасности и формирования техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС) [1–6]. Оценка техногенной безопасности СТК, состоящих из УМС, на основе математического аппарата вероятностно-статистической теории надежности не позволяет получить данные требуемой точности, так как причинно-следственный комплекс изменения состояний УМС и СТК никогда не повторяется, за исключением некоторых событий.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ (проект № НШ–1676.2008.1), программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН (2003–2008 гг.), Фонда содействия отечественной науке (2008–2009 гг.).

Сделана попытка представить информацию о процессах, явлениях, событиях и состояниях, формирующих и сопровождающих техногенные ЧС, в виде информационных, логических и математических моделей и тем самым сформировать методику исследования мультидисциплинарной проблемы «Техногенная безопасность».

Для моделирования знаний используется математический аппарат теории множеств, отражающий структуру знаний и данных, последовательность и способы их обработки. При разработке имитационной модели за основу принята математическая модель непрерывно-дискретных систем Н.П. Бусленко [7].

1. ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЙ СТК И УМС

На рис. 1 представлен причинно-следственный комплекс изменения состояний УМС, который определяет структуру исследования, как конечный итерационный процесс исследования всех фаз состояний — от дефекта до катастрофического отказа. На рис. 2 представлен причинно-следственный комплекс изменения состояний СТК, определяющий структуру исследования всех фаз состояний — от катастрофического отказа до техногенной ЧС. На каждом этапе исследования выполняются некоторые действия и операции, направленные на выявление факторов, обуславливающих нежелательные явления, процессы и события, влияющие

