

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет
имени К.И. Сатпаева

Н. Г. Хайрлиева

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ
ПО ОХРАНЕ ТРУДА**

Рекомендовано Научно-методическим советом университета
в качестве учебного пособия

Алматы 2014

УДК 681
ББК 30.14
X 15

X 15 *Хайрлиева Н. Г.* Моделирование состояния по охране труда:
Учеб. пособие. – Алматы: КазНТУ, 2014. – 161 с.
Ил. 153. Табл. 11. Библиогр. – 18 назв.
ISBN 978-601-228-637-3

В предлагаемом пособии «Моделирование состояния по охране труда» рассматриваются вопросы: понятие модели, моделирование и абстрагирование, структура процесса моделирования. Подробно представлено исследование модели и типы моделей, процесс моделирования. В основной части пособия описаны математические модели, их использование, особенности математического моделирования условий труда. Специальная часть включает задачи математического моделирования в охране труда, распределение функций между человеком и машиной, моделирование производственного травматизма, а также моделирование системы управления промышленной безопасностью.

УДК 681
ББК 30.14

Рецензенты:

Д.Н. Шукаев, зав. каф. «Информационные технологии»
КазНТУ им. К.И. Сатпаева, д-р техн. наук, проф.
А.Г. Акчурин, каф «АДТС.» Каз АТК им. М.Тынышпаева,
д-р техн. наук, проф.
Е.Е. Баубеков, каф «АДТС.» Каз АТК им. М.Тынышпаева,
д-р техн. наук, проф.

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2014 г.

ISBN 978-601-228-637-3

© Хайрлиева Н. Г., 2014
© КазНТУ, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование вычислительной техники и широкое распространение персональных компьютеров открыло перед моделированием огромные перспективы для исследования процессов и явлений окружающего мира, включая сюда и человеческое общество. Компьютерное моделирование – это в определенной степени, то же самое, моделирование, но реализуемое с помощью компьютерной техники. Для компьютерного моделирования важно наличие определенного программного обеспечения. При этом программное обеспечение, средствами которого может осуществляться компьютерное моделирование, может быть как достаточно универсальным (например, обычные текстовые и графические процессоры), так и весьма специализированным, предназначенными лишь для определенного вида моделирования. Очень часто компьютеры используются для математического моделирования. Здесь их роль неопределима в выполнении численных операций, в то время как анализ задачи обычно ложится на плечи человека. Обычно в компьютерном моделировании различные виды моделирования дополняют друг друга. Так, если математическая формула очень сложна, что не дает явного представления об описываемых ею процессах, то на помощь приходят графические и имитационные модели. Компьютерная визуализация может быть намного дешевле реального создания натуральных моделей. С появлением мощных компьютеров распространилось графическое моделирование на основе инженерных систем для создания чертежей, схем, графиков. Если система сложна, а требуется проследить за каждым ее элементом, то на помощь могут прийти компьютерные имитационные модели. На компьютере можно воспроизвести последовательность временных событий, а потом обработать большой объем информации. Однако следует четко понимать, что компьютер является хорошим инструментом для создания и исследования моделей, но он их не придумывает. Абстрактный анализ окружающего мира с целью воссоздания его в модели выполняет человек [1].

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МОДЕЛИРОВАНИИ

1.1. Понятие модели

Начнем с рассмотрения общего понятия модели и анализа тех факторов в прогрессе научной и практической деятельности, которые обусловили возникновение и развитие метода моделирования и рост внимания к нему со стороны исследователей. Анализ общего понятия модели является необходимой исходной предпосылкой дальнейшего изучения проблем моделирования. Исследователь при этом должен постоянно иметь в виду, что моделирование не есть некоторый частный (или технический) прием познания, используемый лишь в некоторых отраслях науки. Моделирование представляет собой весьма распространенный метод, применяемый во многих науках. В этой связи гносеологический анализ моделирования важен не только сам по себе (как философское осмысление одного из наиболее широко распространенных в современной науке методов исследования), но и в связи с тем, что он позволяет глубже понять некоторые общие закономерности познания. В ходе такого анализа философия должна исходить из рассмотрения конкретных типов моделей, используемых в различных отраслях науки. Задача философии состоит в раскрытии того общего, что характеризует эти специфические модели, т. е. в исследовании принципиальной природы метода моделирования как такового, взятого в его всеобщности. Решение этих проблем осложняется не только широким многообразием конкретных типов моделей, но и многозначностью самого слова «модель». Неоднозначность употребления этого слова характерна, прежде всего, для обыденной речи. Однако и в научной литературе это слово порой применяется в недостаточно строго установленном значении.

Из множества значений слова «модель» возьмем три наиболее распространенных. Начнем с самых простых значений.

1. Довольно часто слово «модель» используется для обозначения определенного типа конструкции (модель станка, новая модель автомашины и т. д.).

2. Под моделью иногда понимается некоторый «идеальный» образец, с которого копируются другие объекты этого

же типа (таковы, например, образцы изделий, описываемые различными государственными стандартами).

По-видимому, не требует особых доказательств то, что оба эти значения слова «модель» не имеют непосредственного отношения к моделированию как методу научного исследования.

3. Наконец, под моделью весьма часто понимается материальное воспроизведение объекта независимо от того, в каких целях оно предпринимается. Ввиду того, что в этом значении слово «модель» встречается наиболее часто, остановимся на нем несколько подробнее.

Как известно, воспроизводиться могут самые различные свойства и отношения предметов и процессов (обозначим их общим термином – «объекты»).

Наиболее простым и распространенным является воспроизведение пространственных свойств и отношений. Не случайно этот тип воспроизведения явился генетически первым в истории науки и техники. С прогрессом науки и производства объектом воспроизведения постепенно становятся и все более глубокие связи и отношения. Развитие этого процесса привело, например, в современных условиях к созданию возможностей воспроизведения некоторых (подчас весьма сложных) функций живых организмов на ином материальном субстрате (примерами могут служить такие тончайшие аппараты, как «искусственная почка», «искусственные легкие» и др.). Техническое воспроизведение строения и функций живых организмов приобрело в современной науке принципиально большое значение благодаря успехам таких отраслей знания, как кибернетика и бионика. Необходимость и целесообразность такого воспроизведения диктуется наличием у биологических систем таких ценных свойств, как их высокая надежность, большое совершенство устройств ввода информации, гибкость устройств переработки информации, миниатюрность и экономичность работы элементов и т. д.

Таким образом, в зависимости от возможностей материального оперирования с объектами и тех целей, которые ставятся в конкретных случаях, воспроизведение может осуществляться как на уровне относительно простых, поверхностных связей и отношений, так и на более глубоких уровнях. Однако, как выясняется уже при самом поверхностном анализе, воспро-

изведение объекта не представляет собой какой-то единой в функциональном отношении процедуры. В зависимости от того, какие задачи и цели ставит перед собой воспроизводящий субъект, функции, выполняемые воспроизведением объекта, будут совершенно различными. Выделим из них три главные.

1. Воспроизведение объекта может выполнять чисто *практические, прикладные* функции. При этом используются некоторые практически ценные для человека свойства воспроизводящего объекта (т. е. результата процесса воспроизведения). Так, перцептрон, технически воспроизводящий некоторые свойства органа зрения человека, обладает «способностью опознавать» определенные объекты (например, буквы и цифры). Эта «способность» перцептрона может практически использоваться для ввода информации в кибернетическую машину. При этом благодаря своим конструктивным особенностям (которые хотя и обязаны своим происхождением исследователям и конструкторам, но существуют сами по себе, т. е. объективно) перцептрон позволяет значительно упростить ввод информации. Субъект, практически использующий такой аппарат, может и не знать, что он был создан в результате искусственного воспроизведения на ином субстрате функций органа зрения человека. Для использования воспроизводящего объекта в чисто практических целях часто вполне достаточно бывает лишь знания его непосредственных функциональных возможностей. Знание же его генезиса и даже структуры в этих случаях, как правило, не является необходимостью.

2. Объект, являющийся результатом процесса воспроизведения, может выполнять определенные функции в *обучении*. В этом случае принято говорить о том, что данный объект выполняет функции *демонстративной* модели. Таковы макеты, схемы, таблицы, чертежи, применяемые в качестве наглядных пособий в процессе обучения.

3. Наконец, воспроизводящий объект может использоваться в целях *исследования* воспроизводимого объекта. Именно в этом (и только в этом) случае слово «модель», обозначающее воспроизводящий объект, имеет самое непосредственное отношение к моделированию как методу научного познания.

Действительно, в том случае, когда воспроизведение объекта предпринимается в чисто практических целях, оно не имеет в качестве непосредственной задачи получение новых знаний о воспроизводимом. Демонстративная модель, правда, выполняет познавательную функцию, однако эта функция связана лишь с облегчением усвоения уже готового знания, но не с получением принципиально нового знания. Модели этого типа используются скорее для иллюстрации уже существующей теории, чем для ее построения или доказательства. Модель используется при разработке теории объекта в том случае, когда непосредственное исследование его не представляется возможным вследствие *ограниченности современного уровня знания и практики*. Данные о непосредственно интересующем исследователя объекте получаются путем исследования другого объекта, который объединяется с первым общностью характеристик, определяющих качественно-количественную специфику обоих объектов.

Модель может выбираться или строиться для объяснения накопленных в науке фактов или законов, если для объяснения их еще нет теории. Иногда при отсутствии теории объекта возникает необходимость предсказывать поведение этого объекта в некоторые будущие моменты времени. В этих случаях, как правило, прибегают к помощи метода моделирования и пытаются предсказать поведение непосредственно интересующего нас объекта путем анализа поведения другого, более известного, объекта. Последний, таким образом, выступает в роли модели.

В названных случаях модель применяется либо для выполнения тех функций, которые должна была бы выполнять теория, либо для построения самой теории.

Однако необходимость использования метода моделирования существует не только при отсутствии теории исследуемого объекта. Возникает ряд ситуаций, в которых и при условии существования теории объекта обойтись без моделей невозможно. В подавляющем большинстве случаев мы имеем дело с такими теориями, которые находятся еще в процессе своего становления и далеки от завершения. Процесс дальнейшего развития таких теорий может совершаться через использование модели, через ее анализ. Неполнота теории может, в частности, выражаться в том, что при наличии качественного исследования

объекта и его закономерностей отсутствует количественный анализ или, наоборот, имеется некоторая количественная теория при отсутствии данных о качественной характеристике объекта. В первом случае модель позволяет определить количественную характеристику объекта, а во втором благодаря ей создается, с одной стороны, возможность выяснения качества объекта и, с другой, – как следствие этого – обогащается и подтверждается сама количественная теория. Модель используется подчас и в ситуации, когда имеется достаточно развитая теория исследуемого объекта. Дело в том, что непосредственное применение теории к анализу описываемых ею объектов нередко является весьма трудоемким делом. Так, при решении некоторых физических и технических задач система дифференциальных уравнений, описывающих объект, в некоторых случаях оказывается настолько сложной, что либо не может быть решена имеющимися в распоряжении исследователя средствами, либо ее решение связано с неоправданной затратой сил и времени. В этом случае стремятся построить такую модель, которая бы позволила получить интересующие нас данные об объекте не путем решения системы уравнений, а путем непосредственного экспериментального исследования процессов, протекающих в этой модели. Тем самым процедуры решения системы уравнений заменяются более простыми процедурами (например, измерения и др.). Иногда, однако, с помощью модели находят некоторый средний путь, а именно – строят такую модель, которая описывалась бы гораздо более простой системой уравнений, чем непосредственно интересующий нас объект. Следует заметить, что модель в этих случаях помогает определению не только количественных параметров объекта, но и его качественной характеристики.

Модель может выступать в роли промежуточного звена между теорией и действительностью. Необходимость модели в этом случае вызывается невозможностью непосредственного соотнесения теории с той предметной областью действительности, которую она описывает. Такая модель решает задачу интерпретации теории. Модель может быть использована для установления связи между двумя ранее не связанными теориями. При этом в качестве модели может выступать одна из тех теорий, связь между которыми устанавливается.

Таким образом, в условиях существования теории исследуемого объекта необходимость моделирования вызывается либо задачами дальнейшего развития теории, либо трудностями ее непосредственного применения, либо нуждами интерпретации и координации теорий. Однако существуют ситуации, в которых применение метода моделирования обусловлено причинами иного рода. Назовем некоторые из таких ситуаций. Модель иногда позволяет осуществить практическую проверку тех или иных положений, непосредственное подтверждение которых не представляется возможным. Применительно к такого рода случаям мы в дальнейшем будем говорить о «критериальной функции модели».

Модели используются для исследования объектов, недоступных для экспериментального оперирования с ними (объект либо слишком мал, либо слишком велик, либо находится на очень большом расстоянии, либо продолжительность процесса во много раз превосходит продолжительность жизни исследователя и т. д.). Модели в этом случае представляют собой системы, наблюдение над которыми или исследование которых посредством эксперимента способно дать недостающую информацию о первой группе объектов. Задача модели в этом случае состоит, фигурально выражаясь, в сведении параметров объекта до уровня параметров нашего обыденного мира. Наконец, применение модели может вызываться соображениями экономии. Эти соображения приобретают особенно осязаемое значение в наш век – век гигантских технических сооружений.

Уже это простое перечисление задач, которые могут быть решены посредством моделирования, показывает, что модели весьма разнообразны и по их роли в процессе познания, и по способу их реализации. Несмотря на такое разнообразие всех этих моделей, характерно то, что они имеют исследовательский характер. Вскрывая их общность, необходимо, следовательно, в первую очередь показать, в чем состоит общность их роли в процессе познания. Такая постановка вопроса, естественно, ставит задачу выделения того общего, что содержится во всех выше отмеченных случаях моделирования. Притом необходимо выделить такое общее, которое было бы специфичным для модели как средства познания объективного мира, т. е. позволило

бы отличить моделирование от любого другого метода научного исследования.

При моделировании объект, непосредственно интересующий исследователя (объект А), замещается некоторым другим объектом – (объектом В), который мы и будем называть *«моделью»*. При этом объект В замещает объект А, вообще говоря, лишь в исследовании, преследующем данную, конкретную цель. При исследованиях, преследующих другие цели, могут понадобиться другие модели.

Итак, главная отличительная черта моделирования как метода научного познания состоит в том, что человек, ставящий перед собой некоторые цели исследовательского характера, использует для исследования непосредственно интересующего его объекта другой объект, замещающий в этом случае первый. Объект, непосредственно интересующий исследователя и замещаемый моделью, в дальнейшем изложении условимся называть *«оригиналом»*.

Характеристика модели как *заместителя* оригинала кажется нам более оправданной, чем определение ее как «квазиобъекта», употребляемое в одной из последних работ И. Б. Новика. Естественно, возникает вопрос, каковы объективные основания возможности замены в процессе исследования одного объекта другим. Предметы материального мира (и соответственно – «предметы» сознания) представляют собой целостные системы свойств, связей, отношений, процессов и т. д. (вообще – некоторых элементов). Эта целостность и системность предметов обусловлена тем, что составляющие их элементы связаны друг с другом некоторым определенным, закономерным образом.

Именно эта закономерная связь элементов, составляющих целостные предметы, и является объективной основой возможности моделирования. Исходя из того, что элементы включены в предмет не каким-то случайным образом, а закономерно координированы друг с другом, можно допустить, что если два объекта сходны в каком-то существенном отношении, то они могут быть сходны и в другом отношении.

Отсюда, естественно, возникает новый вопрос: какова природа отношения между моделью и оригиналом. Исследование отношения между моделью и оригиналом представляет значи-

тельный интерес при характеристике гносеологической природы моделирования. Прежде всего, между моделью и оригиналом существует отношение соответствия, которое и позволяет исследовать моделируемый объект посредством исследования модели.

Отношение оригинал–модель при этом является не природным, а социально обусловленным отношением объектов. Оно устанавливается людьми в процессе познания на основе объективно присущих оригиналу и модели свойств и отношений. Вне акта исследования существуют лишь предметы и процессы, обладающие объективно присущими им свойствами, а не модели и оригиналы. Так, некоторая техническая конструкция является кибернетической моделью лишь постольку, поскольку посредством ее исследования могут быть получены знания о некотором объекте другого рода (например, о живом организме). Вне этого акта такая конструкция может служить другим целям, которые она выполняет благодаря соответствующим свойствам ее отдельных частей и определенному типу связи между ними.

Следовательно, модель выполняет свою функцию в процессе познания лишь благодаря тому значению, которое она получает как заместитель исследуемого объекта. При этом некоторые значения получают определенные собственные свойства объекта, выступающего в роли модели. Соотнесенность модели оригиналу конкретизируется как соотнесенность некоторых свойств и отношений модели непосредственно интересующим исследователя свойствам и отношениям оригинала.

В связи с этим могут быть высказаны две точки зрения на характер оригинала и модели. Согласно одной из точек зрения, под оригиналом следует понимать не целостный объект в его качественно-количественной специфике, во всем богатстве его разнообразных свойств, связей и отношений, а лишь некоторый ограниченный комплекс этих свойств, связей и отношений, а именно – тех, которые непосредственно интересуют исследователя. Моделью в этом случае считается соответственно не весь целостный объект, замещающий оригинал в процессе исследования, но лишь тот комплекс свойств, связей и отношений этого объекта, который сходен с соответствующим комплексом, называемым оригиналом.

Согласно второй точке зрения, оригиналом является исследуемый объект во всей его целостности. Соответственно моделью считается весь целостный объект, замещающий оригинал в процессе исследования.

На первый взгляд, различие этих двух точек зрения является чисто терминологическим: все зависит от того, что назвать моделью и оригиналом. На самом деле, однако, за этим кажущимся терминологическим различием скрывается весьма существенное различие в понимании природы моделирования. Останемся на этом несколько подробнее.

Как мы уже говорили, модель – это объект, находящийся в отношении соответствия (сходства) с оригиналом. Но, с другой стороны, модель используется для получения таких данных об оригинале, которые или затруднительно или невозможно получить путем непосредственного исследования оригинала. Ясно, что для того, чтобы модель могла выполнить эту задачу, она должна быть не только *сходной* с оригиналом, но и *отличной* от него. Отличие от оригинала – обязательный признак модели. Лишь в том случае, если исследователь выбирает или искусственно создает объект, отличающийся от оригинала как раз в тех отношениях, которые препятствуют непосредственному познанию оригинала, он получает возможность обойти эти препятствия.

Таким образом, отношение модели к оригиналу противоречиво: она обязательно должна быть сходна с ним и отлична от него.

Первая из указанных нами точек зрения, однако, не дает возможности вскрыть противоречивость этого отношения. Действительно, если следовать этой точке зрения, то придется признать, что модель тождественна оригиналу или (что то же) только сходна с оригиналом.

В связи с этим нам представляется, что вторая точка зрения предпочтительнее первой, она более конструктивна и позволяет правильнее понять природу моделирования.

В основании моделирования лежит процедура установления отношения соответствия (сходства) между исследуемым объектом и некоторым другим объектом. Эта процедура основывается на предварительном исследовании как оригинала, так и модели. Как замечает Л. Апостель, «только когда системы ча-

стично известны, появляется нужда в моделировании». Действительно, надобность в моделировании, которое является опосредствованным методом исследования, может появиться лишь в том случае, если методы непосредственного изучения объекта не дают эффективных результатов.

При всех изменениях в модели сохраняется неизменным хотя бы одно из свойств, сходных с соответствующим свойством оригинала. Наличие этого инварианта и позволяет одному из объектов выполнять роль заместителя другого. С другой стороны, модель должна хотя бы одним из своих свойств отличаться от оригинала.

Необходимость сохранения в модели неизменными некоторых свойств и отношений, характеризующих оригинал, наряду с необходимостью изменения в ней в сравнении с оригиналом хотя бы одного из них сделала насущной постановку вопроса о степени соответствия модели оригиналу и его формальном выражении. Понятие соответствия обычно принимается исследователями без определения. Наличие отношения соответствия между двумя множествами позволяет для каждого из элементов одного множества указать некоторый элемент другого, который будет соответствовать элементу первого множества. Так, например, выбрав какой-либо из дней года, мы можем поставить ему в соответствие определенный листок отрывного календаря.