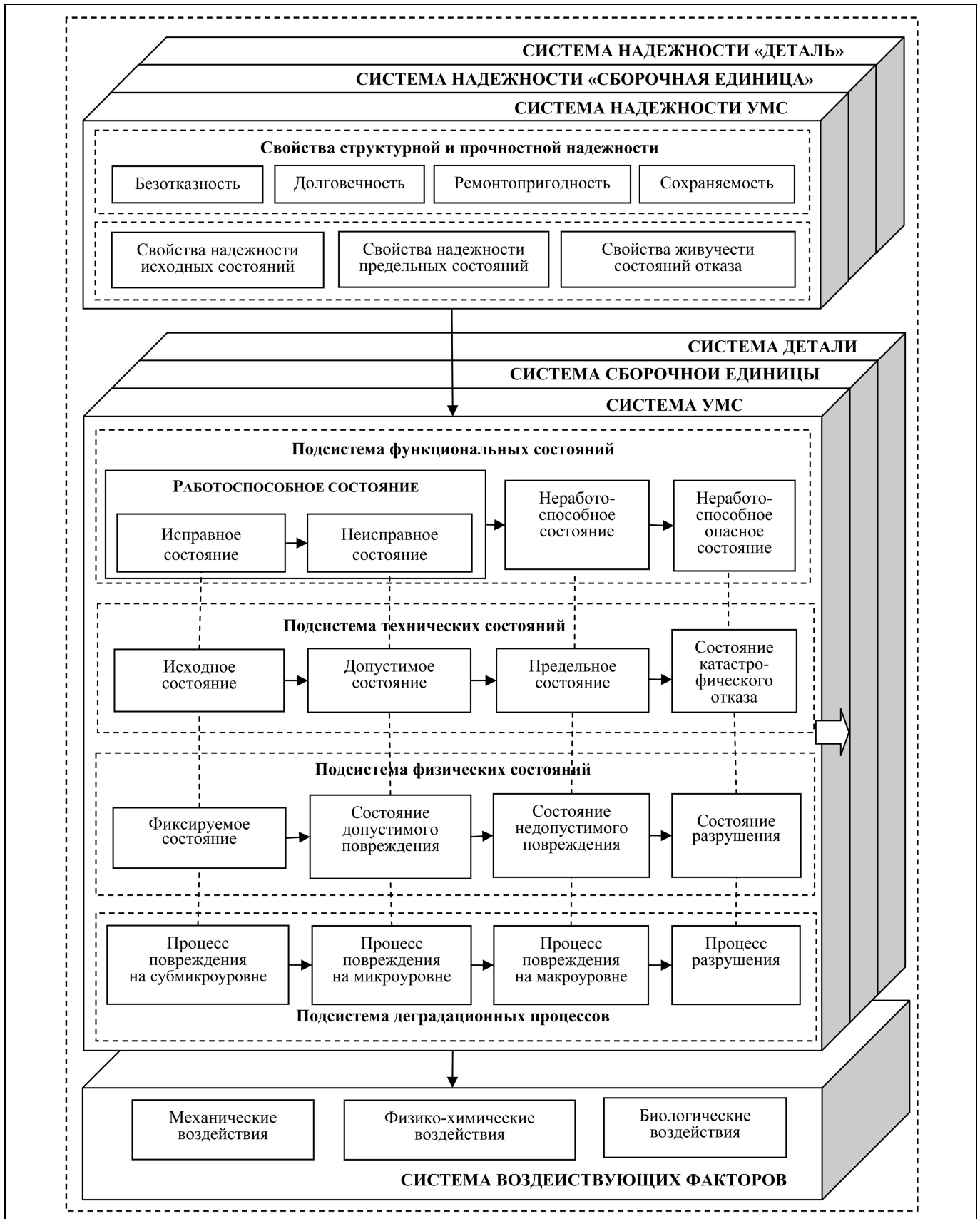


Рис. 1. Причинно-следственный комплекс динамики состояний УМС

на частоту и последствия опасных состояний, определение рациональных предупредительных, контрольных и защитных свойств объектов и их компонентов, обобщенных в понятии «свойства безопасности».

Представленный в виде иерархии подсистем причинно-следственный комплекс изменения состояний (см. рис. 1 и 2) обусловлен:

- структурой УМС и СТК;
- структурой пространства физико-технических и опасных состояний;
- множеством механизмов возникновения и разнообразием опасностей — причин нарушения безопасности;

- множеством сценариев развития каждой опасности;
- множеством вариантов решений, направленных на обеспечение свойств безопасности, удовлетворяющих приемлемому риску.

Каждая из подсистем — это информационный уровень, отражающий один из аспектов состояния рассматриваемого объекта. Понятие информационного уровня дает возможность объединения разнохарактерной информации об объекте: многообразии типов свойств, связей, состояний, рассматриваемых с различных теоретических позиций таких научных дисциплин, как материаловедение, физика и механика разрушения, теория

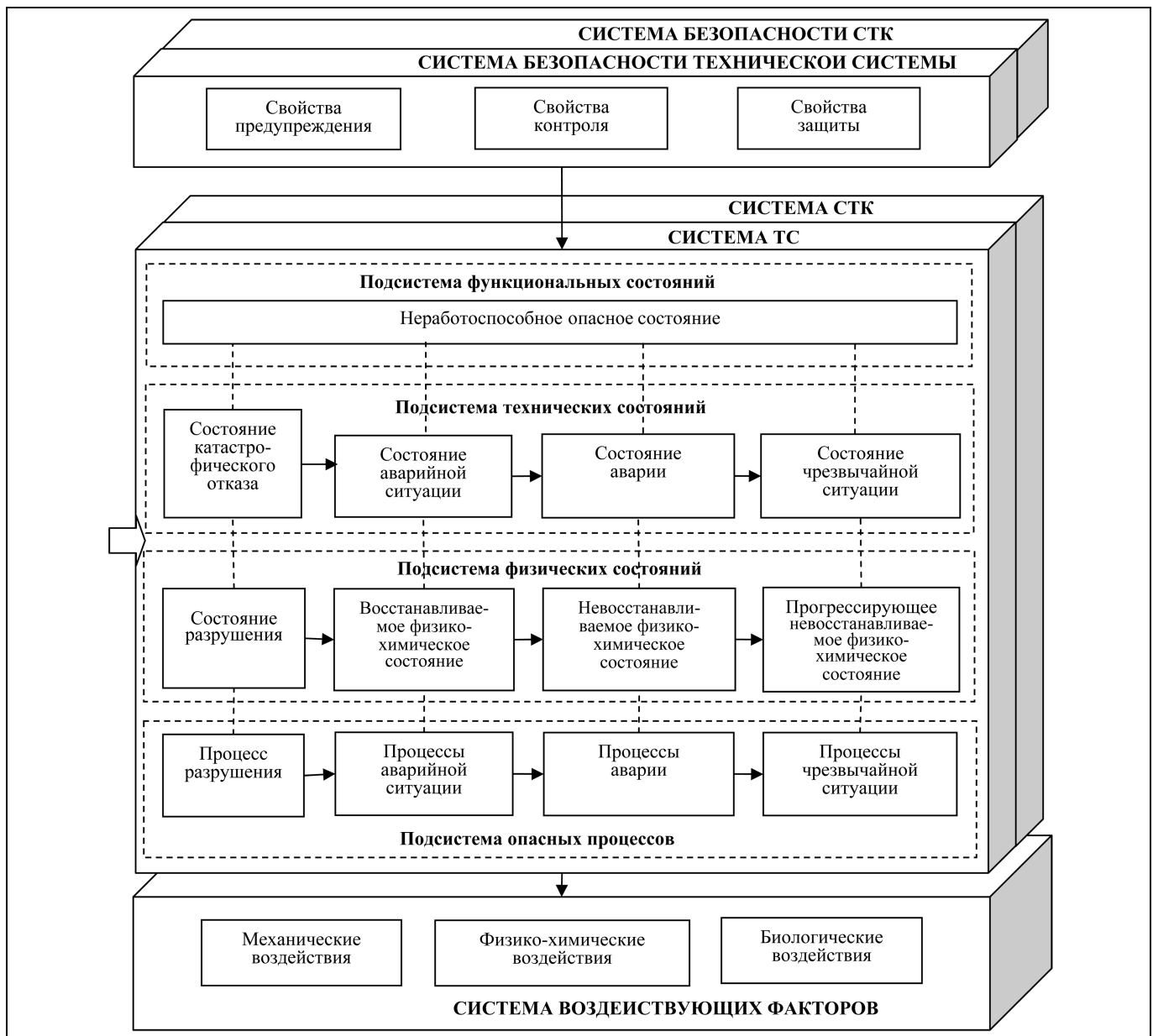


Рис. 2. Причинно-следственный комплекс динамики состояний СТК

эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, теории надежности, безопасности и риска. Это позволяет исследовать модель в разных аспектах и на основе полученных знаний синтезировать целостное представление об объекте. Разрабатываемый подход обеспечивает моделирование в областях знаний далеких друг от друга по терминологическим понятиям и уровню математической проработки задач исследования.

Каждый информационный уровень описывает объект исследования в виде дискретно-непрерывной динамической модели, которая отражает процесс изменения состояния объекта в фазовом пространстве. Дискретные свойства каждого информационного уровня определяются необходимостью разбиения пространства состояний объекта на подпространства для отображения наблюдений, характеризующих кардинальную смену состояний объекта при переходе из одного подпространства в другое.

Аналитические зависимости, отражающие связи между базовыми состояниями, представленными на рис. 1 и 2, с динамикой нарушения техногенной безопасности в настоящее время, как правило, неизвестны. В связи с этим проблема обеспечения безопасности решается на основе, как минимум, двух подходов. В одном из них используется сочетание аналитических и эмпирических зависимостей из научных дисциплин, изучающих каждое базовое состояние. Второй подход основан на методах и средствах искусственного интеллекта, где имеющиеся аналитические и эмпирические зависимости дополняются неформализованными или слабоформализованными знаниями экспертов.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ И ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАНИЯ

Закономерности перехода состояний описываются информационно-логико-математической моделью, представленной сочетанием данных и знаний, хранящихся в базах данных, базах знаний, имеющихся в онтологиях и математических модулях. Подпространства состояний определены на основе обобщенного причинно-следственного комплекса процесса изменения состояний. Модель основана на агрегатной модели с детерминированными компонентами [7].

Используя выделенные информационные уровни и подпространства состояний, объект исследования представлен агрегатной моделью, компоненты которой имеют детерминированную природу [8]:

$$O = (T, C, X, Dg, U, Y, H, G, Risk),$$

где $T = [0, T_j] \subset R$ — конечный интервал моделирования, C — пространство состояний c , $c = (c_1, c_2,$

$\dots, c_n)$, где c_i — фазовые координаты, $\underline{c}_i \leq c_i \leq \bar{c}_i$, \bar{c}_i — ограничения на значения фазовых координат, $i = \overline{1, n}$, $c(t)$ — фазовые траектории изменения состояния. Фазовые координаты описывают свойства объекта: функциональные, структурные, надежности и безопасности. Свойства надежности включают в себя свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости, а также свойства прочностной надежности и ресурса. Свойства безопасности включают в себя свойства пожаробезопасности, взрывобезопасности, химической безопасности и др. Множество фазовых координат имеет объектно-ориентированную структуру: $c_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iz})$, т. е. каждую координату при необходимости можно описывать набором собственных свойств. Пространство состояний C можно представить в виде разбиения

$C = \sum_{j=1}^k C^j$, соответствующего структурной схеме изменения состояния уникальной механической системы.