Естественно, что в таком исследовании условия соответствия формулируются с недостаточной полнотой и точностью. Моделирование, основанное на такого рода соответствии модели оригиналу, применяется больше всего в тех областях науки, где исследование ведется пока на качественном уровне. Примером могут служить некоторые отрасли биологической науки. Так, здесь широко используется метод исследования законов жизнедеятельности организма посредством культуры ткани. Суть этого метода состоит в том, что живые клетки отделяются от организма и помещаются в искусственные условия, облегчающие процесс исследования.

Уже на этапе установления связей соответствия качественных характеристик объектов существует возможность поставить в соответствие выделенным для изучения элементам и отношениям оригинала определенные элементы и отношения модели.

Дальнейшему уточнению характера соответствия модели оригиналу способствует углубление исследования как моделируемого объекта, так и модели. С развитием и углублением исследования осуществляется переход от качественного этапа науки к ее количественному этапу, на котором возрастает роль точных методов. Этот переход является причиной возрастания внимания к математическим методам исследования. Математика сейчас все шире используется в таких областях науки, как биология, психология, лингвистика, педагогика и т. д. Удовлетворение новых требований, выдвигаемых обществом перед современной наукой, обуславливает все большее использование математики в этих и многих других областях исследования. Внедрение математических методов приобрело такой размах, что стало возможным говорить о математизации как об одной из характерных черт развития науки. Наука, как отмечал К. Маркс, «только тогда достигает совершенства, когда ей удается пользоваться математикой».

Благодаря математизации науки стала возможной разработка точных методов характеристики соответствия объектов в процессе моделирования. Случаи, с которыми встречается исследователь, при этом достаточно многообразны. Так, если элементу x множества M соответствуют элементы y_1, y_2, y_3 множества M' , а элементам y_1, y_2, y_3 множества M' соответствует элемент x множества M , то мы имеем много-однозначное соответствие, или гомоморфизм. Существует также ряд других случаев соответствия, поддающихся математическому описанию.

Особое значение для моделирования имеет случай, при котором любому объекту x одного множества соответствует один и только один объект y другого множества, а этому последнему (y) соответствует один и только один объект x первого множества. В данном случае имеется взаимнооднозначное соответствие элементов одного множества элементам другого множества. Два множества M и M' при этом изоморфны относительно отношений R и S , которые определены соответственно на M и M' , если существует некоторая функция F , такая, что каждый элемент множества M соответствует одному и только одному элементу множества M' , и если между какими-то элементами множества

М существует отношение R , то соответственные элементы множества M' находятся в отношении S , и наоборот.

Наличие изоморфизма модели и исследуемого объекта является важным фактором, обеспечивающим успешность получения данных о последнем посредством изучения модели. Здесь соответствие элементов и отношений модели элементам и отношениям оригинала приобретает точный, достаточно строгий характер.

Однако положение об изоморфизме модели и оригинала необходимо уточнить в двух отношениях.

Во-первых, сам термин «изоморфизм» буквально означает «одинаковость формы, структуры». Обращение к этому буквальному переводу слова «изоморфизм» при характеристике отношений модели и оригинала приводит некоторых авторов к иллюзии, будто объект-модель и объект-оригинал должны всегда быть тождественны по своим структурам. Эта точка зрения чересчур суживает понятие изоморфизма, сводя его к характеристике определенного соответствия лишь структурных отношений.

Мы уже говорили о связи образа и модели, показав, что целью моделирования является развитие и конкретизация образа моделируемого объекта. Иными словами, в этом случае моделирование и образ связывались как некоторое средство познания и полученный с его помощью результат. Однако связь между ними этим не ограничивается. Дело в том, что образ не только результат, но и необходимая предпосылка моделирования. Моделирование предполагает предварительное более или менее глубокое и разностороннее исследование оригинала, т. е. формирование некоторого образа этого объекта в сознании познающего субъекта. Процесс моделирования невозможен также, если нет образа объекта, выступающего в качестве модели. Вместе с тем в сознании исследователя с необходимостью должен создаваться и образ отношения модель – оригинал, что является основой установления соответствия между некоторыми элементами и отношениями модели и элементами и отношениями оригинала.

То, что модель не является образом оригинала, вытекает уже из самой природы метода моделирования. Являясь средством получения новых знаний (образов), модель представляет собой специфическое орудие опосредствованного изучения объ-

ектов действительности. Модель выполняет свою роль, замещая в исследовании моделируемый объект тогда и постольку, когда и поскольку непосредственное получение данных (т. е. образов) об интересующей нас стороне объекта не представляется возможным. Иначе говоря, мы прибегаем к помощи модели в тех случаях, когда мы не имеем образа этой стороны объекта. В том же случае, когда у нас есть образ интересующей нас стороны объекта, модель попросту не нужна.

Различия между моделью и образом некоторого объекта выявляются при сопоставлении связи модели и оригинала, с одной стороны, и связи образа и объекта, образом которого он является, – с другой. Прежде всего, образ всегда идеален, модель же может быть как идеальной, так и материальной.

В акте моделирования в роли модели может выступать некоторый объект, не связанный с оригиналом каким-либо типом причинно-следственных отношений. Он лишь сходен с некоторой другой системой, которую и замещает в процессе познания. Объект, выбранный в качестве модели, мог возникнуть под влиянием совершенно иных факторов, чем объект, являющийся оригиналом. Раз возникнув независимо от объекта А, объект В затем может быть включен в процесс познания объекта А в качестве его заместителя, и тогда объект В начинает выполнять функции модели. Однако ни до этого включения в процесс познания, ни после него объект В не является образом объекта А. Вне процесса познания объект, выбираемый в качестве модели, может существовать совершенно самостоятельно по отношению к оригиналу. Он лишь используется (в естественном виде или после некоторого оперирования с ним) исследователем, который (правда, на основе объективно присущих этому объекту и оригиналу свойств) устанавливает соответствие модели моделируемому объекту. В общем случае оригинал причинно не обуславливает структуру и закономерности развития модели.

1.2. Моделирование и абстрагирование

В процессе моделирования от установления отношений сходства между одними элементами модели и оригинала переходим к установлению отношений сходства между другими

элементами оригинала и модели. Именно наличие такого перехода и дает возможность получать новые данные об оригинале, о тех его свойствах, связях и отношениях, которые на начальной ступени моделирования были еще не известны исследователю.

Моделирование это теоретико-познавательная процедура, осуществляемая на основе абстрактно-логического мышления, независимо от того, идет ли речь об эмпирическом или теоретическом познании. Модель – объект, исследование которого является средством познания иного объекта. Знания, полученные относительно модели, не имеют самостоятельного значения в процессе познания, они должны всегда еще интерпретироваться, «переноситься» при помощи некоторых процедур и тем самым стать знанием об интересующем исследователя объекте. В связи с этим мы остановимся на анализе тех мыслительных операций, которые делают возможным сам процесс моделирования.

Мы будем исходить из того, что в процессе моделирования одной из наиболее существенных мыслительных операций является абстрагирование. Что же собой представляет абстрагирование? Каковы его объективные предпосылки и гносеологическая роль в моделировании?

Явления объективного мира, с которыми человек сталкивается в процессе своей практической деятельности, обладают бесконечным числом свойств и отношений. Процесс абстрагирования связан с тем, что человек рассматривает не всю бесконечную совокупность их, а только часть и притом весьма незначительную. Ограничение области исследуемых свойств и отношений явлений объективного мира обусловлено особенностями самих объектов, известной ограниченностью возможностей человека, а также потребностями трудовой практической деятельности и теми целями, которые ставит перед собой человек в процессе познания. Прежде всего следует отметить, что человек уже в силу особенностей своей физиологической организации не в состоянии охватить бесконечное разнообразие свойств того или иного объекта. Действительно, если в качестве модели будет выбран объект того же класса индивидов, что и исходный, то не будет преодолена ни (1), ни (2) трудности, и исследователь окажется не в лучшем положении, чем первоначально. Наличие материального единства мира, единство закономерностей, дей-

ствующих в самых различных областях природы, позволяет применять знания, полученные при исследовании одной области действительности, к другим областям при условии предварительного установления тождества.

Совмещение одновременного требования тождества и различия между оригиналом и моделью оказывается возможным в следующем отношении. Пусть нам дан объект-оригинал А и объект-модель В. А и В являются *разными* объектами. Благодаря абстрагирующей деятельности мы формируем абстрактный объект А' из А и В' из В. Для того чтобы В могло выполнить функцию модели, необходимо, чтобы А' и В' находились в отношении типа равенства (например, были бы изоморфны). Таким образом, два объекта оказываются и тождественными и различными и тем самым могут выполнять роль модели по отношению друг к другу.

Для того чтобы знания, полученные на основе исследования модели, получили статус знаний об оригинале, сама абстракция отождествления должна приобрести достаточно более четкую и точную форму. Уточнением абстракции отождествления может служить понятие изоморфизма, как оно формулируется в математике. К моделям можно (как правило, это и делается) предъявлять и менее сильное требование тождества – отношение гомоморфизма. Специфической формой абстракции отождествления при физическом моделировании служит отношение подобия, определяемое в теории подобия. Наиболее простым средством построения модели (или ее выбора) является изменение условий существования или функционирования оригинала. Таким путем создаются так называемые физические модели. Изменение условий может быть выражено в изменении пространственных и временных параметров. Моделирование жизнедеятельности организма может быть осуществлено при помощи создания искусственных условий существования. В таких случаях абстракция отождествления, позволяющая осуществить процедуру моделирования, основана в первую очередь на установлении тождества субстрата, носит в значительной степени качественный характер и в силу «привязанности» к оригиналу, не дает возможности познать наиболее общие закономерности объекта или, по крайней мере, из всей совокупности ис-

следуемых закономерностей выделить наиболее общие. Однако именно такой вид моделирования и исторически, и логически оказывается исходным.

На более высоком уровне абстракции отождествления осуществляется моделирование функций и структуры оригинала, независимо от вещественного воплощения, как оригинала, так и модели. Такого рода моделями могут служить электрические модели для механических систем, электронно-вычислительные схемы для моделирования нейрофизиологических процессов, модели восприятия, логических процедур и т. д., выполненные на основе современного радиоэлектронного оборудования. Ключ к анатомии обезьяны лежит в анатомии человека. Точно так же можно было бы сказать, что наиболее полное понимание того, что собой представляют модели, возможно при анализе достаточно развитых форм моделирования. Дело в том, что при абстракции отождествления, произведенной на качественном уровне, не выявляется четко суть моделирования, остается в тени роль абстрагирующей деятельности мышления. В тех же случаях, когда модель качественно отличается от оригинала по своему субстрату, естественно, возникает вопрос: до какой степени произведена абстракция, каков уровень отождествления. По существу именно с такой постановкой вопроса мы сталкиваемся в книге У. Р. Эшби «Введение в кибернетику». «Модель, – пишет он, – редко бывает изоморфна биологической системе; обычно она лишь гомоморфна ей. Но и сама модель редко рассматривается во всех своих практических деталях: обычно лишь некоторые *аспекты* модели соотносятся с биологической системой.

Алгоритм – точное предписание о выполнении в определенном порядке некоторой системы операций над исходными объектами. В результате применения алгоритма мы из исходных объектов получаем новый объект (может быть, что *новый* объект является одним из исходных). В таком случае говорят, что алгоритм перерабатывает объект (совокупность объектов) U в объект B .

Задача могла бы быть тривиальной, если для такой переработки требовалось бы небольшое (по сравнению с жизнью человека) время. Однако в случаях, когда число элементарных операций достаточно велико и потенциально не ограничено, такую

переработку непосредственно осуществить невозможно, но, тем не менее, свойства потенциально осуществимого объекта необходимо исследовать. В таком случае сам алгоритм становится предметом исследования. Свойства алгоритма становятся моделью исследуемого объекта. Поскольку алгоритм всегда задается как некоторый конечный объект, то по этому конечному можно изучать свойства бесконечного.

Таким образом, всякая процедура моделирования неизбежно основана на том или ином виде абстракции и вне неё не может быть осуществлена. При решении задачи перенесения знания о модели на объект всегда требуется выяснить, какая абстракция была предварительно использована. От этого в значительной мере зависит характер логических процедур «переноса» знания.

Одной из мыслительных процедур, сопровождающих процесс моделирования, является идеализация. Идеализация приводит к созданию таких объектов исследования, как «идеальный газ», «идеальная жидкость», «абсолютно упругое тело», «абсолютно черное тело», «точка», «прямая» и т. д. Очевидно, без абстрагирования такие объекты не могут быть сформированы в процессе познания.

1.3. Структура процесса моделирования

Анализ структуры процесса моделирования, исследование основных его этапов, роли каждого из них и их взаимосвязей представляет большой интерес при изучении гносеологической природы и методологического значения моделирования. Несмотря на это, в литературе данной проблеме не уделяется достаточного внимания. Рассмотрение же ее может оказаться полезным как для философов, так и для исследователей, работающих в тех весьма разнообразных отраслях научного знания, где методы моделирования получили большое распространение.

Процесс моделирования предполагает: 1) субъект, в определенных целях исследующего закономерности предметов или процессов природы, общества или мышления; 2) объект исследования; 3) модель, опосредствующую отношения познающего субъекта и познаваемого объекта.

Процесс моделирования начинается с постановки исследователем задачи, решение которой и должно быть получено посредством использования модели. При этом он не ограничивается выделением определенного объекта для изучения. Любой объект неисчерпаем в своих свойствах и отношениях. Исследователь не может изучать сразу все бесконечное богатство содержания объекта. В соответствии с конкретной задачей он должен выделить некоторые свойства и отношения, исследование которых может привести к достижению цели.

На данном этапе рассматриваемый объект изучается лишь под определенным углом зрения, т. е. более или менее односторонне. Следствием такого положения и является выделение некоторой структуры свойств и отношений познаваемого объекта, которая фактически представляет предмет дальнейшего изучения.

После определения предмета изучения перед исследователем возникает необходимость расширения знаний о нем. Характер его деятельности на этом этапе определяется задачей, поставленной перед ним развитием общественно-исторической практики и логикой научного познания. Исследователь, прежде всего, актуализирует прежний опыт изучения объекта, а затем продолжает анализ, используя в этих целях разнообразные и непрерывно совершенствующиеся методы.

Одним из них является наблюдение, посредством которого устанавливаются некоторые свойства познаваемого объекта. Результаты наблюдения определяются не только свойствами объекта, но и зависят и от подготовленности исследователя, его активности в достижении намеченной цели.

От наблюдения исследователь переходит (насколько это возможно) к экспериментированию с изучаемым явлением. Проводя эксперимент, он уже активно вмешивается в течение процессов с целью выделения интересующих его свойств и связей и при этом в соответствии с поставленной задачей может изменять естественный ход процесса. Само это изменение не есть нарушение законов природы, просто в новых, созданных экспериментатором условиях законы действуют иначе. При оперировании с объектом важнейшее значение имеет теоретическое мышление, посредством которого изучаются глубинные, существенные свойства и отношения объектов.

Полученная в результате эмпирического и теоретического исследования информация фиксируется в некотором языке. При этом используются не только естественные языки, но и искусственные, интенсивно разрабатываемые во многих отраслях науки. Средствами этих языков могут быть зафиксированы не только характеристики реально существующих объектов, но и объектов, только еще проектируемых. Ценность зафиксированного в языке содержания на данном этапе, естественно, определяется ценностью результатов, полученных при возможном непосредственном изучении интересующих исследователя областей действительности.

В описании объект фиксируется лишь с некоторой его стороны, ибо на каждой данной ступени развития науки абсолютно полное и всестороннее познание его невозможно. Исследователь абстрагируется от бесконечной сложности конкретного объекта, идя тем не менее по пути все более полного познания действительности. «Мышление, — указывает В. И. Ленин, — восходя от конкретного к абстрактному, не отходит — если оно *правильное... от истины*, а подходит к ней. Абстракция *материи*, закона природы, абстракция *стоимости* и т. д., одним словом *все* научные (правильные, серьезные, не вздорные) абстракции отражают природу глубже, вернее, *полнее*».

В процедуре абстрагирования и обобщения находит выражение прошлый личный и общественный опыт исследователя, содержание которого фиксируется в языковой системе, выражающей предварительное знание об исследуемом объекте. Результаты изучения объекта, зафиксированные в его описании, могут обнаружить невозможность или затруднительность решения путем непосредственного оперирования с объектом задачи, поставленной в начале исследования. Чтобы разрешить эти трудности исследователь в процессе познания создает опосредствующее звено — модель. К рассмотрению этого этапа процесса моделирования мы сейчас и переходим. В процессе моделирования исследователь от предварительного изучения объекта, описания его и констатации наличия указанных трудностей переходит к созданию или выбору такого объекта (из числа более легко поддающихся исследованию), на основе изучения которого можно было бы получить интересующие его данные о пер-

вом объекте. Поиск заместителя оригинала возможен как на интуитивной основе, так и на строго логических основаниях.

Интуитивный путь поиска модели, очевидно, имеет место в науке.

Осознанный поиск модели исходит из возможности использования в этой роли объекта, аналогичного в каком-то определенном отношении оригиналу. Желательно при этом наличие аналогии именно тех свойств и отношений, которые являются в данном случае предметом изучения. Полезной, однако, может оказаться и аналогия в некотором другом отношении.

Аналогия является особенно ценной, когда условия ее сформулированы достаточно четко и определенно. Степень этой четкости в каждом конкретном случае может быть весьма различной: от математически описанной до основанной лишь на некотором качественном подобии свойств объектов. Смутность аналогии не является, однако, свидетельством ее бесплодности.

Присущая объектам вне и независимо от процесса познания аналогия каких-либо их определений выражается в описании, конкретная форма которого зависит от избранного исследователем языка. Аналогичность, а часто тождественность описания является следствием и выражением объективно присущего предметам и процессам сходства в каком-либо отношении. При этом в остальном объекты могут весьма радикально отличаться один от другого. Касаясь этого факта, академик А. Н. Крылов писал: «Таких аналогий между вопросами совершенно разных областей, но приводящих к одинаковым дифференциальным уравнениям, можно привести множество. Казалось бы, что может быть общего между расчетом движения небесных светил под действием притяжения к солнцу и между собою и качкой корабля на волнении. Между тем, если написать только формулу и уравнения без слов, то нельзя отличить, какой из этих вопросов решается: уравнения одни и те же». Немногими типами уравнений математической физики описывается поведение огромного множества предметов и процессов. В «поразительной аналогичности» дифференциальных уравнений, как отмечал В. И. Ленин, обнаруживается единство природы.

Поиск и создание модели предполагает предварительное осознание ее общей схемы, после чего исследователь переходит

непосредственно к использованию метода моделирования. Существенным этапом в этом процессе является установление аналогичности различных явлений, которое имеет большое эвристическое значение, ибо облегчает выбор или создание модели. В процессе моделирования исследователь, однако, не ограничивается констатацией факта аналогичности объектов в некотором отношении. От нее он затем переходит к рассмотрению одного из объектов в качестве заместителя другого. В этом случае мы и говорим о моделировании.

Выбор в качестве модели объекта, принадлежащего к некоторому множеству объектов, аналогичных в определенном отношении оригиналу, не есть совершенно произвольный акт познающего субъекта. Он (этот выбор) зависит от ряда факторов, в том числе от уровня развития науки, конкретной задачи исследования, специфики объекта.

«В прошлом столетии многие ученые искали аналогии новым и мало изученным в то время электрическим явлениям в области более изученных и известных им механических, гидравлических и тепловых явлений. В наши дни постановка задачи изменилась, и мы ищем в электротехнике аналогии других физических явлений».