Далее, X — множество допустимых входов, $x = [x^1, \dots, x^l]$, где l — число «входных каналов», каждый из которых принимает входную информацию своего типа; Dg — множество выходных результатов dg мониторинга и (или) диагностирования объекта, $dg = [dg^1, \dots, dg^q]$. На этапе проектирования $Dg = \emptyset$; U — множество управляющих воздействий $u = [u^1, \dots, u^r]$ системы обеспечения надежности и безопасности объекта, которое определяется на основе причинно-следственных зависимостей «техническое состояние — управляющее воздействие», описанных, например, в виде производственных правил; Y — множество выходной информации $y = [y^1, \dots, y^s]$, характеризующее параметры технического состояния; $H = (V_x, V_g, V_d, V_m, L, P)$ — оператор переходов, определяющий множество возможных текущих состояний по предыстории с некоторым фактором уверенности p : $(c^s(t), p^s) = H[c(0), t, p]$, $s = \overline{1, S}$, S — число текущих состояний; V_x, V_g, V_m, V_d — операторы формирования новых начальных условий и, возможно, нового поведения при приеме очередной входной информации, управляющего воздействия, информации с нижнего по иерархии информационного уровня и информации о результатах диагностирования соответственно; $L = \langle DB, Ont, KB, M \rangle$ — информационно-логико-математическая модель, описывающая поведение объекта на временных интервалах между событиями, DB — базы данных, Ont — онтология надежности, KB — базы знаний, M — математические модели; P — фактор уверен-



ности возможного поведения объекта, являющийся экспертной оценкой; G — оператор выходов, $y(t) = G[c(0), t]$, преобразующий информацию о состоянии объекта в контролируемые параметры технического состояния, например, получаемые с помощью датчиков контроля или органолептически; наконец, *Risk* — риск технического состояния, определяемый как сочетание экспертной оценки возможности данного состояния и ущерба, причиняемого данным состоянием. Риск определяется на основе факторов уверенности P предыдущих состояний.

Информационно-логико-математическое обеспечение как основной элемент технологии поддержки принятия решений по обеспечению безопасности объекта представляет собой сочетание (комбинирование) моделей, методов и средств. При этом закономерности динамики процессов и явлений, описываемые математическими моделями, содержатся в вычислительных модулях. Информация о свойствах объекта исследования и знания о процессах и явлениях содержатся в базах данных и знаний.

В результате исследования на моделях прогнозируются изменения параметров техногенной безопасности и обосновываются методы и средства обеспечения требуемых свойств безопасности.

3. ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Результаты моделирования положены в основу информационной технологии исследования свойств и факторов, формирующих уровень техногенной безопасности. Технология определяется моделью объекта исследования, структурой и функциями процесса исследования, совокупностью методов и средств исследования и обеспечения безопасности и включает в себя этапы, действия и операции. Технология реализована комбинированным использованием объектно-ориентированного моделирования данных и знаний [9], рассуждений на основе моделей [10], рассуждений на основе прецедентов [11], математического (аналитического) моделирования и информационных технологий.

Комбинация подходов компенсирует недостатки их раздельного применения. Объектно-ориентированное моделирование на основе принципов объектно-ориентированной декомпозиции, абстракции и иерархии предметной области обеспечивает целостное представление о предметных понятиях и отношениях между ними. Прецедентный подход позволяет быстро и качественно находить приемлемое решение при наличии прецедентов (опыта). Метод рассуждений на основе моделей, содержащих знания о предметных сущностях, процессах и явлениях, применяется в случае отсут-

ствия прецедентов. Он требует дополнительного объема исходных данных и знаний.

Согласно иерархической модели процесс поиска решения задачи обеспечения надежности УМС представляет собой следующую последовательность шагов.

Шаг 1. На основании сведений об исходном техническом состоянии, воздействующих факторах и материале элемента делается вывод о возможном механизме деградационного процесса.

Шаг 2. Уточнение технологической ответственности элемента и вывод о возможной кинетике деградационного процесса.

Шаг 3. Уточнение кинетики и вывод о возможных проявлениях деградационного процесса.

Шаг 4. Уточнение проявлений и вывод о причинах возникновения деградационного процесса.

Шаг 5. Вывод о необходимых мероприятиях для устранения причин или снижения скорости деградационного процесса.

Последовательность указанных шагов повторяется для каждой стадии развития деградационного процесса.

Процесс поиска решения задачи обеспечения безопасности СТК представляет собой следующую последовательность шагов.

Шаг 1. Определение параметров возможного катастрофического отказа и обоснование мероприятий по предупреждению и локализации отказа.

Шаг 2. Определение параметров возможной аварийной ситуации и обоснование мероприятий по предупреждению и локализации аварийной ситуации.

Шаг 3. Определение параметров возможной аварии и обоснование мероприятий по предупреждению, локализации и снижению последствий аварии.

Шаг 4. Определение параметров возможной техногенной ЧС и обоснование мероприятий по предупреждению, снижению и ликвидации последствий ЧС.

Информация о процессе создания и эксплуатации СТК и УМС, включающая в себя обоснование всех ранее принятых решений по оценке и обеспечению техногенной безопасности должна храниться в компьютерных информационных системах (базах данных и знаний). При возникновении непредвиденных факторов обеспечивается возможность в кратчайшие сроки принять обоснованные решения, предотвратить задержку в изготовлении оборудования и (или) сократить время непредусмотренного простоя оборудования при эксплуатации. Именно, когда возникает необходимость восстановить аргументы, положенные в основу принятых ранее решений, а также обосновать новые решения с учетом возникших обстоятельств при существенных ограничениях во времени, в макси-

мальной степени проявляются преимущества информационных технологий и созданных на их основе систем поддержки принятия решений, в том числе экспертных систем [12].

4. ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ

При работе с данными различных типов невозможно (за исключением простейших случаев) устанавливать связи, отражающие существующие между элементами данных зависимости. Если функциональные зависимости во многих случаях могут быть представлены в аналитическом виде, то классификационные связи типа родовидовых, причинно-следственных и других представить в аналитическом виде не представляется возможным. Только в системах, работающих со знаниями (системы искусственного интеллекта), сведения о таких связях между объектами представляются в явной форме. Благодаря этому обеспечивается компактное представление всей необходимой информации и единообразие ее обработки.

Применение методов и средств искусственного интеллекта позволяет существенно повысить эффективность и качество принимаемых решений в сложных недостаточно формализованных областях исследований и деятельности, к которым относится и безопасность технических объектов. В частности, метод экспертных систем (ЭС) обеспечивает использование знаний квалифицированных специалистов, примененных при решении различных проблем. Знания специалистов представляются в виде некоторого формализованного описания, например, последовательности развития каких-либо событий и принятых решений при проведении исследований, а также при обеспечении каких-либо свойств объекта. Экспертные системы позволяют пользователю, не имеющему глубоких знаний об исследуемом событии или процессе, получить приемлемое решение за короткий промежуток.

Функционирование ЭС во многом зависит от вида и качества формализации знаний, которые могут быть представлены в виде продукций, фреймов и др., а также в виде прецедентов. В зависимости от используемой модели представления знаний ЭС подразделяют на продукционные, прецедентные и др. При комбинации моделей представления знаний ЭС называют гибридными.

Прецедентные ЭС базируются на принципе принятия решений по аналогии, где прецедент — это компактное описание знаний о событиях, явлениях, процессах и состояниях, в котором представлены наиболее важные параметры и свойства событий, процессов и рассматриваемого объекта.

В общем случае в модели прецедента выделяют компонент описания проблемы и компонент решения проблемы. Свойства объектов предметной области, описывающие компоненты прецедента, выбираются в зависимости от типа поставленной задачи (или задач). Согласно прецедентному подходу процесс решения задачи представляет собой последовательность этапов поиска (извлечения) аналогов и повторного использования информации, содержащейся в извлеченных аналогах. Также возможна адаптация прецедента — это приближение решения аналога-прецедента к решению нового прецедента. Данный этап осуществляется путем качественного переопределения описания прецедента и (или) путем уточнения значений параметров и (или) с помощью продукционной ЭС.

Продукционный подход реализуется продукционными ЭС, которые содержат знания в виде правил типа «если A и B , то следует C », где A , B и C — какие-либо факты, события, явления. Данный подход применяется также для решения задач управления безопасностью.