Установив аналогичность объектов, исследователь имеет возможность затем в зависимости от характера исследования сопоставить элементы, свойства и отношения оригинала с различными элементами, свойствами и отношениями модели. В соответствии с этим в науке и разрабатываются различные системы аналогий. Так, например, разработаны четыре системы электротепловых аналогий. В одной из них тепловое сопротивление сопоставляется с электрическим сопротивлением, в другой – с электрической проводимостью, в третьей – с емкостью, в четвертой – с индуктивностью; теплоемкость сопоставляется соответственно с емкостью, индуктивностью, сопротивлением, проводимостью и т. д.

Устанавливая сходство между нетождественными объектами, ученый при этом абстрагирует сходные характеристики объекта от всей конкретности его свойств и отношений. При моделировании, следовательно, в оригинале выделяются связи и отношения, которые должны быть предметом изучения, и уста-

навливается аналогичность некоторых его свойств и отношений свойствам и отношениям модели. Подобным же образом абстрагируются некоторые свойства и отношения другого объекта, и устанавливается их аналогичность некоторым характеристикам оригинала. При этом устанавливается, какие свойства должны быть исследованы, чтобы получить необходимую информацию об оригинале. Процесс создания модели сопровождается поэтому двойной идеализацией: моделируемого объекта и второго, чье исследование должно расширить и углубить знания об оригинале. Лишь благодаря этому возникает возможность получения посредством моделирования данных об исследуемом объекте, которые затруднительно, а то и вовсе невозможно получить путем его непосредственного изучения.

Все сказанное свидетельствует о ведущей роли теоретического мышления в процессе создания модели. Это выражается уже в том, что многие из моделей, сыгравших большую роль в развитии науки, были созданы как идеальные конструкции и никогда никто не претендовал на их материальную реализацию.

Значение теоретической деятельности на этапе создания модели не ограничивается вышесказанным. Всякая материальная конструкция может быть создана и может играть затем роль модели лишь после некоторой (более или менее серьезной) теоретической работы. Это остается в силе даже тогда, когда для получения знаний об оригинале используются естественно существующие объекты, а не результаты трудовой деятельности человека. При использовании естественно существующих объектов в роли моделей исследователь мысленно выделяет такие объекты из всей совокупности их связей, и в этом случае его деятельность по созданию модели вряд ли принципиально отличается от деятельности по созданию идеальных моделей.

Часто, однако, задачи, поставленные в исследовании, не могут быть решены лишь теоретическими средствами или с помощью естественных объектов, существующих вне и независимо от человеческой деятельности. В этом случае создается искусственная материальная модель. Процесс этот реализует предшествующий ему идеальный процесс конструирования модели. Диалектическая связь идеального плана деятельности

субъекта и создания материальной модели выявляется не только в том, что теоретическая деятельность – необходимое условие создания материальной модели. Она проявляется и в том, что в процессе материальной реализации модели идеальный план развивается и конкретизируется.

При моделировании исследователь создает объект, в котором интересующие свойства и отношения оригинала могут быть изучены проще, чем при непосредственном его рассмотрении. Объект как бы освобождается от связей и отношений, затрудняющих его познание. Требование простоты является немаловажным при создании модели. Оно, однако, не должно трактоваться поверхностно и односторонне – лишь как требование простоты конструктивной. Понимаемая таким образом простота еще отнюдь не достаточна, хотя и может иметь значение при прочих равных условиях для предпочтения одной из моделей другой. Мы понимаем простоту как большую доступность модели изучению или возможность получения с ее помощью таких данных, которые не могут быть получены путем непосредственного изучения оригинала.

Понятая таким образом простота является существенным доводом в пользу целесообразности использования одного из объектов для получения знаний о другом.

В этом плане должен быть рассмотрен вопрос о том, какая степень воспроизведения в модели свойств оригинала является наиболее целесообразной в каждом конкретном случае. При этом возникает проблема, суть которой станет ясной из сопоставления двух высказываний. «Допустим, модель асимптотически приближается к сложности оригинала. Она будет иметь тенденцию к тому, чтобы стать идентичной оригиналу. В пределе она станет самой этой системой. Характерный пример: лучшей материальной моделью кота является другой, или предпочтительно тот же самый кот. Другими словами, если материальная модель до конца реализует свои цели, оригинальную ситуацию можно понять полностью и модель будет не нужна». Однако, как отметил другой зарубежный автор, «слишком отдаленная модель вводит в заблуждение». Решение этой проблемы лежит, по-видимому, на путях создания моделей, которые, не повторяя всех особенностей оригинала, давали бы возможность изучения

тех его свойств, которые интересуют исследователя. Такой подход иногда реализуется посредством использования в модели некоторых элементов системы-оригинала. Здесь, правда, можно отметить, что в работах, посвященных конкретным вопросам создания моделей в отдельных отраслях научного знания, мы встречаемся с одной терминологической неточностью, которая иногда может помешать правильному пониманию и процесса создания материальных моделей, и даже природы научных моделей вообще. Часто в этих работах моделью называют лишь элементы оригинала, а не систему этих элементов и устройств, моделирующих внешние воздействия на них, что, с нашей точки зрения, представляется вряд ли верным.

Модели, включающие элементы исследуемого объекта, должны включать и устройства, осуществляющие воздействия на эти элементы, сходные с воздействиями в оригинале. Исследователь работает с целостной системой, включающей в себя элементы оригинала; получаемые при этом новые знания относятся именно к ней. Поэтому логичнее считать моделью всю систему, а не элементы оригинала в отдельности.

Рассмотренный частный случай демонстрирует важную общую особенность создания модели – возможность использования при этом различных аналогий при конструировании разных элементов одной модели. Эти различия выдвигают проблему организации модели как целого, сочетания отдельных ее элементов, ибо, лишь решив ее, ученый может использовать модель в процессе познания.

Заканчивая рассмотрение процесса создания модели, необходимо отметить, что уже на этом этапе возможно решение многих важных задач. Новые возможности в этом направлении открываются на следующем этапе моделирования – при исследовании модели.

1.4. Исследование модели

На этом этапе моделирования модель, о которой ранее говорилось как о средстве познания, становится объектом исследования. При этом все действия производятся над моделью и направлены непосредственно на получение знаний об этом объ-

екте, на установление законов его развития, его свойств и отношений. Исследователь наблюдает за моделью и экспериментирует с ней. Предметом его теоретического анализа непосредственно также является модель.

Изучение модели интересует, однако, исследователя не само по себе, а благодаря тому, что оно в конечном счете способно дать сведения о другом объекте (оригинале). Исследование модели является, таким образом, опосредствованным ею изучением моделируемого объекта.

В этом выявляется общественная природа модели, которая выполняет свою роль в познании лишь благодаря значению, приписываемому многообразным операциям над моделью (равно как и самой модели и ее элементам и отношениям). Взятая же сама по себе модель является определенным материальным объектом или некоторым идеальным образованием. Любая операция с нею есть, операция с таким взятым как некоторый самостоятельный предмет или процесс объектом. Поэтому всякое исследование модели должно проводиться с учетом закономерностей, которым подчиняется существование и развитие этого объекта. Данные, полученные в результате исследования, относятся непосредственно лишь к этому объекту и лишь его непосредственно и характеризуют.

Наличие определенной соотнесенности модели исследуемому объекту и ее (модели) служебная роль в процессе познания выявляется в том, что конкретный ход изучения модели определяется задачей познания оригинала. Правда, при этом нельзя механически установить жесткого соответствия каждого этапа изучения модели и оперирования с нею каждому этапу исследования оригинала. Соответствие программы изучения модели программе исследования оригинала, несомненно, существует, однако оно столь же несомненно имеет обобщенный характер. Это связано не в последнюю очередь с тем, что модель, выполняя в исследовании функцию замещения оригинала, вне него представляет вполне самостоятельный объект со свойственными ему закономерностями. Свойства модели могут быть изучены лишь адекватными ее природе методами.

Различия в свойствах модели и оригинала позволяют проводить с помощью модели исследования, которые нельзя выполнить

на оригинале. Различия между моделью и оригиналом как раз и вызваны необходимостью абстрагироваться от свойств оригинала, делающих невозможным его непосредственное изучение.

Эти различия делают возможным применение при исследовании модели таких методов и такой аппаратуры, которые ранее не могли быть использованы. Важными преимуществами исследования модели является наличие возможности задавать *различный масштаб времени и повторять многие явления*, интересующие исследователя. При этом объекты, являвшиеся ранее лишь *объектами наблюдения*, благодаря моделированию становятся *объектами экспериментирования*.

Исследование свойств объекта посредством оперирования моделью облегчается благодаря их «освобождению» (сначала в сознании субъекта, а затем при надобности и на практике) от затрудняющей их изучение конкретности, от влияния других его характеристик. Отличия модели от оригинала могут, однако, явиться причиной получения в результате исследования сведений, искажающих подлинный характер закономерностей моделируемого объекта. Отсюда и возникает потребность уже в ходе исследования модели сопоставлять некоторые из полученных результатов с данными об оригинале. Эта потребность становится определяющей на следующем этапе моделирования – при перенесении полученных с помощью модели данных на оригинал. В изложении проблем моделирования мы постоянно подчеркивали тот факт, что знания, получаемые при исследовании модели, относятся прямо и непосредственно лишь к тому объекту, который изучается в качестве модели. Только этот объект непосредственно и может быть при этом охарактеризован. Исследователя, однако, интересует не модель как таковая и не ее свойства, а свойства и отношения другого объекта (оригинала), который и замещается моделью в процессе исследования. Именно поэтому и возникает вопрос о необходимости «перевода» знаний о модели в знания об оригинале.

В процессе познания модель выполняет свои функции именно благодаря наличию возможности перенесения полученных посредством ее знаний на оригинал. Каковы логические основания этой операции?

Рассматривая процесс переноса знаний, А. А. Зиновьев и И. И. Ревзин приходят к выводу, что ответ на поставленный вопрос дается анализом понятий соответствия и интерпретации. Такая точка зрения представляется нам заслуживающей серьезного внимания, так как она не останавливается лишь на констатации аналогичности свойств модели и оригинала. Именно благодаря наличию определенного *соответствия* элементов и отношений модели элементам и отношениям оригинала существует возможность переноса знаний.

Связи соответствующих элементов и отношений одного множества (модели) с элементами и отношениями другого множества (оригинала) устанавливаются исследователем в процессе моделирования. Основой установления их являются объективные свойства элементов и отношений обоих множеств, которые и отражаются в сознании субъекта. Эти связи общественны по своей природе, ибо вне деятельности человека существуют лишь объекты, обладающие некоторыми свойствами, и их объективные связи, например, причины и следствия.

Такая постановка вопроса противоположна как метафизически-созерцательному подходу к характеристике связей соответствия, так и субъективистски-идеалистической трактовке этой недостаточно разработанной проблемы. Первый подход учитывает лишь объективные свойства оригинала и модели и игнорирует активную деятельность познающего субъекта в процессе установления такого рода связей. Субъективно-идеалистическая точка зрения, с другой стороны, игнорирует объективную основу связей элементов и отношений оригинала и модели и базируется на преувеличении значения деятельности исследователя, характеризуя процесс установления этих связей как акт творческого произвола. Процесс этот рассматривается как упорядочение чувственного многообразия.

Определяемые свойствами оригинала и модели и характером деятельности познающего субъекта эти связи (наличие которых обуславливает саму возможность моделирования), в свою очередь, определяют правила переноса знаний, полученных с помощью модели, на моделируемый объект. Конкретное их содержание определяется, в конечном счете, характером аналогии, положенной в основу при создании модели. Правила пе-

реноса знаний с модели на оригинал – это, с точки зрения внешнего выражения знания, правила перевода высказываний о модели в высказывания об оригинале. Последние есть вывод из конъюнкции высказываний о модели и правил перевода информации о модели в информацию об оригинале. Эвристическое значение моделирования проявляется в том, что в результате констатации наличия ряда общих свойств у модели и оригинала исследователь приписывает оригиналу некое новое свойство, обнаруженное при исследовании модели. Логической формой такого вывода является умозаключение по аналогии. На основании принадлежности модели S свойств $a_1, a_2, \dots, a_n, a_{n+1}$ и принадлежности оригиналу S' свойств $a_1, a_2, \dots, a_n$, делается вывод о том, что обнаруженное в модели свойство a_{n+1} также принадлежит оригиналу S' .

При этом от рассмотрения свойств и отношений, которые интересовали исследователя на предыдущих этапах моделирования, совершается переход к изучению новых свойств и отношений. Посредством такого перехода расширяется предмет исследования. Такое расширение может быть весьма плодотворным, ибо при этом увеличиваются возможности для получения знаний о моделируемом объекте.

Рассматриваемый случай есть случай расширения предмета исследования и повышения благодаря этому познавательной ценности модели. Однако такое расширение должно проводиться с достаточной осторожностью, ибо в противном случае возможно получение неадекватных исследуемому объекту данных. В литературе по философским проблемам моделирования и логике неоднократно уже отмечалось, что данные, полученные этим способом, имеют вероятностный, а не достоверный характер, и указывались пути повышения их вероятности. Среди них – установление возможно большего количества общих свойств модели и оригинала, увеличение степени их существенности, поиски как можно большего числа признаков, однотипных с переносимым, и повышение специфичности общих признаков. Пользуясь методом моделирования, исследователь должен иметь в виду качественно-количественную специфику моделируемого объекта и учитывать ее при переносе знаний с модели на оригинал. Данные, получаемые при этом, имеют не

только вероятностный, но очень часто и вполне достоверный характер, благодаря чему моделирование и получает все более широкое распространение. Вопросы исследования точности получаемых данных привлекают пристальное внимание ученых, работающих в различных отраслях науки. Полученные при этом результаты представляют известный методологический интерес и могут быть объектом философского исследования.

После констатации того факта, что степень вероятности получаемых в процессе моделирования данных различна, необходимо обратить внимание на факторы, от которых зависит точность результатов, получаемых посредством моделирования. Среди этих факторов отметим степень адекватности описания объекта в терминах избранного исследователем языка.

Методологические принципы, которыми руководствуется исследователь, его опыт и теоретические знания, равно как и уровень развития науки вообще, определяют, насколько существенные связи и отношения объекта были выделены для их описания и последующего изучения посредством моделирования и насколько точно были они зафиксированы средствами языка. Немаловажное значение имеет и то, насколько определяют развитие объекта факторы, от которых исследователь абстрагировался. Влияние это может изменяться от совершенно незначительного до такого, которое коренным образом меняет характер связи между существеннейшими свойствами объекта.

Успешность моделирования решающим образом зависит от того, насколько удачно была выбрана или сконструирована модель. При этом необходимо иметь в виду и характер соответствия модели оригиналу, и степень изученности модели, и удобство оперирования с ней. На точность результатов моделирования оказывает влияние и изменение качественных или количественных характеристик процесса в связи с изменением некоторых параметров в модели сравнительно с оригиналом. Даже простое увеличение или уменьшение линейных размеров объекта в модели способно изменить ход моделируемого процесса («масштабный эффект»). Погрешность может быть вызвана как особенностями самой модели (например, при моделировании непрерывного дискретным), так и средствами ее исследования, которыми пользуется моделирующий субъект.

Ошибка, наконец, может быть вызвана и ошибочной интерпретацией результатов исследования модели. На этом этапе моделирования она является следствием неправильной оценки полученного при исследовании модели результата в терминах высказываний об оригинале. В процессе переноса данных с модели на оригинал необходимо постоянно учитывать специфику последнего, ибо в противном случае существует опасность соскальзывания на позиции метафизической «методологии сведения». Наличие этой опасности, однако, не должно рассматриваться в качестве основания для попыток *a priori* ограничить сферу применения моделирования, хотя такие попытки подчас имеют место.

Подводя итог характеристике структуры процесса моделирования, отметим, что первым его этапом является актуализация уже накопленных об оригинале знаний, зафиксированных в описании моделируемого объекта. Далее констатируется невозможность изучения непосредственным образом интересующего исследователя объекта для получения определенных знаний.

Вторым этапом является выбор модели из числа существующих объектов, более легко поддающихся изучению. Если такой объект выбрать затруднительно или невозможно, то модель создается искусственным путем. На следующем этапе проводится исследование модели. Для того чтобы модель могла выполнить роль средства изучения оригинала, данные, полученные при ее исследовании, должны быть на следующем этапе моделирования перенесены на оригинал. Акт моделирования завершается проверкой истинности полученных посредством модели данных о моделируемом объекте и включением их в систему знаний об оригинале.

Такой представляется нам обобщенная и некоторым образом усредненная структура процесса научного моделирования, взятого в его развитии. В реальном акте моделирования она может различным образом видоизменяться. Содержание каждого из этапов также может изменяться, а некоторые из них могут просто элиминироваться в конкретном исследовании. Так, подчас отпадает необходимость в специальном исследовании модели. Это может быть, например, обусловлено тем, что в качестве модели используется объект, изученный ранее с достаточной полнотой.

В основе такой изменчивости структуры конкретного процесса моделирования лежит значительное разнообразие моделей и их функций в процессе познания, что и будет продемонстрировано при рассмотрении конкретных типов моделирования и гносеологических функций моделей.

Обобщенный характер рассмотрения процесса моделирования позволяет показать конкретную его специфику как метода научного познания. Только через такое обобщение вскрывается его специфика по отношению к другим методам.

В живой практике научного познания методы исследования взаимодействуют и переплетаются. При рассмотрении частных случаев использования моделей было бы затруднительно охарактеризовать метод в чистом виде.

В современной науке метод моделей получает все большее распространение. Каковы причины этой возрастающей популярности моделирования? Они коренятся в специфических особенностях современного научного познания. Остановимся на некоторых из них.

1. Сейчас можно говорить о своеобразном изменении предмета научного исследования. Интерес ученых в соответствии с общим процессом развития общественно-исторической практики человека развивается от изучения объектов обычного повседневного масштаба к исследованию микро- и мегамира. В настоящее время внимание научных работников привлекают работы именно в этих сферах, т. к. они ведут к наиболее крупным открытиям, революционизирующим науку. Но органы чувств человека приспособлены лишь для восприятия явлений обычного человеческого масштаба, а в связи с этим и возникают проблемы не непосредственного, а опосредствованного моделью исследования.

2. Предметом исследования сейчас становятся закономерности поведения веществ и процессов при условиях, резко отличающихся от обычных условий существования человека (сверхвысокие и сверхнизкие давления и температуры), т. е. в среде, где непосредственное исследование не представляется возможным. В этих условиях моделирование предоставляет возможность получения данных о свойствах вещей и процессах опосредствованным путем.

3. Экспериментальные устройства, используемые в современной науке, увеличиваются в размерах и чрезвычайно усложняются. Для иллюстрации достаточно привести в пример оборудование современных лабораторий, изучающих проблемы ядерной физики. Непосредственная материальная реализация теоретических расчетов, которые лежат в основе экспериментов, чревата серьезным риском и опасностью непроизводительных материальных и финансовых затрат.

Модели и в этом случае могут оказаться полезными для проверки теоретических положений, которые должны воплотиться в громоздкую и дорогостоящую экспериментальную установку. Модель упрощает выявление дефектов проекта установки и упрощает совершенствование заложенных в ней принципов еще до сооружения установки в оригинале.

4. Важной особенностью современной науки является возрастание роли теории во многих ее ведущих отраслях. Науку сейчас интересуют чрезвычайно глубокие связи и отношения объективного мира, познание которых невозможно без абстракций весьма высокого уровня. В связи с этим становится понятным возрастание значения абстрактно-теоретических методов научного исследования и научных дисциплин, использующих такие методы. В науке возникли и активно разрабатываются такие абстрактные дисциплины, как теория групп, теория игр и т. д.

Насущной задачей в этих условиях является связь абстрактных систем, разрабатываемых в этих областях науки, с действительностью. Связь эта может быть осуществлена с помощью модели.

5. Но не только развитие современного научного эксперимента и самого процесса познания в целом, но и изменение характера самой общественной практики диктует необходимость использования моделирования в исследовании закономерностей и планировании развития общества. В современных условиях решение стоящих перед обществом задач возможно лишь при участии значительных масс населения, усилия которых должны быть тщательно скоординированы в масштабах всего общества. Общество при этом все более и более действует как единый организм.