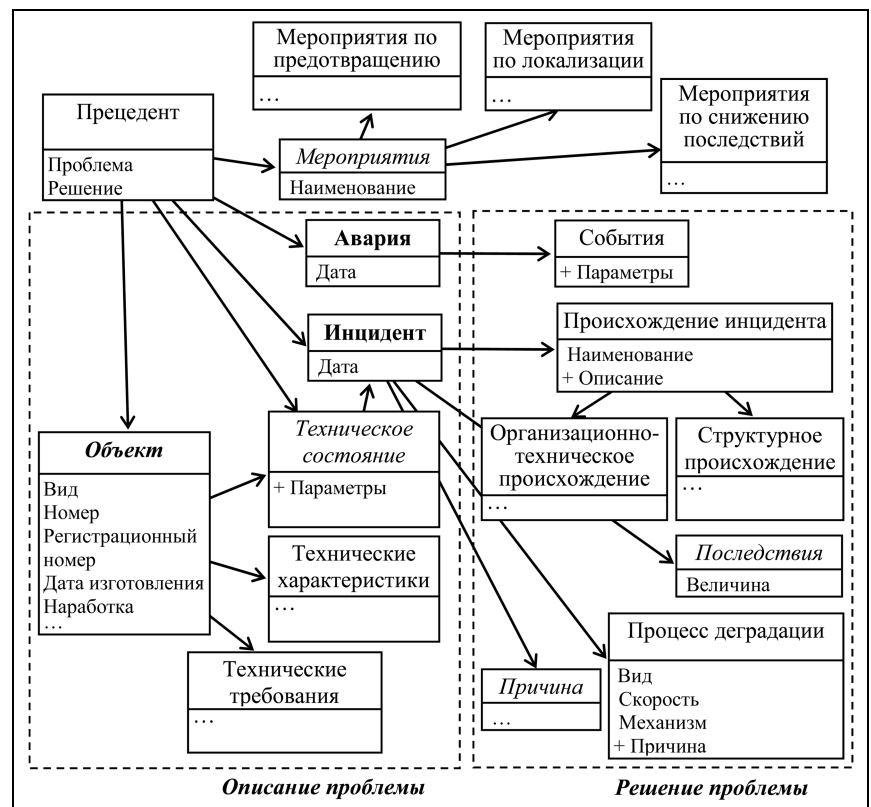


Рис. 3. Фрагмент логической модели прецедента

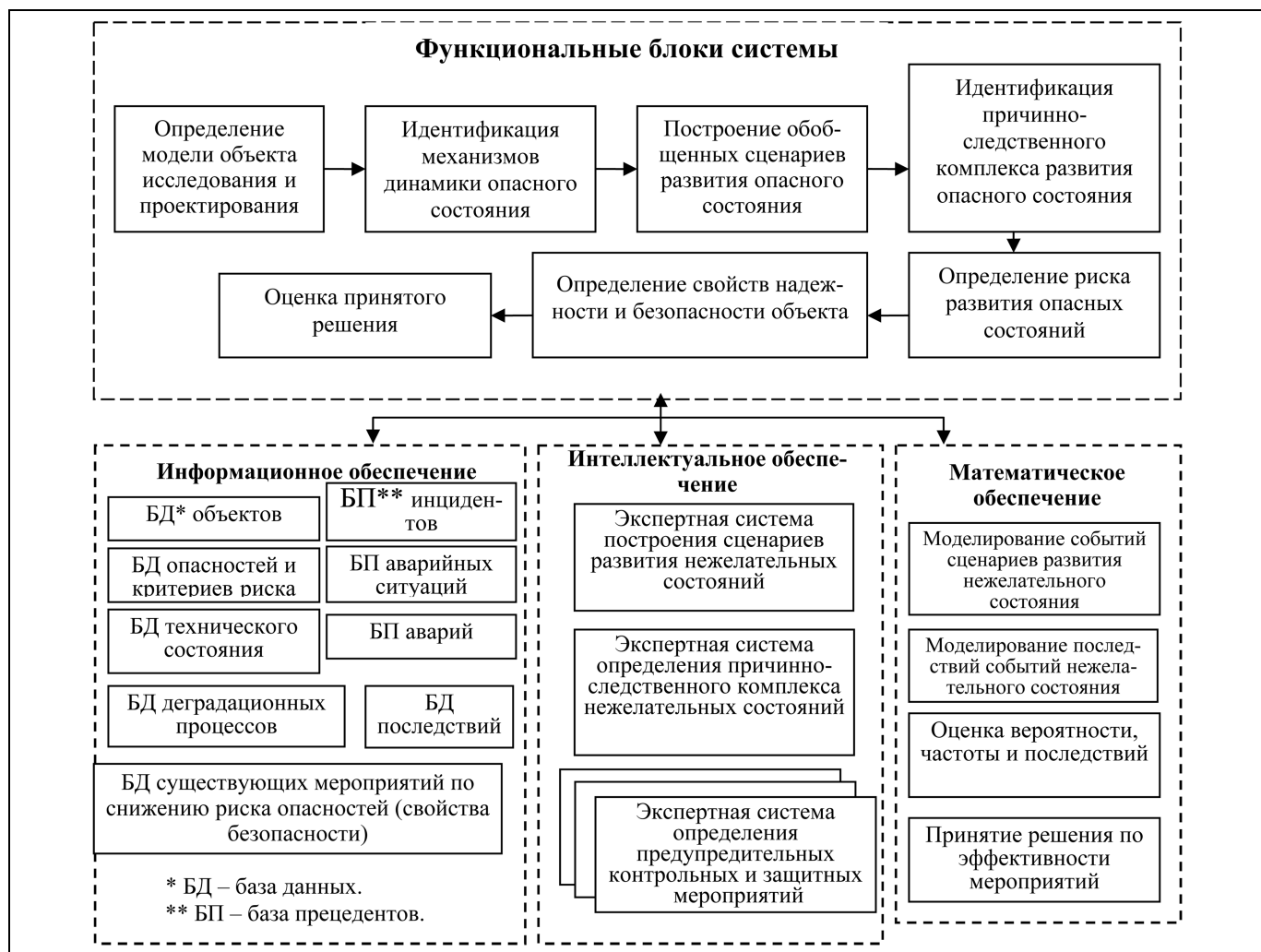


Рис. 4. Архитектура системы исследования и обеспечения надежности и безопасности техногенных объектов

Экспертные знания служат ключевым описанием закономерностей перехода состояний, так как отсутствуют аналитические зависимости, связывающие свойства объектов, воздействующие факторы с возможными параметрами аварий и катастроф. Для использования знаний экспертов, на основе методов искусственного интеллекта, разработаны прецедентные и продукционные модели и системы [13–22].

5. РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Предложенный подход реализован в виде интеллектуальной системы, основные программные компоненты которой: база прецедентов, модуль реализации процедуры извлечения (поиска аналогов) прецедентов, база продукционных правил, модуль реализации вывода по правилам и библиотека математических модулей.

В качестве средства хранения прецедентов использована СУБД «Cache», обеспечивающая эффективное представление прецедентов в виде объектов или реляционных таблиц, что позволяет использовать объектное представление прецедентов и на уровне хранения данных. Логическая модель прецедента представлена на рис. 3.

Разработана технология компонентной сборки интеллектуальной программной системы [23].

При реализации модуля продукционной экспертной системы использована оболочка для построения продукционных ЭС «Clips» [24]. Аналитические функции реализованы в виде программных процедур специализированной динамической библиотеки. Графический пользовательский интерфейс и алгоритмическое обеспечение реализованы на языке Object Pascal (Borland Delphi).

Архитектура интеллектуальной программной системы (рис. 4) представляет собой набор программ-мастеров (wizards), каждая из которых реа-

лизуется алгоритм решения одной из задач на основе удобного и понятного (инструктивного) интерфейса пользователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе системного анализа и комплексного подхода к моделированию динамики состояний объектов потенциальной техногенной опасности (сложных технологических комплексов) обеспечивается возможность формирования адекватного управления свойствами воздействующих факторов и свойствами объекта для повышения уровня гарантированного ресурса и снижения вероятности внезапных катастрофических отказов, нарушающих безопасную эксплуатацию объектов.

На основе структуры и функций предпроектных исследований, проектирования и конструирования сложных технологических и механических систем, методов математического моделирования, методов и подходов информационных технологий и искусственного интеллекта, принципов разработки программного обеспечения разработаны базовые положения методики исследования и обеспечения техногенной безопасности.