Планирование развития производства (равно как и планирование других сторон общественной жизни) немислимо без моделирования, ибо оно предоставляет возможность дать строгую математическую формулировку закономерностей этого развития (подчас закономерностей очень сложных).

Только с помощью новых методов познания возможно убедить общество от опасности крупных просчетов, чреватых значительной растратой общественных ресурсов.

В связи с этим становится ясной роль моделирования в планировании производства, в исследовании всех сторон общественной жизни.

Достижения, получаемые с помощью моделирования, привлекли особое внимание с появлением наук, где этот метод используется с невиданной доселе смелостью и широтой. Укажем в этой связи на плодотворность применения моделей в кибернетике, привлечшей к себе внимание ученых, работающих в очень многих областях знания.

Отмеченные выше характерные особенности научного познания и общественно-исторической практики человека в современную эпоху вынуждают исследователей использовать в науке методы опосредствованного изучения самых различных объектов действительности. Одним из самых распространенных и плодотворных методов опосредствованного познания является моделирование.

1.5. Типы моделей

Типология объектов познания – необходимое условие всякого научного исследования. Это относится как к конкретным наукам, так и к философским исследованиям. В связи с повышением роли моделирования в качестве метода познания каждая конкретная наука так или иначе проводит классификацию моделей, используемых в данной области знания. Наиболее детальные классификации проведены в области физики, математики, математической логики, конструкторской технике. Однако существующие в конкретных науках виды деления моделей далеко не всегда удовлетворяют нуждам теоретико-познавательного анализа.

То деление моделей, которое принято в пособии, основано, прежде всего, на анализе основного вопроса философии в применении к процессу моделирования в современной науке. Как в нашей, так и в зарубежной литературе принято делить все модели на два типа: материальные и идеальные. Такое деление, естественно, является предельно широким. Цель такого деления – выяснить *природу* модели, с которой имеет дело исследователь, а затем и те познавательные возможности модели, которые определяются ее природой.

Всякая модель – материальная или идеальная, созданная самим человеком или выбранная им из материальной действительности – является продуктом деятельности человека. В этом плане о моделях материальных, так же как и идеальных, нельзя сказать, что они существуют независимо от сознания человека. Природа не производит модели, но она содержит в себе возможности процесса моделирования. Различия идеальных и материальных моделей заключены в природе их функционирования.

Характерная особенность материальных моделей состоит в том, что они функционируют по естественным законам своего природного бытия и в силу этого – независимо от деятельности человека. В качестве материальной модели может быть выбран объект, созданный самой природой. Роль человека в этом случае сводится к тому, что он изменяет условия существования объекта, дальнейшие же изменения проходят уже независимо от деятельности человека.

Отличными от такого рода моделей могут показаться модели, созданные самим человеком, например, вычислительные устройства, модели турбин, доменных печей и т. д. Однако различие в данном случае не принципиальное. Вычислительные машины строятся на основе действия определенных физических закономерностей (механических, электрических и т. д.). Вообще говоря, вычислительное устройство не вычисляет, в нем лишь протекают вполне определенные физические процессы, которые человек *рассматривает* как модель вычислительной процедуры. По законам своей физической природы функционируют и модели турбин, доменных печей и т. д. Идеальные модели, напротив, существуют лишь в деятельности людей и функционируют по законам логики¹. Идеальные модели объективны толь-

ко по своему содержанию (как отражение закономерностей реальной действительности), но субъективны по своей форме и не могут существовать вне этой субъективной формы.

Все виды материальных моделей можно было бы разбить на три класса: геометрические, физические и математические. В данной работе мы будем анализировать два последних вида. Геометрические модели (в той форме, как они употребляются в практической деятельности людей) не играют существенной роли в развитии научного знания. Как правило, они употребляются лишь в демонстративных целях. Верно, в последние годы в связи с развитием промышленных методов строительства, изготовления стандартных деталей, блоков заводским способом для строительства зданий геометрическое моделирование приобретает все большее значение в инженерной (конструкторской) практике. Но поскольку основной нашей задачей является исследование гносеологической роли моделирования в развитии научного знания, мы обратимся к так называемым физическим и математическим моделям.

Деление всех материальных моделей на физические и математические не является чем-то новым. Такое деление принято почти во всех исследованиях по моделированию литературе. Однако мы включаем в класс физических моделей более широкий круг объектов, нежели это обычно принято. Дело в том, что физическое моделирование развивалось первоначально в области технических и экспериментальных физических, а затем химических исследований. В связи с этим под физической моделью обычно понимают объект, обладающий следующими особенностями: 1) модель геометрически подобна натуре, 2) математическое описание действующей модели должно соответствовать математическому описанию объекта исследования. Таким образом, физическая модель признается только тогда моделью, когда и для оригинала и для модели существует математическое выражение их закономерностей. Однако в практике развития научных теорий эти требования не всегда осуществляются, но, тем не менее, мы полагаем, что исследователь имеет дело именно с моделью, а не с оригиналом. Для доказательства можно было бы сослаться на пример создания и исследования новых лекарственных веществ. Изучение лечебных свойств, а

также различных сопутствующих воздействий нового лекарственного вещества на организм проводится, как правило, первоначально на животных, которые выступают как модель организма человека. Таким образом, физическое моделирование может осуществляться в двух формах: при наличии математического описания оригинала и модели и соблюдении геометрического подобия и при качественной оценке аналогии между моделью и оригиналом.

Как известно, процесс моделирования зачастую связан с умозаключением по аналогии. Умозаключение по аналогии основано на обнаружении тождественного в различном: если имеется объект S , обладающий свойствами: $a_1, a_2, \dots, a_n, a_{n+1}$, и объект S' со свойствами $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$, то из этого можно сделать вывод: вероятно, что объект S' обладает свойством a_{n+1} . Физическое моделирование первого и второго рода отличаются между собой уровнем установленной аналогии, следствием чего является различие требований, предъявляемых к моделям. В ряде случаев геометрическое подобие модели и оригинала является несущественным (например, при исследовании живых организмов), кроме этого, могут отсутствовать точные количественные характеристики, как модели, так и оригинала. Аналогия, которая может в таком случае служить основанием моделирования, основывается на использовании тождественного (в большом приближении) субстрата, вещества модели и оригинала. Но повторение в модели вещественного субстрата оригинала далеко не всегда может обеспечить решение научной задачи. Так, пытаясь использовать в развитии современной техники (автоматики) особенности живых организмов – способность приспособления к окружающей среде на основе условно-рефлекторной деятельности, инженер не может воспроизвести материальный субстрат живого организма. Путь, по которому идет научное исследование – воплощение в технической конструкции подобия поведения живого организма. Оригинал (живой организм) рассматривается как «черный ящик». Под «черным ящиком» в кибернетике понимается совокупность методов по исследованию объекта, внутренняя структура которого неизвестна и не может быть непосредственно исследована. Задача исследователя заключается в том, чтобы смоделировать

внешние функции оригинала. Поскольку внешнее (функции) не может не зависеть от внутреннего (структуры), то вновь созданное устройство в какой-то степени неизбежно моделирует и структуру оригинала. Так, например, при разработке аппарата, позволяющего слепому «читать» печатный текст «на слух», было обнаружено, что чертеж аппарата напоминает схематическое изображение четвертого слоя зрительного центра коры головного мозга. Таким образом, физическое моделирование на уровне качественной аналогии позволяет в дальнейшем переходить к количественному исследованию закономерностей объекта.

Наличие количественного математического описания оригинала позволяет осуществить физическое моделирование, которое в более узком смысле слова также основано на умозаключении по аналогии. В таком физическом моделировании аналогия приобретает более строгую математическую форму: форму математической теории подобия. Поскольку теория подобия играет фундаментальную роль, как при физическом, так и математическом моделировании, мы остановимся на гносеологическом анализе теории подобия несколько подробнее.

Использование моделей в научном познании обусловлено, как известно, тем обстоятельством, что непосредственный объект исследования или трудно доступен или вообще недоступен для непосредственного исследования по своим пространственным, временным или каким-либо иным физическим параметрам. Однако отсутствие непосредственного исследования объекта не означает принципиальную невозможность его исследования. Установление общих закономерностей той или иной формы движения материи позволяет установить отношение подобия между различными процессами одной и той же физической природы. Однако установление только качественного подобия (анalogии) оказывается недостаточным. Развитие современной науки основано на количественном исследовании. Любая современная физическая теория представляет собой отображение объективно существующих закономерностей природы в некоторую систему чисел. Вне расчетной, измерительной деятельности не существует инженерная, конструкторская деятельность, ради которой, собственно, и создаются различные науч-

ные теории. Следовательно, физическое моделирование выполняет свои познавательные функции в том случае, если количественные характеристики модели могут быть использованы для количественного исследования оригинала. Это в равной мере относится и к моделям, построенным на основе качественной аналогии, но знания, полученные в этом случае, носят менее достоверный характер. Теория подобия определяет закон «переноса» количественных характеристик модели на оригинал. Поскольку не все физические параметры исследуемого объекта могут быть описаны математическим аппаратом, то и при использовании теории подобия непременно проводится умозаключение по аналогии. Однако умозаключение приобретает более опосредствованную форму. Одна из посылок такого умозаключения принципиально остается той же самой: Объект S обладает свойствами $a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_n$, где параметры $a_1, a_2, \dots, a_k$ описываются математическими уравнениями, а параметры $a_{k+1}, \dots, a_n$ известны из процедур измерения, проведенных на модели. Второе суждение строится не на основании исследования самого объекта, а на основе применения теории подобия: Объект S' обладает свойствами $a'_1, a'_2, \dots, a'_k$; свойства $a'_1, a'_2, \dots, a'_k$ определяются из данных $a_1, a_2, \dots, a_k$ с применением правил преобразования. Гипотетический вывод умозаключения по аналогии сохраняет свою предыдущую форму. Таким образом, теория подобия совместно с умозаключением по аналогии образуют ту основу, которая обеспечивает исследование и предсказание свойств и закономерностей изучаемого объекта.

Первые шаги по созданию теории подобия были сделаны уже давно. Так, уже Ньютон сформулировал одну из теорем подобия для некоторых механических процессов. Однако следует отметить, что понятие подобия физических процессов не может оставаться неизменным в ходе развития науки. Поэтому и физическое моделирование претерпевает изменения. Определение сущности физического моделирования, которое дается обычно в научной литературе, требует поэтому некоторых уточнений. Так, Б. Я. Коган, определяя смысл физического моделирования, пишет: «Физическое моделирование основано на изучении явлений на моделях одной физической природы с оригиналом. Примерами могут служить продувки моделей самолетов в аэро-

динамических трубах, замена крупного синхронного генератора синхронным генератором меньших размеров». Необходимость уточнения связана с пониманием утверждения, что модель должна быть «одной физической природы с оригиналом». Как известно, законы физики отражают процессы не отдельного, индивидуального объекта, а целого класса явлений. Чем более общая закономерность отражается в физической теории, тем более широкий круг явлений может рассматриваться со стороны подобия. Следовательно, физические явления, различные со стороны качественной, могут оказаться подобными, «теми же самыми» со стороны своих количественных характеристик. Именно это и необходимо в большинстве случаев в процессе моделирования. Так, если мы, например, хотим исследовать аэродинамические свойства нагревательной печи, то для этой цели можно использовать как воздушную, так и водяную модель. И в том и в другом случае мы имеем дело с физическим моделированием. Суть дела в процессе физического моделирования заключается в понимании тождества объектов, процессов в природе, ибо абстрактного тождества не существует. Две различные формы физического моделирования, которые нами отмечены, характеризуются разными уровнями абстракции отождествления: уровнем качественного отождествления и уровнем количественного. Использование в физическом моделировании количественного уровня абстракции отождествления, естественно, ставит перед теорией познания вопрос о познавательной ценности метода физического моделирования.

Абстракция отождествления, проведенная на уровне количественного анализа действительности, предполагает, что для исследуемого объекта существует математическое описание его закономерностей. Принципиально такие же математические закономерности должны существовать и для модели. Только в этом случае можно применять теорию подобия и использовать количественные измерения, проведенные на модели, в применении к оригиналу. Но в таком случае, какие преимущества дает модельное исследование объекта? Нельзя ли ограничиться математическим анализом, относящимся к оригиналу, не усложняя характер исследования дополнительными трудностями теории подобия? Очевидно, нельзя.

Во-первых, не все параметры исследуемого объекта, которые интересуют исследователя, описываются математическими уравнениями. Если бы дело обстояло не так, то физическое моделирование было бы явно бессмысленным и самое большее, что можно было бы сделать – воспользоваться так называемым математическим моделированием (о чем речь пойдет ниже). Именно поэтому логический ход рассуждения, связанный с физическим моделированием, основан на аппарате теории подобия плюс умозаключение по аналогии.

Во-вторых, математическое описание тех или иных физических процессов, как правило, дается в виде системы дифференциальных (интегриродифференциальных) уравнений. Эта система основных уравнений какого-либо явления или процесса включает, как правило, достаточно большое число переменных, непосредственную связь между которыми аналитическим путем установить или очень трудно или же вообще неизвестны способы установления этих связей (т. е. неизвестны методы решений данной системы уравнений). Чтобы преодолеть эти трудности познавательного характера, используют метод физического моделирования, выбирая (или конструируя) в качестве модели такой объект, в котором зависимость различных параметров можно было бы обнаружить непосредственными процедурами измерения. Затем, опираясь на теорию подобия, переносят результаты исследования на оригинал [1].

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХРАНЫ ТРУДА

2.1. Моделирование

Моделирование – один из наиболее распространенных способов изучения различных процессов и явлений. В настоящее время известны и широко используются в научных исследованиях и инженерной практике многочисленные методы и приемы моделирования. Обычно различают *физическое* моделирование и *математическое* моделирование.

При физическом моделировании модель воспроизводит изучаемый процесс (оригинал) с сохранением его физической природы. К этому виду моделирования относятся продувка моделей самолетов в аэродинамических трубах, оценка свойств гидротехнических сооружений при помощи макетов русловых потоков и т. д. Преимущества физического моделирования перед натурным экспериментом заключаются в том, что условия реализации процесса-модели могут значительно отличаться от условий, свойственных процессу-оригиналу, и выбираются, исходя из удобства и простоты исследования.

Поскольку при моделировании нет необходимости сохранять размеры сооружений, скорости течения жидкостей и газов, нагрузки на элементы конструкций и т. д., имеется возможность получить существенный выигрыш во времени и стоимости исследования. Однако условия моделирования выбираются не абсолютно произвольно. Между процессом-оригиналом и процессом-моделью должны быть сохранены некоторые соотношения подобия, вытекающие из закономерностей физической природы явлений и гарантирующие возможность использования сведений, получаемых путем моделирования, для оценки свойств процесса-оригинала.

Физическое моделирование имеет ограниченную сферу применения. Заведомо более широкими возможностями обладает математическое моделирование. Под математическим моделированием понимают способ исследования различных процессов путем изучения явлений, имеющих *различное физическое содержание*, но описываемых одинаковыми *математическими*

соотношениями. В простейших случаях для этой цели используются известные аналогии между механическими, электрическими, тепловыми и другими явлениями.

Примером такой аналогии могут служить гармонические колебания. В самом деле, пусть $\xi(t)$ – отклонение центра масс пружинного маятника от положения равновесия в момент времени t , m – его масса, а $-\psi\xi(t)$ – сила, действующая на маятник со стороны пружины (ψ – жесткость пружины). Тогда уравнение колебаний маятника имеет вид

$$m \frac{d^2 \xi(t)}{dt^2} = -\psi \xi(t). \quad (1)$$

Обозначив $\frac{\psi}{m} = \omega_0^2$ и $\xi(t) = z$, можем записать уравнение (1) в общей форме уравнения свободных колебаний

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \omega_0^2 z = 0 \quad (2)$$

Рассмотрим теперь свободные колебания в электрическом контуре. Если обозначить емкость конденсатора C , его заряд в момент времени t через $q(t)$, а индуктивность катушки L , то уравнение колебаний принимает вид

$$L \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + \frac{q(t)}{C} = 0. \quad (3)$$

Введя обозначения $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$, $q(t) = z$, придем опять к (2).

Из приведенных соотношений следует, что закономерности, свойственные колебательному контуру (например, зависимость амплитуды и частоты колебаний от его параметров L и C), можно изучать на модели, представляющей собой пружинный маятник, и наоборот.

Многие механические, электрические и тепловые явления (например, установившаяся температура и электрический потенциал скоростей при движении однородной несжимаемой жидкости и т. д.) описываются так называемым уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0. \quad (4)$$

Мы не можем здесь останавливаться на многочисленных примерах аналогий, находящих применение в практике моделирования. Существенным моментом является то обстоятельство, что при изучении любого процесса методом математического моделирования необходимо в первую очередь построить его математическое описание, или, как мы далее будем говорить, *математическую модель*. В простейших случаях, таких, как рассмотренные выше, математическая модель позволяет для данного процесса-оригинала подобрать на основании известных аналогий удобные физические процессы-модели, а также установить соотношения подобия, связывающие их параметры, без которых трудно использовать результаты моделирования для изучения процесса-оригинала. В более сложных случаях, когда для моделирования создаются специальные моделирующие установки (стенды) или используются быстродействующие вычислительные машины, математическая модель необходима для определения структуры и параметров стенда или построения моделирующего алгоритма.

Математическая модель реальной системы является тем абстрактным формально описанным объектом, изучение которого возможно математическими методами, в том числе и с помощью математического моделирования. Сложность и многообразие процессов функционирования реальных систем не позволяют строить для них абсолютно адекватные математические модели. Математическая модель, описывающая формализованный процесс функционирования системы, в состоянии охватить только основные, характерные его закономерности, оставляя в стороне несущественные второстепенные факторы.

Так, при построении математической модели пружинного маятника (1) мы интересовались движением центра его масс, пренебрегая всеми остальными изменениями в системе (деформациями пружины, тепловыми движениями молекул и т. д.), а также, ради простоты модели, и некоторыми факторами, существенными с точки зрения движения центра масс (внутренним трением в пружине, сопротивлением воздуха), считая, что искажение результатов не будет слишком заметным.

Формализации любого реального процесса предшествует изучение структуры составляющих его явлений. В результате этого появляется так называемое *содержательное описание* процесса, которое представляет собой первую попытку четко изложить закономерности, характерные для исследуемого процесса, и постановку прикладной задачи. Содержательное описание является исходным материалом для последующих этапов формализации: построения *формализованной схемы* процесса и *математической модели* для него.

Содержательное описание в словесном выражении концентрирует сведения о физической природе и количественных характеристиках элементарных явлений исследуемого процесса, о степени и характере взаимодействия между ними, о месте и значении каждого элементарного явления в общем процессе функционирования рассматриваемой реальной системы. Содержательное описание может быть составлено в результате достаточно обстоятельного изучения процесса. Зачастую изучение процесса сводится к наблюдению за ним и фиксации количественных характеристик при проведении натурного эксперимента на реально существующей аппаратуре и оборудовании. Однако не менее распространены случаи, когда требуется построить содержательное описание процессов, для которых соответствующие аппаратура и оборудование реально не существуют, а имеются только в виде проектов, технической документации или замысла конструктора. В этих случаях для составления содержательного описания процесса используются накопленный опыт и результаты наблюдения за процессами функционирования аналогичных систем с учетом особенностей исследуемой системы.

Помимо сведений, непосредственно характеризующих процесс, в содержательное описание включаются дополнительные материалы. К ним в первую очередь относится постановка прикладной задачи, определяющая цели моделирования исследуемого процесса. Она должна содержать перечень искомых величин с указанием их практического предназначения и требуемой точности. По поводу постановки прикладной задачи целесообразно заметить следующее. Содержательное описание процесса составляется, как правило, специалистами соответствующей прикладной области техники, практически без непосредственного участия математиков. Поэтому постановка прикладной задачи может и не иметь строгой математической формулировки. Однако она должна обязательно содержать четкое изложение идеи предполагаемого исследования, перечень зависимостей, подлежащих оценке по результатам моделирования, а также окончательно установить те факторы, которые должны учитываться при построении математической модели процесса. Кроме постановки прикладной задачи, в содержательное описание включаются исходные данные, необходимые для исследования: численные значения известных характеристик и параметров процесса (в виде таблиц, графиков и т. д.), а также значения начальных условий.

Содержательное описание процесса обычно самостоятельного значения не имеет, а служит лишь основой для дальнейшей формализации этого процесса — построения формализованной схемы и математической модели процесса.

Формализованная схема процесса является промежуточным звеном между содержательным описанием и математической моделью. Она разрабатывается не во всех случаях, а лишь тогда, когда из-за сложности исследуемого процесса или трудностей формализации некоторых его элементов непосредственный переход от содержательного описания к математической модели оказывается невозможным или нецелесообразным.

Формализованная схема процесса должна разрабатываться совместными усилиями математиков и специалистов соответствующей прикладной области техники. Хотя форма представления материала в ней, как и в содержательном описании, может оставаться словесной, однако она должна быть уже строго фор-

мальным описанием процесса. Для построения формализованной схемы необходимо выбрать характеристики процесса, установить систему параметров, определяющих процесс, вполне строго определить все зависимости между характеристиками и параметрами процесса с учетом тех факторов, которые принимаются во внимание при формализации. На этапе построения формализованной схемы должна быть дана точная математическая формулировка задачи исследования с указанием окончательного перечня искомых величин и оцениваемых зависимостей. Наконец, к формализованной схеме прилагается систематизированная и уточненная совокупность всех исходных данных, известных параметров процесса и начальных условий. Эти величины могут оставаться представленными таблично или графически, но должны быть полностью выяснены все вопросы, связанные с интерполяцией и экстраполяцией экспериментального материала.

Обычно содержательное описание включает сведения, достаточные для построения формализованной схемы. Однако бывают случаи, когда материал содержательного описания, относящийся к некоторым элементам процесса, не дает оснований для точного их описания. В этих случаях могут потребоваться дополнительные эксперименты или наблюдения, уточняющие представления об исследуемом процессе.

Следует подчеркнуть, что формализованная схема полностью подводит итог изучению и экспериментальному обследованию процесса. Все сведения о процессе, которые мы имеем возможность почерпнуть из эксперимента или технической документации, должны быть использованы на этапе построения формализованной схемы.

Дальнейшее преобразование формализованной схемы в математическую модель выполняется математическими методами без притока дополнительной информации о процессе. Для преобразования формализованной схемы в математическую модель необходимо записать в аналитической форме все соотношения, которые еще не были записаны, выразить логические условия в виде систем неравенств, а также придать аналитическую форму по возможности всем другим сведениям, содержащимся в формализованной схеме. В частности, это касается и числовых дан-

ных, характеризующих процесс. Как отмечалось выше, формализованная схема содержит эти данные в виде таблиц или графиков. Обычно при моделировании процессов на цифровых вычислительных машинах числовой материал используется не в первоначальном виде, а в форме аппроксимирующих выражений, удобных для вычислений. Например, вместо таблиц частот для значений случайных величин используются аналитические выражения функций плотности типичных законов распределения (нормального, показательного и т. д.), которые с достаточной точностью представляют упомянутые частоты. Многие таблицы и графики заменяются интерполяционными полиномами и т. д.

Естественно, что такого рода замены не влияют существенно на точность математического описания процесса. Вместе с тем они позволяют сделать математическую модель достаточно удобной для дальнейшего использования.

Несмотря на то, что при переходе от формализованной схемы к математической модели имеют место лишь малые искажения количественных характеристик процесса, тем не менее, строго говоря, математическая модель в общем случае не идентична формализованной схеме. Это обстоятельство в некоторых случаях может играть заметную роль с точки зрения совпадения результатов моделирования с опытными данными. Поэтому при построении математических моделей необходимо очень осторожно подходить к приближенным зависимостям, представляющим данные эксперимента.

2.2. Математические модели

Развитие теории подобия и основанного на ней физического моделирования позволило впоследствии перейти на путь математического моделирования. Математическое моделирование как по своему характеру, так и по целям принципиально отличается от физического моделирования, хотя, несомненно, и предполагает последнее. С точки зрения чисто логической, отличие математического моделирования от физического заключается в том, что в первом умозаключение не носит гипотетического характера, не включает в себя вывода по аналогии. В математическом моделировании процесс логического вывода це-

ликом основан на теории подобия и не выходит за его пределы. Математическое моделирование является материальным. Математическая модель, как и модель физическая, представляет собой материальное устройство, функционирующее по своим природным (физическим) законам. Ее следует отличать от *моделей математики* – знаковых моделей.

Для понимания сути математического моделирования необходимо вновь вернуться к анализу некоторых сторон теории подобия.

Первые шаги теории моделирования были связаны с анализом различных, но одинаковых с физической стороны объектов, отличие которых заключалось в геометрическом или временном отношении или, по крайней мере, могло быть сведено к такому. Отношение подобия устанавливалось путем определения пропорциональной зависимости между сходственными параметрами в дифференциальных уравнениях, описывающих как модель, так и оригинал. В настоящее время в теории подобия используются иные методы исследования, а именно – приведение дифференциальных уравнений к безразмерному виду. Разработка методов теории подобия была порождена не только потребностями моделирования, но и необходимостью более глубокого проникновения в физический смысл математических уравнений физики. Как мы уже отмечали, представление физических процессов в форме дифференциальных и интегродифференциальных уравнений с большим числом переменных (параметров) и с использованием одновременно в одной и той же системе уравнений различных физических закономерностей не позволяет проследить зависимость между отдельными переменными. Приведение основных уравнений процесса к безразмерному виду в значительной степени облегчает эту задачу. Но вместе с этим обнаруживаются некоторые новые стороны математического аппарата физики. Безразмерные уравнения выражают отношение новых переменных как отношение относительных, а не абсолютных величин, но, уравнения такого вида представляют целый класс физических процессов, или, иначе говоря, класс физических процессов описывается одним и тем же уравнением при относительном представлении величин, что означает тождество этих процессов в некотором/отношении.

При переходе от относительных величин к абсолютным, тождество превращается в подобие. «Единство природы, – как отмечал В. И. Ленин, – обнаруживается в «поразительной аналогичности» дифференциальных уравнений, относящихся к разным областям явлений». «Аналогичность» дифференциальных уравнений и явилась основой математического моделирования. В отличие от физического моделирования математическое позволяет изучать те и только те параметры оригинала, которые входят в уравнение или систему уравнений. Это в некоторой степени снижает ценность математического моделирования по сравнению с физическим, однако математическое моделирование помимо чисто практических преимуществ (меньшие материальные затраты на процесс моделирования, значительное сокращение времени моделирования) имеет и преимущества теоретико-познавательные, которые делают его незаменимым средством научного исследования.

Прежде всего, математическая модель является более обобщенной, нежели физическая. Если к физической модели предъявляются требования физического подобия (которые могут быть, то сужаемы, то расширяемы), то математическая не предполагает и этого. Математическая модель совершенно безразлична к материальной форме своего воплощения. Материальная форма воплощения математической модели зависит не от характера моделируемого объекта, а от тех задач и целей, которые ставит исследователь в процессе научного познания. Более обобщенный характер математического моделирования связан с тем обстоятельством, что от оригинала и модели не требуется больше физического подобия: это требование становится излишним, т. к. в процессе моделирования на модели изучаются те и только те параметры, которые имеют математическое описание и связаны математическими соотношениями в уравнениях, относящихся как к модели, так и к оригиналу. Из этого следует, что конкретная математическая модель представляет класс подобных физических процессов и объектов (как и физическая модель), но, кроме этого, может (быть и моделью иных явлений действительности, физически не подобных данному классу, но имеющих закономерности, которые описываются теми же математическими структурами.

Математические модели, поскольку они опираются на математическое подобие оригинала и модели и используются для исследования количественных характеристик и количественной взаимосвязи различных параметров, могут рассматриваться как математические, вычислительные машины. Такая оценка математических моделей общепризнана. И наоборот, вычислительная машина является обобщенной моделью тех процессов, уравнения которых могут быть решены данной машиной.

Мы не будем специально рассматривать так называемые матричные и структурные модели, используемые в математическом моделировании. Такое деление носит чисто математический и технический характер. Для нас важно отметить следующее: современная математическая техника (здесь мы имеем в виду технику исчислений) позволяет решать дифференциальные уравнения, системы таких уравнений самыми различными способами. Различие в способах решения дифференциальных и интегродифференциальных уравнений и дает, вообще говоря, различные модельные схемы в вычислительных устройствах.

Математические модели можно разделить на аналоговые (непрерывные) и цифровые (дискретные). Аналоговая вычислительная машина представляет собой некоторое устройство с определенным физическим процессом, описываемым системой дифференциальных уравнений; поведение этого устройства должно достаточно хорошо совпадать с теоретически предсказуемым. В качестве такой аналоговой вычислительной машины могут выступать, например, электрическая цепь, сообщающиеся сосуды. Значительная часть современной измерительной аппаратуры также может рассматриваться как вычислительная машина.

Каковы же основания для использования вычислительной техники (аналоговых машин) в качестве модели? В основе опять-таки лежит математическая теория подобия. В аналоговой машине протекают вполне определенные физические процессы, имеющие математическое описание. Если мы приведем систему уравнений данного процесса к безразмерному виду, то можно обнаружить, что ряд иных физических процессов описывается системой уравнений безразмерного вида, тождественной с первыми. Именно это обстоятельство и позволяет использовать аналоговые машины как модель целого класса объектов и процессов.

Теоретико-познавательная ценность аналоговых моделирующих устройств заключается в том, что они позволяют исследовать закономерности оригинала в любой из моментов протекания процесса, а также исследовать *непрерывный* процесс взаимосвязи отдельных параметров. Аналоговая модель обладает тем преимуществом, что она сразу дает решение дифференциального уравнения (системы уравнений) и вместе с этим позволяет фиксировать любую промежуточную стадию процесса. Следовательно, аналоговая математическая модель может быть использована в процессе познания в том случае, когда не существует аналитического метода решения систем дифференциальных уравнений, или же, если такое решение все же существует, но не является достаточно прозрачным с точки зрения его физической интерпретации и не позволяет в связи с этим исследовать *процесс*, а дает лишь установление связи между начальным и конечным состояниями этого процесса.

Аналоговые вычислительные устройства, несмотря на все их преимущества, с точки зрения процесса познания, обладают все же существенными недостатками и ограниченностью. Прежде всего, они не обладают достаточной степенью общности. Аналоговое моделирующее устройство может использоваться для изучения вполне определенного класса объектов. Верно, этот класс может быть достаточно широк и, как правило, значительно шире того класса, который представляет физическая модель. Но тем не менее, аналоговая машина, предназначенная для решения задач вполне определенного типа, не может быть использована для решения иных задач.

Значительно большей степенью общности обладают моделирующие устройства дискретного характера – современные универсальные вычислительные машины. Высокая степень общности математических моделей) дискретного типа обусловлена тем, что в них все операции всегда сводятся к небольшому набору наиболее элементарных. Выше мы отмечали, что в современной математике зачастую не существует аналитических методов решения математических уравнений. Но это отнюдь не означает, что решения нельзя получить вообще. Численные методы решения разработаны в настоящее время достаточно хорошо и позволяют решать почти любые, сколь угодно сложные

задачи. Численное решение задач по своему характеру таково, что оно складывается часто из очень большого числа весьма элементарных операций. Следовательно, в тех случаях, когда неизвестен аналитический способ анализа уравнений и в то же время трудно подобрать физический аналог такого процесса (иногда физический аналог имеет место, но строить аналоговую модель нецелесообразно, так как задачи такого типа достаточно редки, а модель дорогостояща), используются универсальные вычислительные машины как модель исследуемого процесса.

Современные вычислительные машины дискретного характера используются как моделирующие устройства объектов и процессов самого разнообразного характера. Чрезвычайно важной задачей теории моделирования и теории познания является выяснение специфики математического моделирования на универсальных вычислительных машинах и пределов их возможностей. Вычислительные машины с большим числом элементов, согласно теореме фон Неймана, являются универсальными автоматами.

2.3. Использование математических моделей

При любом способе использования математической модели для исследования некоторого реального процесса в первую очередь необходимо наметить совокупность *искомых величин*, т. е. характеристик процесса, параметров системы и начальных условий или функций от них, определение которых является целью исследования.

После того как искомые величины выбраны, начинается поиск способа использования математической модели для их определения.

Остановимся кратко на следующих основных способах использования математической модели:

- 1) аналитическое исследование процессов;
- 2) исследование процессов при помощи численных методов, в т. ч. и с применением всех видов вычислительной техники;
- 3) аппаратное моделирование или моделирование процессов на вычислительных машинах непрерывного действия

(аналоговых или моделирующих машинах) и специальных моделирующих установках (стендах);

4) моделирование процессов на цифровых вычислительных машинах (машинах дискретного действия).

В большинстве случаев моделирование процессов последним методом производится с учетом и имитацией случайных факторов.

Каждый из перечисленных способов имеет специфические свойства, определяющие сферу его эффективного применения при решении различных теоретических и прикладных задач.

Рассмотрим вкратце мероприятия, проводимые при *аналитическом* исследовании процессов.

Как правило, математическая модель в своем первоначальном виде не может быть использована для аналитического исследования процесса. В частности, математическая модель вообще может не содержать в явном виде искомых величин. Необходимо преобразовать математическую модель в такую систему соотношений (например, уравнений) относительно искомых величин, которая допускает получение нужного результата аналитическими методами. Это преобразование является наиболее существенным и в то же время часто наиболее трудным шагом при аналитическом исследовании процессов. Под получением результата здесь будем понимать построение явных формул для искомых величин, либо приведение уравнений к виду, для которого решения известны, либо, наконец, проведение исследования уравнений качественными методами (например, оценка асимптотических значений искомых величин, оценка устойчивости решений и т. д.).

Получение результатов такого характера обычно является настолько полным решением задачи, что к аналитическому исследованию процессов на практике стремятся в первую очередь. Однако воспользоваться аналитическим исследованием удастся сравнительно редко, так как преобразование математической модели в систему уравнений, допускающую эффективное решение, является трудной задачей, а для сложных процессов эти трудности часто оказываются непреодолимыми.

Тем не менее, использование аналитических методов столь заманчиво, что при решении многих прикладных (а иногда и

теоретических) задач идут на умышленное отступление от первоначальной модели, на упрощение и огрубление ее ради возможности получить хотя бы приближенное решение задачи. Типичным примером такого упрощения реальной картины явлений может служить предположение о пропорциональности силы $\psi \cdot \xi(t)$ растяжению пружины (1).

Как показывает эксперимент, на самом деле зависимость силы от растяжения пружины ξ , $F = F(\xi)$, оказывается заведомо более сложной. Однако получить, с учетом этой зависимости, уравнение, которое допускало бы аналитическое решение, не представляется возможным. Полученное без учета влияния сил тяжести и внутреннего трения, а также сопротивления воздуха решение уравнения плохо согласуется с реальными колебаниями пружинного маятника в экспериментах. В частности, последние никогда не бывают строго свободными, они сопровождаются весьма заметным затуханием. Тем не менее, это решение позволяет получить многие полезные выводы и рекомендации и поэтому широко используется в теоретических и прикладных расчетах.

В тех случаях, когда не удается преобразовать математическую модель в подходящую систему уравнений, а упрощения задачи приводят к недопустимо грубым результатам, от аналитического исследования отказываются и переходят к другим способам использования математической модели.

Более широкую сферу применения имеет исследование процессов при помощи численных методов, особенно в связи с интенсивным внедрением в практику быстродействующих вычислительных машин. Содержание работы при численном исследовании процессов остается в основном таким же, как и при использовании аналитических методов. Разница заключается в том, что после выполнения наиболее трудной части работы – преобразования математической модели в систему уравнений, допускающую эффективное решение численными методами, – необходимо с использованием вычислительной техники, произвести расчеты – реализовать соответствующий численный метод. При исследовании процессов численными методами результатами служат таблицы значений искомых величин для ко-

нечного набора значений параметров системы, начальных условий или времени.

Необходимо отметить, что класс уравнений, которые могут быть решены приближенно численными методами, значительно шире, чем класс уравнений, доступных аналитическому исследованию. Вместе с тем решение задач при использовании численных методов бывает обычно менее полным по сравнению с аналитическим исследованием, а в некоторых весьма распространенных случаях ограничивается обследованием небольшого числа частных реализаций процесса.

Чрезвычайно неприятным является то обстоятельство, что математические модели сложных процессов в своем первоначальном виде далеко не всегда оказываются пригодными для применения численных методов, а преобразования математических моделей в соответствующую систему уравнений, как правило, остаются столь же сложными, как и в случае аналитического исследования,

Применение средств вычислительной техники при исследовании процессов численными методами ограничивается лишь автоматизацией вычислений – автоматическим воспроизведением выбранного численного метода.

При моделировании процессов не обязательно преобразовывать математическую модель в специальную систему уравнений относительно искомых величин. Для имитационного *моделирования* характерно воспроизведение явлений, описываемых математической моделью, с сохранением их логической структуры, последовательности чередования во времени, а иногда и физического содержания, выполняемое при помощи специальных моделирующих установок или средств вычислительной техники. В противоположность аналитическому и численному методам содержание операций, выполняемых при моделировании, слабо зависит от того, какие величины выбраны в качестве искомых. Для оценки искомых величин может быть использована любая подходящая информация, циркулирующая в модели, если только она доступна регистрации и последующей обработке.

В случае аппаратного моделирования для исследования процесса используются специальные моделирующие установки, принцип работы которых опирается на аналогии между меха-

ническими, электрическими, гидравлическими, тепловыми и другими явлениями. Математическая модель при этом дает возможность не только обоснованно выбрать для данного оригинала процесс-аналог подходящей природы, но и установить значения соответствующих коэффициентов подобия.

Моделирование процессов на вычислительных машинах непрерывного действия по существу является специальным видом аппаратного моделирования, а вычислительные машины непрерывного действия, как правило, представляют собой комплекс многих моделей, способных имитировать разнообразные явления. Естественно, что вычислительные машины непрерывного действия строятся для решения крупных классов задач (например, обыкновенных дифференциальных уравнений), а их элементы являются моделями для процессов, наиболее часто встречающихся в задачах данного класса.

Вычислительные машины непрерывного действия обладают известной универсальностью, так как составляющие их модели можно настраивать на заданные значения параметров, а тип решаемой задачи менять путем вариации структуры схемных связей между моделями.

Однако существуют многочисленные теоретические и прикладные задачи, решение которых при помощи моделирующих установок или вычислительных машин непрерывного действия оказывается практически недоступным или нецелесообразным.

Причины этого, как правило, заключаются либо в недостаточной точности результатов, получаемых на вычислительных машинах непрерывного действия, либо в необходимости непроизводительной затраты сил и средств, связанной с построением специальных моделирующих установок, каждая из которых пригодна для решения только весьма узкого класса задач.

Несмотря на отмеченные обстоятельства, методы аппаратного моделирования и особенно решения задач при помощи вычислительных машин непрерывного действия имеют широкое распространение и пользуются заслуженной популярностью.

Для моделирования процесса на цифровых вычислительных машинах необходимо преобразовать математическую модель его в специальный *моделирующий алгоритм*.

В соответствии с этим алгоритмом в машине вырабатывается информация, описывающая элементарные явления исследуемого процесса с учетом их связей и взаимных влияний. Определенная часть циркулирующей информации выводится «на печать» и используется для определения тех характеристик процесса, которые требуется получить в результате моделирования.

Естественно, что явления исследуемого процесса и явления, происходящие в цифровой вычислительной машине, реализующей моделирующий алгоритм, по своему физическому содержанию в общем случае оказываются существенно различными. Тем не менее, они должны быть, по возможности, близкими с точки зрения состава и характера информации, описывающей поведение реальной системы, и информации, перерабатываемой машиной по ходу моделирования. При этом условия сведения о состояниях процесса-модели, получаемые в ходе моделирования, с достаточным основанием могут быть использованы для оценки характеристик и параметров процесса-оригинала.