Разработанный программный комплекс обеспечил решение одной из задач повышения безопасности объекта при его разгерметизации [25].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Махутов Н.А.* Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. — Новосибирск: Наука, 2005. — 610 с.
2. *Берман А.Ф.* Деградация механических систем. — Новосибирск: Наука, 1998. — 320 с.
3. *Берман А.Ф., Николайчук О.А.* Структуризация процесса исследования безопасности сложных технических систем // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. — 1999. — № 6. — С. 3—14.
4. *Берман А.Ф., Николайчук О.А.* Моделирование процесса исследования безопасности сложных технических систем // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. — 1999. — № 8. — С. 185—195.
5. *Берман А.Ф., Васильев С.Н.* Технология обеспечения приемлемого риска аварий сложных механических систем // Проблемы человеческого риска. — 2006. — № 1. — С. 61—69.
6. *Берман А.Ф., Васильев С.Н.* Условия и источники техногенного риска // Проблемы человеческого риска. — 2007. — № 1. — С. 45—50.
7. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 157 с.
8. *Берман А.Ф., Николайчук О.А.* Пространство технических состояний уникальных механических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2007. — № 1. — С. 14—22.
9. *Буч Г.* Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. — М.: Бином; СПб.: Невский диалект, 1998. — 560 с.
10. *Люгер Дж.Ф.* Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е издание.: Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2003. — 864 с.
11. *Aamodt A., Plaza E.* Case-Based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches // AI Communications. — 1994. — Vol. 7, N 1. — P. 39—59.
12. *Берман А.Ф., Николайчук О.А.* Принципы создания систем исследования безопасности сложных технических систем // Программные продукты и системы. — 2001. — № 1. — С. 6—9.
13. *Онтология надежности механических систем / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Ю. Юрин // Искусственный интеллект. — 2004. — № 3. — С. 266—271 (Украина).*
14. *Инструментальное средство идентификации состояний механических систем / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Ю. Юрин // Там же. — 2004. — № 4. — С. 268—275.*
15. *Интеллектуальная система поддержки принятия решений при определении причин отказов и аварий в нефтехимической промышленности / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Ю. Юрин // Автоматизация в промышленности. — 2006. — № 6. — С. 15—17.*
16. *Николайчук О.А., Юрин А.Ю.* Прототип интеллектуальной системы для исследования технического состояния механических систем // Искусственный интеллект. — 2006. — № 4. — С. 459—468 (Украина).
17. *Николайчук О.А., Юрин А.Ю.* Управление опытом при исследовании динамики технического состояния уникальных машин и конструкций: моделирование опыта // Информационные технологии. — 2008. — № 6. — С. 30—37.
18. *Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю.* Обеспечение безопасности технических объектов методом прецедентных экспертных систем // Проблемы безопасности и чрезвычайные ситуации. — 2008. — № 5. — С. 83—93.
19. *Николайчук О.А.* Автоматизация исследований технического состояния опасных механических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2008. — № 6. — С. 72—78.
20. *Nikolaychuk O.A., Yurin A.Y.* Computer-Aided Identification of Mechanical System's Technical State With the Aid of Case-Based Reasoning // Expert Systems With Applications. — 2008. — Vol. 34. — P. 635—642.
21. *An Intelligent system for Investigation and Provision of Safety for Complex Constructions / A.F. Berman, O.A. Nikolaychuk, A.I. Pavlov, A.Y. Yurin // Intern. Journal «Information Technologies and Knowledge». — 2008. — Vol. 2. — N 3. — P. 218—225.*
22. *Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю.* Автоматизация прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса деталей уникальных машин и аппаратуры // Заводская лаборатория. — 2009. — № 3. — С. 48—57.
23. *Павлов А.И., Юрин А.Ю.* Компонентный подход: модуль правдоподобного вывода по прецедентам // Программные продукты и системы. — 2008. — № 3. — С. 55—58.
24. *CLIPS: A Tool for building Expert Systems // Sourceforge.net / URL: <http://clipsrules.sourceforge.net/> (дата обновления 09.05.2008).*
25. *Пат. на полезную модель 81556 (РФ).* Устройство для сбора утечек из оборудования, работающего под давлением, и контроля за концентрацией среды утечек / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук // Бюлл. — 2009. — № 8.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Кульбой.

Берман Александр Фишелевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией, ☎ 8(3952) 45-30-39, ✉ berman@icc.ru,

Николайчук Ольга Анатольевна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ☎ 8(3952) 45-31-52, ✉ nikoly@icc.ru,

Институт динамики систем и теории управления СО РАН, г. Иркутск.