Название «имитационное моделирование» ни в коем случае не означает наличия физического сходства между явлениями процесса-оригинала и явлениями, происходящими в цифровой вычислительной машине. Из этого также не следует, что специализированные цифровые устройства машины решают отдельные уравнения математической модели. Рассматриваемый здесь метод моделирования процессов на цифровых вычислительных машинах является скорее особого рода *численным методом*, имеющим своеобразные отличия от обычных численных методов.

При использовании обычных численных методов первоначальная математическая модель исследуемого процесса должна быть преобразована в систему уравнений, допускающую численное решение. К полученным уравнениям применяется некоторый численный метод, в общем случае по своей логической структуре весьма далекий как от математической модели, так и от процесса-оригинала. Его логическая структура и характер фигурирующей информации обусловлены скорее типом тех уравнений, к которым удалось привести первоначальную математическую модель.

В противоположность этому при имитационном моделировании реализация моделирующего алгоритма является, в некотором смысле, имитацией элементарных явлений, составляющих исследуемый процесс, с сохранением их логической структуры, последовательности протекания во времени и особенно характера и состава информации о состояниях процесса.

С этой точки зрения можно указать на имеющуюся аналогию между исследованием процессов методом имитационного моделирования и экспериментальным исследованием процессов в натуре. В том и в другом случаях имеется возможность использовать для решения поставленных задач любую информацию о состояниях процесса, если только она доступна соответствующей регистрации.

Отсюда следует, что структура моделирующего алгоритма слабо зависит от совокупности искомых величин, а определяется главным образом строением математической модели. При исследовании процессов численными методами дело обстоит по-другому: изменение совокупности искомых величин, как правило, требует перехода к уравнениям, существенно отличным от первоначальных. Аналогичное обстоятельство имеет место и при исследовании процессов аналитическими методами.

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что для исследования процессов методом имитационного моделирования нет необходимости создавать специальные моделирующие установки или специализированные цифровые вычислительные машины. Исследование большинства встречающихся на практике процессов вполне может быть проведено при помощи цифровых вычислительных машин универсального назначения. Поэтому в дальнейшем мы будем предполагать, что в нашем распоряжении имеется какая-нибудь универсальная цифровая вычислительная машина, обладающая обычными для такого класса машин объемом памяти и быстродействием.

Решение многих практических задач приводит к необходимости анализировать процессы с учетом действия случайных факторов.

В отличие от других методов, имитационное моделирование оказывается весьма удобным аппаратом для исследования случайных процессов. При использовании аналитических или

численных методов для исследования процессов с учетом случайных факторов возникают дополнительные трудности, связанные с синтезом уравнений относительно неизвестных законов распределения или других вероятностных характеристик (средних значений, дисперсий, корреляционных функций и т. д.) анализируемых процессов, а также с решением полученных уравнений. Это обстоятельство имеет существенное значение в том случае, когда зависимости между случайными возмущениями и искомыми величинами описываются сложными нелинейными соотношениями. Для метода имитационного моделирования дополнительные трудности упомянутого характера оказываются обычно сравнительно легко преодолимыми.

Рассмотрим основные особенности моделирования процессов с учетом действия случайных факторов.

Результаты моделирования, полученные при воспроизведении единственной реализации процесса, в силу действия случайных факторов будут реализациями случайных процессов и не смогут объективно характеризовать изучаемый объект. Поэтому искомые величины при исследовании процессов методом имитационного моделирования обычно определяют как средние значения по данным большого числа реализаций процесса.

Если число реализаций N , используемых для оценки искомых величин, достаточно велико, то в силу закона больших чисел получаемые оценки приобретают статистическую устойчивость (порядок дисперсии оценок равен $1/N$) и с достаточной для практики точностью могут быть приняты в качестве приближенных значений искомых величин.

Заметим, что последняя особенность характерна для так называемого *метода Монте-Карло (метода статистических испытаний)* – одного из численных методов, получивших распространение в связи с появлением быстродействующих вычислительных машин. Обычно метод имитационного моделирования считают распространением применявшегося ранее только в специфических случаях метода Монте-Карло на случай сложных систем.

При моделировании процессов с учетом случайных факторов приходится воспроизводить большое количество реализаций и определять искомые величины как средние значения. Возни-

кает следующий вопрос: нельзя ли обойтись воспроизведением одной реализации процесса, а для того, чтобы получить средние значения искомых величин, вместо случайных значений исходных данных подставлять их средние значения? Ответ на этот вопрос в общем случае отрицательный (см. гл. 1).

Метод имитационного моделирования, имеет весьма обширную сферу применения. Он дает возможность проводить достаточно полное исследование разнообразных процессов независимо от физической природы явлений, составляющих данный процесс, выбора совокупности искомых величин и формулировки прикладных задач.

2.4. Особенности математического моделирования условий труда

Математическое моделирование в охране труда применяется для исследования условий труда и разработки мер защиты от опасных и вредных факторов производственной среды. Исследование условий труда проводится с целью выявления причин несчастных случаев и профессиональных заболеваний и оптимизации совокупности производственных, психологических, гигиенических и эстетических факторов, воздействующих на человека во время работы, для создания высокой эффективности труда. Под эффективностью труда понимается наибольшая производительность при минимально возможных затратах человеческой энергии. В инженерной охране труда существуют различные подходы к исследованию условий труда на производстве: технико-экономические методы, системный подход с использованием математического моделирования.

Для оценки условий труда на рабочих местах, проверки соответствия этих условий установленным нормативам, установления причин происшедших несчастных случаев и выявления возможных опасных и вредных производственных факторов применяют техническое и монографическое исследования. Для технических исследований и испытаний используют различные методы определения параметров микроклимата, освещенности, интенсивности шума и вибраций и др. Эти исследования планируются и проводятся городской санитарно-эпидемиологической

станцией или отделом техники безопасности предприятия (лабораторией охраны труда) для фронтальной проверки условий труда на рабочих местах, например, основных цехов металлургического завода – доменного, конверторного, прокатного. По результатам этих исследований создаются микроклиматические, шумовые или другие карты цехов и участков, выявляются наиболее опасные места.

При монографическом исследовании в отличие от технического выбирается конкретный объект в цехе, например прокатный стан, и на нем углубленно изучаются условия труда. Такие исследования проводятся, как правило, институтами охраны труда и включают анализ как технологического, так и трудового процессов; при этом рассматривают влияние изучаемого оборудования или технологического процесса на окружающую природную среду. Монографические исследования проводятся и на основании изучения условий труда объектов-аналогов. Монографическое исследование позволяет выявить причины происшедших несчастных случаев на объекте, а также потенциальные опасности и вредности, которые могут оказать вредное воздействие на работающих и окружающую среду. По результатам такого исследования делают заключение о возможности возникновения аварийных ситуаций при работе аналогичного действующего или проектируемого оборудования на предприятии, в отрасли.

Статистический метод исследования условий труда заключается в накоплении материалов о происшедших на производстве несчастных случаях и профессиональных заболеваниях, их обработке и анализе. Из всей совокупности зарегистрированных на заводе или в отрасли несчастных случаев делают выборку: по определенной группе цехов, технологическому процессу или за фиксированный период наблюдения, затем группируют этот массив данных по определенным признакам. Группировка производится по профессии, стажу работы, полу пострадавшего и другим признакам. На основании проведенной таким образом статистической обработки формируются статистические таблицы, выводятся статистические показатели коэффициенты частоты и тяжести травматизма. Анализируя статистические показатели травматизма для какого-либо объекта или тех-

нологического процесса и причины происшедших несчастных случаев, делают заключение о возможных закономерностях их повторяемости.

Группа технических и статистических методов исследования условий труда зачастую дополняется экономическим исследованием. Задачами этого исследования являются подсчет экономических потерь, вызванных травматизмом и профессиональными заболеваниями, и определение экономической эффективности планируемых мероприятий по улучшению условий труда. Такие исследования необходимы для учета экономического ущерба данного предприятия и государства от неудовлетворительного состояния условий труда на производстве, а также для выбора оптимальных с экономической точки зрения для данного предприятия оздоровительных мероприятий.

При помощи указанных выше методов можно исследовать условия труда на действующих предприятиях в конкретной производственной обстановке и лишь в некоторых случаях делать заключения о возможных несчастных случаях при работе аналогичного оборудования. Так, технические исследования и испытания позволяют оценить лишь влияние производственных факторов на уровень условий труда без учета психологических и эстетических факторов. Статистическое и экономическое исследования дают показатели травматизма и оценку ущерба от происшедших несчастных случаев и аварий, но не позволяют предотвратить их в будущем. Монографическое исследование дает наиболее полное представление о состоянии в данный момент условий труда на объекте, однако выдача рекомендаций для вновь создаваемого оборудования по результатам этого исследования затруднена ввиду невозможности учета взаимного влияния различных факторов производственной среды в новых условиях.

Для более полного исследования условий труда, учитывающего влияние на человека всего многообразия производственных, гигиенических и психологических факторов, используется системный подход. Объектом исследования является система «человек – технологический процесс – трудовой процесс – производственная среда». Эта система состоит из ряда подсистем; наибольший интерес из них представляют подсистемы,

включающие человека: «человек – технологический процесс», «человек – трудовой процесс», «человек – производственная среда».

Подсистему «человек – производственный процесс», включающую, кроме человека, предмет труда, оборудование и технологию, называют также биофизической системой «человек – машина». Анализом ситуаций в этой системе и выбором правильного распределения функций между человеком и машиной занимается инженерная психология. Для дальнейшего улучшения условий труда необходимо, чтобы большая часть функций выполнялась машиной. Однако безопасное функционирование системы обеспечивается как надежностью оборудования, так и надежной, безошибочной работой человека-оператора. Безошибочная работа человека зависит от его квалификации, комфортности рабочего места, удовлетворительных окружающих условий, четкой входной информации и других факторов. Поэтому при анализе производственного процесса должны быть выявлены недостатки, которые могут явиться причиной ошибок персонала.

Элементы подсистемы «человек – трудовой процесс» изучаются с помощью физиологии, гигиены труда, психологии и эргономики. В этой подсистеме безопасные условия труда обеспечиваются путем правильной организации трудового процесса с учетом функциональных возможностей человека. Если один из параметров, характеризующих трудовой процесс (физические усилия, темп работы, нервно-психическая нагрузка, рабочее положение, монотонность работы), длительное время превышает установленный уровень, то в системе возникает опасная или аварийная ситуация. Влияние производственной среды на работоспособность человека в подсистеме «человек – производственная среда» изучается эргономикой, гигиеной труда и производственной санитарией. Производственную среду характеризует совокупность физических, химических и биологических факторов: освещение, микроклимат, шум, вибрация, лучевые воздействия, микроорганизмы и др. Неблагоприятные факторы производственной среды снижают работоспособность человека, могут вызвать профессиональные заболевания и способствуют возникновению несчастных случаев.

2.5. Задачи математического моделирования в охране труда

Системный подход к исследованию условий труда предполагает использование методов, учитывающих всю сложность изучаемой системы: взаимное влияние большого числа факторов, неопределенность поведения системы и ее слабую структурированность, изменение условий функционирования системы во времени. К таким методам относятся методы математического моделирования.

Использование этих методов для исследования условий труда особенно актуально, поскольку основная задача моделирования состоит в проведении эксперимента на бумаге или на ЭВМ, что позволяет избежать дорогостоящего физического эксперимента. В технике безопасности в «затраты» на эксперимент могут быть включены здоровье и жизнь людей. Поэтому при прочих равных условиях крайне выгодно проверить мероприятие по улучшению условий труда моделированием до его реализации.

С точки зрения перерабатываемой на ЭВМ информации моделирование является имитацией элементарных явлений, составляющих исследуемый процесс, с сохранением структуры взаимодействия между ними. В этом смысле имеется прямая аналогия между исследованием реальных производственных процессов методом моделирования на ЭВМ и экспериментальным исследованием их в натуре ("машинный эксперимент"). При использовании математического моделирования нет необходимости создавать для каждого процесса специальные экспериментальные установки; метод обеспечивает простоту, оперативность и небольшую стоимость исследований. Кроме того, он позволяет провести анализ поведения реальных систем в условиях, недоступных для натурного эксперимента. Для реализации системного подхода к исследованию условий труда желательно, а во многих случаях просто необходимо, использование математического моделирования на ЭВМ. При этом используются различные виды математических моделей, которые можно классифицировать с различных точек зрения. Для исследования любой системы математическими методами с помощью

ЭВМ данному реальному (физическому, информационному и т.д.) объекту должен быть поставлен в соответствие некоторый математический объект, называемый его моделью. Вид математической модели зависит не только от природы реального объекта, но и от тех задач, которые стоят перед исследователями. Любая модель (в том числе и физическая) описывает реальный объект приближенно. Это приближение часто вызвано необходимостью отбросить ряд несущественных факторов. Математической моделью обычно называют систему уравнений и логических отношений, которая отражает сущность явлений, протекающих в объекте, поведение объекта при изменении входных переменных. Система уравнений, как правило, отражает зависимость целевых функций и выходных переменных от входных и независимых координат с соответствующими начальными и граничными условиями и ограничениями.

Под целевой функцией имеют в виду параметр оптимизации или критерий оптимизации, которым является уровень безопасности труда, определяющий степень совершенства условий труда, экономическую целесообразность. Целевая функция – это количественная мера выполнения задач по улучшению условий труда. Это может быть также количественная характеристика степени технологического совершенства с точки зрения улучшения условий труда. Обычно ищут максимум этой функции. Целевая функция в охране труда может иметь статистическую природу, иметь как непрерывную, так и дискретную область определения, причем область определения может быть неограниченной. Обычно указывают область значений целевой функции при изменении входных и выходных переменных в пределах их областей определения. Как правило, это однозначная функция переменных. Желательно, чтобы целевая функция имела конкретный физический смысл и была единственной. Правда, многоцелевые случаи нередки, тогда решают последовательно ряд однопараметрических задач.

Для составления математической модели условий труда необходимо провести анализ задачи исследования, определить целевую функцию, а также факторы, действующие на процесс, и область их изменения, проанализировать физические, химические и другие закономерности, влияющие на условия труда, вве-

сти ограничения на переменные. Эти ограничения могут быть связаны с особенностями области их применения (например, концентрация вещества в воздухе не может быть отрицательной), а также могут вводиться для экономии времени машинного счета, удобства работы с математической моделью и т. д.

Разработка алгоритма решения уравнений математического описания на ЭВМ зависит от конкретного вида уравнений математической модели, выбранного численного метода их решения, типа ЭВМ и др.

Обязательный этап проверки степени соответствия математического описания условий труда моделируемым условиям труда – идентификация математической модели. Говорят, что математическая модель идентична (или адекватна), если полученные с ее помощью характеристики условий труда совпадают с заданной степенью точности с экспериментальными характеристиками, полученными на реальном процессе.

Часто в охране труда известен лишь общий характер зависимостей между входными и выходными переменными процесса, но уравнений таких зависимостей нет. В этом случае по характеру зависимости вид уравнений предполагается (например, предполагается, что зависимость между параметрами условий труда описывается дифференциальным уравнением или эмпирическим уравнением в виде многочлена), т. е. выдвигается гипотеза о конкретном виде уравнения зависимости между параметрами процесса и в процессе идентификации проверяется справедливость этой гипотезы [2].

3. МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

3.1. Этапы построения математических моделей

На этапе постановки задачи рассматривают качественные характеристики условий труда. При моделировании же качественное представление переходит в количественное. Формы представления этих зависимостей – уравнения, графики или таблицы с численными значениями переменных. Одной из основных целей моделирования является получение более ясного представления о взаимосвязях между различными элементами системы.

Анализ начинается со сбора информации, которая может быть использована для определения зависимостей между переменными. По возможности эти данные следует проверять на точность измерения и, кроме того, выявлять характер влияния любой неопределенности в параметрах на конечный результат. Информация может быть получена из литературных источников, на основании мнений экспертов или по результатам экспериментов. Использование имеющихся данных иногда затруднено тем, что, как правило, эти данные были получены не в связи с той проблемой, которая стоит перед математическим моделированием условий труда, и поэтому данные могут оказаться непригодными для разработки модели. Но это не значит, что собраны неверные данные, они просто применимы лишь к тем обстоятельствам, при которых они получены.

Другая трудность, связанная с использованием имеющихся данных, обусловлена различием способов их получения. При сравнении статистических данных, полученных различными авторами, в разное время или в разных местах, следует учитывать разницу в методах сбора данных. Третья трудность в использовании статистических данных обусловлена степенью точности имеющейся информации. Каждый эксперимент вносит возмущение в среду, и поэтому не исключены ошибочные заключения относительно состояния среды в отсутствие эксперимента. Кроме того, метод измерения вносит неопределенность в получаемые данные, так как в принципе невозможно включить в

модель сразу всех сотрудников предприятия или измерить любую переменную с абсолютной точностью. И, наконец, промежуток времени между сбором данных и их использованием вносит неопределенность вследствие зависимости переменных от времени.

В охране труда нередко приходится пользоваться информацией, поступающей от экспертов. Такая ситуация складывается в тех случаях, когда получить функциональные зависимости между выходными и входными параметрами невозможно из-за недостатка данных. Кроме того, эксперты могут дать оценку имеющихся данных с точки зрения их надежности и применимости, уточнить варианты и управляющие параметры системы, назвать показатели, которые могут быть использованы для количественной характеристики общих интересов и целей лиц, входящих в разные группы, и, наконец, указать относительную важность различных показателей.

В роли эксперта может выступать, например, высококвалифицированный рабочий, способный применить свой опыт для оценки признаков предаварийных или аварийных ситуаций, умеющий предсказать события с разумной точностью и относительной беспристрастностью, могущий довести информацию до лиц, не являющихся специалистами в конкретном производственном процессе. Как правило, объективные данные можно интерпретировать по-разному, и под влиянием своего личного убеждения эксперт может придавать большее значение тем данным, которые больше соответствуют этому убеждению.

Эксперты и группы лиц с общими интересами могут непосредственно взаимодействовать с моделью посредством операционной или деловой игры. Проведение игр избавляет от необходимости включения в общую модель предлагаемых моделей поведения, т. к. реакция человека и его решения вводятся в систему участниками игры. Кроме того, в процессе игры ее участники приобретают интуицию в понимании последствий, которые могут быть вызваны теми или иными решениями. Конечно, игра является приближением к реальной системе и, следовательно, возможны ошибки, связанные, например, с тем, что в процессе игры ее участники не подвержены такому воздействию внешних факторов производственной среды, как в ре-

альных условиях. Они понимают, что ошибки в игре обходятся не так дорого, как в жизни, и действуют более рискованно, чем в реальных условиях. Следует также иметь в виду, что модель является идеализированным представлением системы и поэтому информация, которой располагают участники игры, может содержать неточности. Соотношения, которые выражают зависимости между состояниями и параметрами сложной системы в заданный момент времени, часто могут определять лишь распределения вероятностей для состояний системы, если заданы распределения вероятностей для начальных условий, параметров системы и входной информации. В этом случае модель называют вероятностной (стохастической).

Любому реальному процессу присущи случайные флуктуации. Например, работа автоматических устройств обычно сопровождается помехами, статистические закономерности которых не всегда могут быть учтены и определены при вычислении управляющих воздействий. В одних случаях опыт, статистика и исследование процессов, определяющих изменение исходных данных, позволяют устанавливать те или иные вероятностные характеристики параметров задачи. В других случаях нет оснований для каких бы то ни было суждений о статистических закономерностях явлений, способных изменить предполагаемые значения параметров задачи. Ситуации, соответствующие первому случаю, иногда называют ситуациями, связанными с риском. Ситуации второго типа называют неопределенными. Если соотношения состояний системы в заданный момент времени однозначно определяются через параметры системы, входную информацию и начальные условия, то этот случай называют детерминистической моделью. Однако выбор детерминистической или вероятностной математической модели зависит от необходимости учета случайных факторов. Если же при классификации исходить из способа дальнейшего использования математической модели для изучения сложной системы, то такие модели можно разделить на аналитические и имитационные. Для аналитических моделей характерно, что процессы функционирования элементов сложной системы записываются в виде некоторых функциональных соотношений (алгебраических, интегро-дифференциальных, конечно-разностных и т. п.) или ло-

гических условий. Аналитическую модель можно построить одним из следующих способов: 1) аналитически, когда стремятся получить в общем виде явные зависимости для искомых величин (например, модель вентиляции горячего цеха); 2) численно, когда аналитическое решение уравнений затруднено, но есть возможность с применением средств вычислительной техники получить числовые результаты при конкретных начальных данных (например, моделирование процессов звукоизоляции конструктивных материалов); 3) качественно, когда, не имея решения в явном виде, можно найти лишь некоторые свойства решения (например, оценить устойчивость решения).

Наиболее полное, а иногда и исчерпывающее исследование можно провести в том случае, если получены явные зависимости, связывающие искомые величины с параметрами системы и начальными условиями. Однако их удается получить лишь для сравнительно простых систем. Если же рассматриваемая система достаточно сложна, аналитическое исследование наталкивается на значительные, часто непреодолимые трудности. Тогда, стремясь получить аналитическое решение, идут на умышленное упрощение первоначальной модели, чтобы иметь возможность изучить некоторые общие свойства системы. В отдельных случаях могут удовлетворить и те выводы, которые можно сделать при качественных методах анализа математической модели. В этом случае приходится вынужденно накладывать жесткие ограничения на модель сложной системы и прибегать к упрощениям. Получаемое при этом грубое, но легко обозримое решение используется как ориентировочное до получения более точных решений другими методами. Численные методы по сравнению с аналитическими применимы к значительно более широкому классу задач инженерной охраны труда, однако не всегда возможно получить с их помощью выводы общего характера. Использование численных методов стало особенно эффективным в связи с созданием современных быстродействующих ЭВМ.

Широкое использование моделирования процессов на ЭВМ привело к алгоритмическому описанию процесса функционирования систем. В имитационных моделях моделирующий алгоритм приближенно воспроизводит сам процесс-оригинал в смысле его функционирования во времени; при этом имитиру-

ются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени. Этот метод моделирования состоит в реализации на ЭВМ специального алгоритма, который воспроизводит формализованный процесс сложной системы. Моделирующий алгоритм позволяет по исходным данным, содержащим сведения о начальном состоянии процесса (входной информации) и его параметрах, получить сведения о состояниях процесса в произвольные моменты времени.

Имитационные модели применимы к исследованию более сложных процессов, чем физические и аналоговые модели. В этом случае нет необходимости создавать специальную аппаратуру для каждой новой задачи. Однако имитационное моделирование имеет тот недостаток, что полученное решение всегда носит частный характер, отвечая фиксированным значениям параметров системы, входной информации и начальных условий. Несмотря на это, имитационное моделирование является в настоящее время наиболее эффективным методом исследования сложных систем, а подчас и единственным практически доступным средством получения интересующей нас информации о поведении системы, особенно на стадии ее проектирования или модернизации. Это особенно важно для прогнозирования условий труда на строящихся предприятиях.

Учет влияния случайных факторов производственной среды в аналитических моделях весьма затруднен, тогда как введение случайных возмущений в имитационные модели не вносит принципиальных усложнений. По этой причине вероятностные аналитические модели используют для изучения простых систем, а исследование сложных случайных систем проводится на имитационных моделях. Для получения объективных и устойчивых характеристик случайного процесса требуется многократное воспроизведение процесса на имитационной модели с последующей статистической обработкой полученных данных. Поэтому исследование сложных систем с помощью имитационных моделей называют статистическим моделированием.

Статистическое моделирование представляет собой численный метод, позволяющий приближенно воспроизводить

функционирование некоторой системы. Первоначально этот метод применяли для моделирования случайных объектов, вероятностные характеристики которых совпадали с решениями тех же аналитических задач. Такая процедура получила название "метод статистических испытаний", или метод Монте-Карло. Впоследствии этот прием стал применяться для исследования процесса функционирования сложных систем, подверженных случайным возмущениям, что явилось основой для появления метода статистического моделирования. С помощью статистического моделирования можно решать задачи определения эффективности принятых решений по улучшению условий труда, задач и текущего планирования мероприятий по охране труда и оперативного управления системой обеспечения безопасности труда на производстве.

3.2. Распределение функций между человеком и машиной

Подход к исследованию условий труда, основанный на диалектико-материалистических принципах рассмотрения явлений в их взаимосвязи и развитии, позволяет наиболее полно выявить и оценить степень потенциальных опасностей и вредных воздействий, а также обосновать способы и средства защиты от них. Поэтому человека и машину (в широком смысле) рассматривают как единую систему «человек – машина».

На ранних стадиях оценки функционирования системы в качестве основных применяются методы моделирования, которые позволяют, не имея еще реальной системы (но имея тот или иной ее проект), предсказывать результаты деятельности оператора в системе и оценивать влияние этой деятельности на выходные характеристики системы. Вначале преобладают методы математического, в частности статистического, моделирования, а на более поздних этапах, когда появляется возможность изготовления макета, имитатора или испытательного стенда, – методы физического моделирования. На этапе эксплуатации оценка проводится с применением экспериментальных методов. При этом изучаются основной режим и контроль функционирования системы, поиск и обнаружение неисправностей, техническое обслуживание и др. Может оказаться, что система, эффективная

в одном режиме работы, может быть неэффективной в других режимах. Рассматривая системы «человек – машина», необходимо учитывать специфические закономерности поведения человека. В процессе работы человек непрерывно обучается, что приводит к улучшению характеристик его работы. Изменение характеристик деятельности человека наблюдается на протяжении рабочего дня. Кроме того, все характеристики деятельности оператора вследствие влияния объективных и субъективных факторов имеют характер случайных величин. Особое значение имеет учет влияния внешних факторов производственной среды на деятельность человека. Между человеком и техническими элементами системы существуют различия и принципиального характера. Даже при минимальной доле участия в управлении человек остается субъектом труда, имеющим собственные мотивы действия, осознающим цели и задачи деятельности. Пока самая сложная машина является только объектом, орудием труда, необходимым человеку для выполнения поставленной задачи.

Сложность проблемы распределения функций обусловлена тем, что ее решение связано с учетом характеристик восприятия, внимания, памяти, мышления, двигательных актов оператора в конкретных условиях, возможных путей их совершенствования в процессе подготовки, а также с поиском компромиссных решений для взаимного согласования возможностей человека-оператора и параметров технических средств системы. Общепринято, что все операции, выполнение которых требует существенных энергетических затрат, превышающих возможности человека, передаются машине. Легко выполнимые операции, простота которых резко снижает мотивацию деятельности человека и отражается на его социально-личностной эффективности, также могут быть переданы машине. В том случае, когда участие человека в производственном процессе неизбежно, т. е. нельзя обойтись без участия человека, за ним необходимо оставить минимум действий, способствующих развитию его мышления (например, путем объединения пультов управления от нескольких агрегатов и пр.).

На изменение распределения функций между человеком и машиной могут накладываться экономические и социальные ограничения, поэтому необходимо соблюдение определенных

пропорций при распределении этих функций. Так, если машина для осуществления каких-либо сравнительно простых операций слишком громоздка, а ее изготовление требует чрезмерных затрат, большую часть операций передают человеку. Даже при существующем уровне развития техники возможности машин по выполнению операций определяются главным образом стоимостью их приобретения и программирования, а в ряде случаев допустимым объемом и массой аппаратуры. Действительно, уже в настоящее время могут быть в принципе построены многомашинные комплексы для выполнения практически любой операции, однако материальные затраты и время, затрачиваемое на их создание, далеко не всегда могут быть признаны целесообразными. В отношении тех операций, которые в настоящее время выполняются машиной, в будущем они должны оставаться за машиной. Для обоснованной же передачи машине новых функций, выполнявшихся ранее человеком, необходим учет большого числа факторов экономического, психофизиологического и социологического характера, который требует использования количественных и качественных методов. В частности, только человек-оператор, являясь социальным звеном системы, несет ответственность за выполнение задачи. Кроме того, человек - оператор обладает несравнимо большим многообразием способов и программ действий по сравнению с машиной, количество и качество программ которой определяются человеком.

Выполнение ряда операций для машины является задачей весьма сложной, например решение задачи выбора. Для человека такая задача сравнительно проста, поэтому предпочтение может быть отдано человеку. Неслучайно в конвейерном производстве операция выбора заготовки, ее ориентации и размещения на конвейере осуществляется человеком. Эта операция проста на первый взгляд, однако попытки ее автоматизации нередко оказываются безуспешными.

Особое значение имеют условия труда человека, которые накладывают ограничения на распределение функций между человеком и машиной. В общем случае необходимо стремиться к максимально возможному уменьшению влияния вредных факторов производственной среды. Во-первых, разработка и создание новой системы «человек – машина» должны непременно

улучшать условия труда человека. Во-вторых, в новой системе эти условия должны не оказывать отрицательного воздействия на здоровье человека или же это воздействие должно быть сведено к минимуму (с последующим полным восстановлением, например путем сокращенного рабочего дня). Характер влияния на состояние оператора того или иного фактора определяется его природой, интенсивностью и временем воздействия.

Влияние вредных факторов производственной среды на организм человека можно считать оптимальным, если при неопределенно долгом воздействии они не вызывают напряжения физиологических систем организма. Предельно допустимые значения вредных производственных факторов не оказывают влияния на здоровье человека при воздействии в течение смены (имеется в виду длительная трудовая деятельность). Предельные же значения предполагают лишь кратковременное пребывание в условиях вредных воздействий повышенной интенсивности и, наконец, существуют предельно переносимые величины вредных воздействий, при которых обеспечивается жизнь человека при минимальной трудовой деятельности. Такие случаи возникают на предприятиях при аварийных ситуациях. Для правильного распределения функций в системе «человек – машина» необходимо знать количественные оценки (критерии) деятельности человека. Прежде всего следует выяснить точные характеристики восприятия и переработки информации человеком, которые принципиально могут быть получены путем длительных экспериментов в условиях производства или же путем тренажерных испытаний. Так, обнаружение сигналов органами зрения зависит от ряда факторов: 1) ясности сигнала и уровня контраста между сигналом и фоном; 2) площади сигнала; 3) длительности его экспозиции; 4) локализации проекции сигнала на сетчатке глаза; 5) формы и цвета сигнала; 6) уровня световой адаптации; 7) отношения сигнала к шуму (помехам); 8) движения глаз наблюдателя (минимум приходится на период скачка).

Рассмотрим примеры получения некоторых зависимостей, связанные с обнаружением сигналов органами зрения. Пусть перед испытуемым расположен экран, на котором высвечиваются некоторые сигналы. Среди всех случайным образом расположенных сигналов необходимо обнаружить один полезный сиг-

нал (на практике это может быть сигнал, свидетельствующий об опасном отклонении от технологии). Назовем этот сигнал критическим.

Предупреждающие сигналы не нарушают заданного режима рабочей деятельности. Сигналы, свидетельствующие об аварии, переключают человека для работы по новому алгоритму, т. е. следствием аварийных сигналов должно быть изменение алгоритма работы для предотвращения развития аварийной ситуации и восстановления нормального функционирования системы.

Для передачи сигналов используются различные каналы связи зрительной, слуховой и т. д. Выбор канала связи зависит от структуры деятельности, загруженности того или иного анализатора и вида алгоритма, на который должен быть переключен оператор. Выбор канала связи для передачи аварийного сигнала обуславливается тем, что сигнал должен быть обязательно и немедленно воспринят при любых обстоятельствах независимо от характера работы.

3.3. Моделирующие алгоритмы

Для моделирования на цифровых вычислительных машинах любого процесса, заданного при помощи математической модели, необходимо построить соответствующий моделирующий алгоритм. Цифровая вычислительная машина, реализуя моделирующий алгоритм, выполняет диктуемую программой последовательность операций. Естественно, что машина может выполнять только такие операции, которые предусмотрены ее системой команд. Поэтому структура программы вычислений, составленной применительно к конкретному типу ЭВМ, будет зависеть не только от строения и вида воспроизводимого алгоритма, но и от характеристик самой ЭВМ. Так, быстродействие машины, объем ее оперативной памяти, адресность команд, способ задания порядка чисел, состав команд, порядок выполнения стандартных программ и другие характеристики налагают существенный отпечаток на структуру программы.

Типичными элементарными операциями современных цифровых вычислительных машин универсального назначения

являются сложение, вычитание, умножение, деление, вычитание модулей двух чисел, выделение целой части числа, сравнение двух чисел, определение большего (меньшего) из двух чисел, перенос числа из одной ячейки памяти в другую, безусловная передача управления, передача управления по признаку и т. д.

Как правило, запись алгоритма, предназначенного для моделирования сложного процесса, сразу в виде программы при помощи столь элементарных операций представляет значительные трудности. Кроме того, эта запись оказывается весьма неудобной. В самом деле, нагромождение всевозможных деталей, связанных с организацией вычислительной процедуры, делает ее малообозримой и затрудняет ориентировку в структуре моделирующего алгоритма. Желательно записывать моделирующий алгоритм в таком виде, который отражал бы в первую очередь особенности его построения без излишних второстепенных деталей.

Заметим, что создание моделирующего алгоритма является таким этапом исследования процесса, когда уже решены все принципиальные вопросы выбора математического аппарата для исследования. Программирование задачи и решение ее на машине относятся скорее к технической части работы. Учитывая это обстоятельство, а также необходимость сохранять некоторую свободу в выборе типа цифровой вычислительной машины, предназначенной для реализации моделирующего алгоритма, обычно стараются сделать запись алгоритма независимой от характеристик машины.

Поэтому используются разные способы представления моделирующих алгоритмов (так же, как и алгоритмов решения любых сложных задач). Исторически первым из таких способов является запись алгоритмов при помощи операторных схем. Затем (на этапе ЭВМ второго поколения) появились языки программирования. Наконец, в последнее время получили широкое распространение специальные пакеты прикладных программ.

Ниже мы в разной степени подробности рассмотрим все перечисленные методы представления алгоритмов. Применительно к имитационному моделированию это будут: операторные схемы моделирующих алгоритмов, языки моделирования и универсальные имитационные модели. Хотя универсальные имита-

ционные модели являются наиболее мощным из современных средств, но операторные схемы и языки моделирования обладают также рядом привлекательных свойств, особенно с методической точки зрения. Кроме того, играет немалую роль постепенность перехода от простых и наглядных способов описания алгоритмов к более сложным и абстрактным.

Операторная схема моделирующего алгоритма содержит последовательность операторов, каждый из которых изображает достаточно крупную группу элементарных операций. Такая запись алгоритма, хотя и не содержит развернутых схем счета отдельных промежуточных величин, тем не менее позволяет свободно ориентироваться в общей идее построения моделирующего алгоритма и достаточно полно отражает его логическую структуру. Операторная форма представления алгоритма еще не учитывает особенностей системы команд той или другой вычислительной машины. Учет этих особенностей, а также построение развернутых схем счета для воспроизведения отдельных операторов алгоритма можно осуществить при программировании задачи.

Выбор системы операторов для представления моделирующего алгоритма играет существенную роль, так как он определяет степень наглядности изображения алгоритма и удобство его дальнейшего использования. Обычно к системе операторов используемых при решении рассматриваемого класса задач, предъявляются два основных требования. Во-первых, желательно, чтобы каждый оператор имел достаточно ясный наглядный смысл, связанный с природой моделируемого процесса. В этом случае сама структура процесса будет подсказывать пути построения моделирующего алгоритма. Во-вторых, должна быть полная уверенность, что любой оператор может быть выражен последовательностью элементарных операций без особых затруднений. Лишь при этих условиях можно рассчитывать на успех с точки зрения программирования задачи.

Заметим, что моделирующий алгоритм для любого процесса можно рассматривать как специальную форму записи математической модели. Однако полного совпадения математической модели и соответствующего моделирующего алгоритма, как правило, не бывает.

Среди операторов моделирующего алгоритма обычно находятся операторы, не связанные с воспроизведением математической модели процесса. Соотношения математической модели, записанные в операторной форме, составляют главную часть моделирующего алгоритма. Помимо этого, в нем содержится еще ряд операторов, обеспечивающих переработку информации о состояниях процесса, необходимую для правильного функционирования модели.

Вся совокупность операторов, составляющих моделирующий алгоритм, может быть разделена на три группы: 1) основные операторы, 2) вспомогательные операторы и 3) служебные операторы. Основные и вспомогательные операторы составляют главную часть моделирующего алгоритма.

К основным мы будем относить операторы, используемые для имитации отдельных элементарных актов исследуемого процесса и взаимодействия между ними. Другими словами, основные операторы реализуют соотношения математической модели, описывающие процессы функционирования реальных элементов системы с учетом воздействия внешней среды. В отличие от них вспомогательные операторы не предназначены для имитации элементарных актов процесса. Они производят вычисление тех параметров и характеристик, которые необходимы для работы основных операторов.

Служебные операторы моделирующего алгоритма не связаны с соотношениями математической модели. Они обеспечивают взаимодействие основных и вспомогательных операторов при моделировании процесса в автоматическом режиме, синхронизацию работы алгоритма и выполняют некоторые второстепенные функции. В частности, служебные операторы производят фиксацию величин, являющихся результатами моделирования, а также их обработку.

При построении моделирующего алгоритма в первую очередь намечаются основные операторы для имитации процессов функционирования отдельных элементов системы. Они должны быть увязаны между собой в соответствии с формализованной схемой исследуемого процесса. Выяснив, какие параметры необходимы для обеспечения работы основных операторов, в операторную схему вводятся вспомогательные операторы для вы-

числения значений этих параметров. Основные и вспомогательные операторы должны охватывать все соотношения математической модели, составляя главную часть моделирующего алгоритма. Следует тщательно проверить соответствие совокупности основных и вспомогательных операторов системе соотношений математической модели, чтобы избежать ошибок в главной части моделирующего алгоритма и связанных с этим грубых просчетов.

После того как главная часть моделирующего алгоритма будет достаточно отработана, можно перейти к следующему шагу – введению служебных операторов. Для этого необходимо обратиться к рассмотрению динамики функционирования исследуемой системы и учету взаимодействия между различными фазами процесса, а также к анализу хода информации при моделировании.

Существенное значение здесь имеет уточнение перечня и вида величин, фиксируемых в процессе моделирования, и соотношений, используемых для их обработки.

Для изображения операторных схем алгоритмов удобно пользоваться операторами двух принципиально различных классов: 1) арифметическими операторами и 2) логическими операторами.

Арифметические операторы производят действия, связанные с вычислениями, понимаемыми в весьма широком смысле слова. Под арифметическим оператором мы будем понимать совокупность операций, реализующих какое-нибудь соотношение или систему соотношений между величинами. Арифметические операторы будем обозначать заглавными полужирными буквами латинского алфавита с индексами, указывающими номер оператора. Например, запись L_31 означает, что имеется в виду арифметический оператор № 31. В случае графического изображения алгоритмов (при помощи так называемых блок-схем), арифметические операторы будем представлять в виде прямоугольников с записанными внутри наименованием или функцией оператора (например, реализуемым соотношением).

Существенным свойством любого арифметического оператора является то обстоятельство, что после выполнения изображенных им операций, независимо от результатов расчета, про-

изводится переход (или, как мы будем говорить, передача управления) к какому-нибудь одному определенному оператору. Другими словами, после выполнения операций, предусмотренных арифметическим оператором, процесс вычислений может быть продолжен по одному-единственному пути, независимо от результатов, выдаваемых данным оператором.

Передачу управления от арифметических операторов будем обозначать следующим образом. Если от данного оператора управление передается некоторому другому оператору, то к символу, обозначающему данный оператор, приписывается справа сверху номер того оператора, которому передается управление. Например, A_{16}^{36} означает, что от оператора A_{16} управление передается оператору № 36.

При графическом представлении моделирующих алгоритмов в виде блок-схем передача управления от арифметического оператора изображается стрелкой, выходящей из прямоугольника, обозначающего оператор, от которого передается управление. Острые стрелки направлены к изображению того оператора, которому управление передается.

3.4. Основные операторы моделирующего алгоритма

Логические операторы предназначены для проверки справедливости заданных условий и выработки признаков, обозначающих результат проверки. В наиболее простом случае проверка заданного условия может быть сведена к сравнению двух чисел. Символически операцию сравнения удобно изображать в виде неравенства, например: $x < y$. Сравнивая значения величин x и y , будем полагать признак ω , обозначающий результат сравнения, равным 1, если неравенство $x < y$ оказывается справедливым, и равным 0, когда это неравенство несправедливо. В общем случае результатом работы логического оператора является значение признака $\omega = 1$, когда условие, проверяемое данным логическим оператором, выполнено, и $\omega = 0$ в противном случае.

Характерным свойством логических операторов (в отличие от арифметических) служит то обстоятельство, что после реализации логического оператора управление передается одному из

двух операторов алгоритма в зависимости от значения признака, вырабатываемого данным логическим оператором. Другими словами, направление продолжения процесса вычислений зависит от результатов вычислений, а именно от значения признака, вырабатываемого данным логическим оператором.

В операторных схемах алгоритмов логические операторы обозначаются большей частью при помощи буквы Р с указанием номера оператора, например: Р₉. При графическом представлении алгоритмов с помощью блок-схем логический оператор изображается кругом, внутри которого записывается словами или символически условие, проверяемое данным логическим оператором.

Для изображения передачи управления от логических операторов используются особые обозначения. В операторных схемах алгоритмов символ логического оператора, от которого передается управление, снабжается стрелками с номерами тех операторов, которым передается управление. Стрелка, поставленная справа вверху от символа логического оператора, обозначает направление передачи управления в случае, когда условие, проверяемое данным логическим оператором, выполнено. Аналогично, стрелка, поставленная справа внизу от символа логического оператора, обозначает направление передачи управления для случая, когда условие, проверяемое данным логическим оператором, оказывается невыполненным. Например, $P_{35 \downarrow 12}^{\uparrow 22}$ означает, что от логического оператора Р₃₅ управление следует передавать оператору № 22, если условие, проверяемое Р₃₅, выполнено, или же оператору № 12, если оно не выполнено. При графическом изображении передачи управления от логических операторов на блок-схемах алгоритмов стрелки, указывающие направление передачи управления, отмечаются единицей или нулем, в зависимости от значения признака, вырабатываемого данным логическим оператором. Таким образом, от логического оператора управление передается по стрелке, отмеченной единицей, если условие, проверяемое оператором, выполнено, и по стрелке, отмеченной нулем, если оно оказывается невыполненным.

Для операторов всех классов, как арифметических, так и логических, в операторных схемах алгоритмов обозначение передачи управления от одного оператора другому, непосредственно за ним следующему, опускается.

Рассмотрим теперь обозначения, используемые в операторных схемах алгоритмов для изображения передачи управления данному оператору от других операторов. Передача управления данному оператору обозначается номером того оператора, от которого передается управление, записываемым слева сверху от символа данного оператора. Например, $^{16,24}A_{18}$ означает, что оператору A_{18} управление передается от операторов № 16 и 24.

Передача управления данному оператору от предыдущего изображается лишь в том случае, когда данному оператору передается управление от нескольких операторов.

Эти последние замечания, естественно, относятся только к случаю обозначений, принятых для операторных схем алгоритмов. При графическом изображении алгоритмов на блок-схемах передачу управления легко проследить по соответствующим стрелкам.

В схемах алгоритмов иногда используется еще один специфический оператор, не входящий в рассмотренные выше классы, – оператор, означающий окончание вычислений.

В операторных схемах его обычно обозначают символом Я.

При графическом изображении алгоритмов на блок-схемах этот оператор изображают прямоугольником с соответствующей надписью. Часто с оператором окончания вычислений совмещают некоторые другие операции, например выдачу результатов, переход к другому варианту задачи и т. д.

1. Вычислительные операторы

Наибольшее распространение среди арифметических операторов имеют вычислительные операторы, или, иначе, операторы счета. В операторных схемах моделирующих алгоритмов каждый вычислительный оператор может описывать любую сколь угодно сложную и громоздкую группу операций, если она удовлетворяет требованиям, предъявляемым к операторам алгоритма. В частности, сюда относится требование, чтобы сформированный оператор передавал управление только какому-нибудь одному оператору алгоритма, хотя этому оператору управление может передаваться

от любого количества операторов. Если это требование не выполняется, необходимо сформированный оператор представить в виде последовательности составляющих операторов, каждый из которых упомянутому требованию удовлетворяет.

Кроме того, нужно четко определить, какие величины должны быть вычислены в результате реализации сформированного оператора, и убедиться в том, что все необходимые данные, получаемые от других операторов алгоритма, к моменту начала его работы уже имеются.

За вычислительными операторами мы в дальнейшем сохраним обозначения A_i .

2. Операторы формирования реализаций случайных процессов

Для имитации действия различных случайных факторов, сопровождающих исследуемый процесс, при моделировании возникает необходимость формировать реализации случайных событий, случайных величин, случайных функций, а иногда и случайных объектов более сложной природы.

Исходным материалом для формирования в цифровых вычислительных машинах реализаций, несущих в себе элемент случайности, обычно служат так называемые случайные числа. Случайные числа могут быть получены и введены в машину различными способами. Например, можно хранить в запоминающих устройствах машины специальные таблицы случайных чисел и выбирать из них отдельные числа по мере надобности. Чаще на практике случайные числа вырабатываются в самой машине по особым программам или при помощи специальных приставок к машине – генераторов (датчиков) случайных чисел.

Однако случайные числа, как отмечалось выше, являются только исходным материалом для получения реализаций различных случайных процессов, необходимых при моделировании. Операторы формирования реализаций случайных процессов и решают задачу преобразования случайных чисел стандартного вида в реализации случайных процессов с заданными свойствами. В операторных схемах моделирующих алгоритмов операторы формирования реализаций случайных процессов мы будем обозначать символом Φ .

3. Операторы формирования неслучайных величин

При моделировании сложных процессов приходится формировать не только реализации случайных объектов, но и различные константы и неслучайные функции времени. Сущность операций, выполняемых при таком формировании, принципиально ничем не отличается от сущности обычных вычислительных операций. Однако часто оказывается удобным из всей совокупности вычислительных операторов выделять специфический тип операторов формирования неслучайных величин, к которому относятся, главным образом, операторы, полностью повторяющие, либо в каком-то смысле имитирующие работу вычислительных или управляющих средств реального оборудования. В операторных схемах операторы формирования неслучайных величин обычно обозначают символом F_i .

Заметим, что вычислительные операторы A_i , как правило, оказываются вспомогательными операторами моделирующего алгоритма, а операторы F_i — основными.

4. Счетчики

Среди служебных операторов моделирующего алгоритма всегда имеются арифметические операторы, при помощи которых производится подсчет количества различных объектов, обладающих заданными свойствами. Такого рода операторы обычно называют счетчиками.

Счетчики имеют весьма широкое распространение. Они служат для подсчета количества деталей, прошедших ту или другую стадию обработки, количества свободных или занятых станков, количества бракованных или доброкачественных изделий, количества циклов производственного процесса и т. д. Результаты, выдаваемые счетчиками, часто являются исходными данными для логических служебных операторов, обеспечивающих синхронизацию моделирующего алгоритма.

В операторных схемах мы будем обозначать счетчики символом K_i .

При более детальном рассмотрении операторов моделирующего алгоритма могут быть выделены и другие типы операторов, обладающие некоторыми общими функциональными свойствами [3].

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

4.1. Математическое моделирование производственного травматизма

Математическое моделирование на ЭВМ производственного травматизма позволяет оперативно и без больших затрат оценить влияние на рабочий процесс практически любого фактора. Моделирование позволяет быстро получить сравнительные оценки для коллективов, различающихся по структуре и решаемым производственным задачам, что редко достижимо в натурном эксперименте. Все это делает целесообразным применение математического моделирования при выборе рациональных параметров и состава коллектива, формировании «эталонных» или «оптимальных» характеристик травматизма и профзаболеваемости. Кроме того, возможен поиск причин, вызывающих отклонение реальных характеристик от «эталонных», выявление предельных возможностей коллектива и поиск путей его модернизации.

Моделирование на прикладном уровне включает в себя схематизацию социальной системы в виде сосредоточенных элементов, обладающих способностью как накапливать энергию (потенциальную или кинетическую), так и необратимо ее рассеивать.

Адекватная динамическая модель должна удовлетворять двум основным требованиям: обеспечивать правильное качественное отображение динамических процессов и количественное описание этих процессов с принятой степенью точности. Под оптимальной адекватной динамической моделью понимается максимально простая модель, удовлетворяющая указанным двум требованиям адекватности. Под составной динамической системой понимается система, состоящая из двух или более взаимодействующих между собой динамических подсистем. Составные динамические системы позволяют при их исследовании использовать характеристики подсистем. Динамические характеристики подсистем могут быть найдены по материалам научных исследований. Кроме того, необходимо, чтобы математическая модель отвечала таким требованиям, как наглядность, простота формализации, доступность для специалистов смежных областей.

Методика опирается на подход, основанный на формировании схем замещения объектов на основе теории информационных цепей. Под информационной цепью будем подразумевать совокупность источников и носителей информационных потоков, составляющих динамическую систему и взаимосвязанных по факторам, возникающим в результате внешнего воздействия. Методика позволяет определять передаточные функции динамических систем по схемам замещения, а их динамические свойства исследовать на основе анализа амплитудно-частотных характеристик входных и выходных параметров. При этом методика учитывает вероятностный характер внешнего влияния.

Рабочий коллектив – система, которая может рассматриваться как некоторая структурированная среда, включающая управляющие подсистемы. В ряде случаев она имеет разветвленный характер, вследствие чего отмечается взаимное влияние друг на друга отдельных ее подсистем. Все это находит отражение в характере протекания динамических процессов в исследуемой системе. В частности, отмечается возможность неустойчивости исследуемой системы.

Чтобы учесть случайные факторы при обосновании малоопасных режимов работы коллектива в процессе выполнения технологических операций, необходимо установить вероятностно-статистические оценки показателей – математические ожидания $M(y)$, дисперсии $D(y)$, среднее квадратическое отклонение u_y , коэффициенты вариации, v_y а также некоторые другие количественные характеристики. При установлении вероятностно-статистических оценок выходных параметров применяется метод функций случайных аргументов. Его сущность состоит в том, что коллектив рассматривается в виде модели "вход-выход" (рис. 1).

Входная x_i и выходная y_i переменные величины определяются детерминированной (неслучайной) функциональной зависимостью $y_i = f(x_i)$. В качестве функций связи применяются функции, полученные при аппроксимации кривых, полученных после статистической обработки данных о состоянии производственного травматизма и профзаболеваемости на исследуемом предприятии.

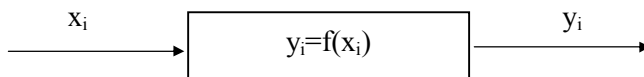


Рис. 1. Модель "вход–выход" системы:
 x_i – входная величина, y_i – выходная величина,
 $y_i = f(x_i)$ – функция связи

Таким образом, для основных оценок показателей травматизма с учетом вероятностного характера внешних воздействий необходимо установить функцию связи $f(x)$ и закон распределения аргумента $\varphi(x)$. Помочь в этом может использование метода информационных цепей. Метод основан на формировании эквивалентной схемы замещения объекта, представляющей собой его топологическое отображение в виде определенным образом связанной совокупности условных обозначений ее элементов. Причем в схему включаются те элементы, которые оказывают существенное влияние на решение задачи.

В большинстве систем можно выделить три типа простейших элементов-носителей энергии:

- элементы, в которых происходят необратимые потери (диссипация) энергии (электрические сопротивления и проводимости, их информационные аналоги – забываемость и восприимчивость);
- элементы, обладающие способностью накапливать потенциальную энергию (емкость, память);
- элементы, обладающие способностью накапливать кинетическую энергию (индуктивность, инерционность мышления).

Сочетанием этих простейших элементов, а также источников фазовых переменных (источников энергии) может быть получена схема замещения сложной информационной цепи. Для рассмотренных элементов форма выражающих их компонентных уравнений оказывается одинаковой, т. е. для информационных цепей можно применить методы расчета электрических цепей с учетом аналогии. При этом параметры схемы замещения записываются в единицах измерения либо информационных величин, либо электрических.

Остановимся подробнее на описании схемы замещения и математической модели. При построении эквивалентных схем

используют условные обозначения, принятые в электротехнике. Выделение интегрального параметра - ригидности человеческой психики - является одной из особенностей данного метода.

При построении схемы замещения информационной цепи объекта будем исходить из того, что любая его подсистема может быть отображена единичной схемой, представляющей собой определенным образом связанную совокупность элементов, способных как накапливать энергию (потенциальную или кинетическую), так и необратимо ее рассеивать.

Природа рассеивающих элементов различна: одним из них характеризуют потери информации во время обучения (особенность человеческой психики не воспринимать все 100 % входящей информации), а другие – потери информации с течением времени (долговременная память человека постепенно теряет накопленную информацию).

Если человеческий коллектив рассматривать как четырех-полюсник, то можно ввести понятие входных и выходных величин. На входе в рабочий коллектив действуют травмообразующие факторы и факторы, приводящие к профессиональной заболеваемости (с учетом того, что по данным медиков 50 % заболеваний так или иначе вызваны производственной деятельностью человека (рис. 2)).

Опасные и вредные производственные факторы по природе воздействия подразделяются на физические, химические, биологические и психофизиологические. Принимая данные факторы как вероятностно-статистические процессы, считаем необходимым разделить их на A – «аналоговые» (уровень освещенности рабочих мест, температура воздуха, относительная влажность, скорость движения воздушных масс и т. д.) и на D – «цифровые» (импульсные) или дискретные (наличие или отсутствие заземления, защитных кожухов на электроприводах, крышек люков в полу и т. д.). Аналоговость процесса можно обосновать соображением о непрерывном изменении исследуемой величины с течением времени, т. е. связать физическую величину и время некой функцией:

$$A=f(t), \quad (5)$$

где A – величина аналогового фактора (уровень освещенности рабочих мест, температура воздуха и т. д.); t – время (например, часы рабочей смены).



Рис. 2. Факторы, воздействующие на рабочий коллектив

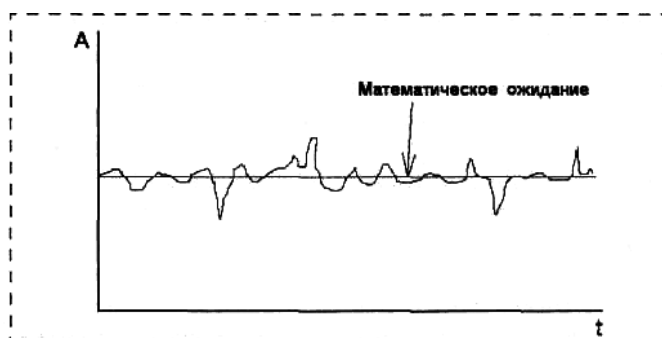


Рис. 3. Вероятность – статический процесс изменения травмообразующего фактора с течением времени

Величина той же освещенности рабочих мест обосновывается требованиями стандартов, поэтому в больших пределах меняться не может — соответственно все изменения незначительно варьируются с течением времени вокруг математического ожидания величины, определенной требованиями нормативно-технической документации (рис. 3).

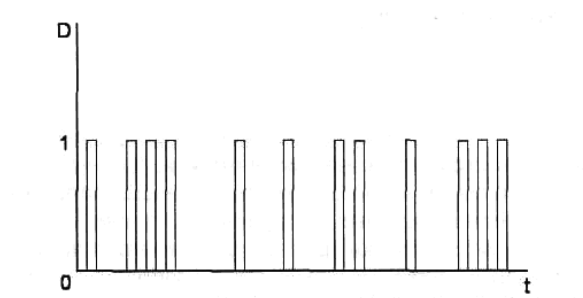


Рис. 4. Изменение дискретных факторов безопасности с течением времени

Большую сложность представляют для исследования "цифровые" (импульсные) факторы. Для упрощения можно обозначить присутствие того или иного устройства безопасности или средства труда как «единицу», отсутствие – как «ноль». В таком случае величина (амплитуда) сигнала с течением времени (рабочей смены) не меняется, однако на другой день ситуация может измениться (рис. 4). Например, на другой день может быть восстановлено заземление или может появиться отсутствующий огнетушитель (накануне величина данных факторов была равна «нулю»), но может одновременно оказаться не закрытым люк в полу (который до этого был закрыт – накануне данный фактор был равен «единице»).

Сложность исследования данного процесса в том, что для анализа случайного процесса необходимо использовать частотное модулирование – амплитуда всех «столбиков», представляющих каждый тот или иной фактор безопасности, неизменна, но частотная плотность меняется с течением времени. В случае с «аналоговыми» процессами можно для упрощения определить эквивалентный сигнал, суммирующий их все, а далее использовать для анализа амплитудное модулирование.

Необходимо отметить, что аналоговые факторы в основном приводят к развитию профессиональных заболеваний (например, высокая влажность при низкой температуре воздуха приводит к хроническому воспалению верхних дыхательных путей), а дискретные – к травмам (отсутствие заземления приводит к

электротравмам). Тем не менее, нельзя полностью разделять эти два потока: некоторые аналоговые входные воздействия могут приводить к травмам (например, низкая освещенность), а дискретные – к профессиональным заболеваниям (например, отсутствие вентиляционных люков). При этом можно провести корреляцию между этими двумя потоками.

Кроме травмообразующих факторов в систему входит обучающая информация (лекционные занятия при проведении повышения квалификации или самостоятельные занятия в системе самообразования). Данный процесс можно представить также в виде стационарного стохастического процесса, поскольку рабочий коллектив состоит в большинстве из профессионалов, имеющих специальное образование - поэтому в данном случае отсутствует период накопления информации от нуля до установившегося значения, как у школьников и студентов.

Входная информация поступает в рабочий коллектив, который схематично можно представить совокупностью блоков (рис. 5).

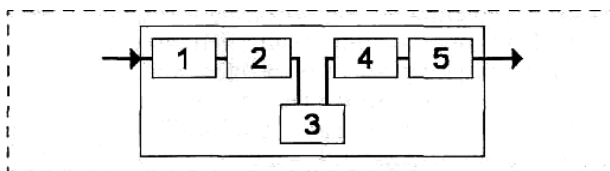


Рис. 5. Информационный поток в рабочем коллективе

Блок 1 на входе в систему можно представить неким фильтром, в котором необратимо теряется часть поступающей информации. Причиной этого является несовершенство человеческой памяти, которая не может фиксировать всю поступающую информацию без выпадений. Блок 2 – блок неосознанного "противодействия" сознания человека поступающей информации. Дело не в антипатии личностей – обучаемого и обучающегося, а в массиве накопленной прежде информации, инерционность которого значительно тормозит процесс усвоения новых знаний. Блок 3 – долговременная память человека, хранящая полученные знания. Блок 4 во многом аналогичен блоку 2, но в данном

случае поток информации встречает противодействие со стороны других коллективов — например экзаменующая комиссия при проверке знаний электротехнического персонала. Блок 5 — выходной фильтр, аналогичный блоку 1. С течением времени многие навыки теряются, причем часто встречаются ситуации, когда теоретические знания сохраняются, но человек, например, в силу преклонного возраста или приобретенных заболеваний, не может их внедрять в полной мере в рабочий процесс.

Для формализации и упрощения анализа протекающих процессов в системе предлагается ввести эквивалентную схему замещения, в которой вышеперечисленные блоки заменены на электротехнические аналоги, а сам поток информации (и другие входные потоки) представлены в виде переменного электрического тока (рис. 6).

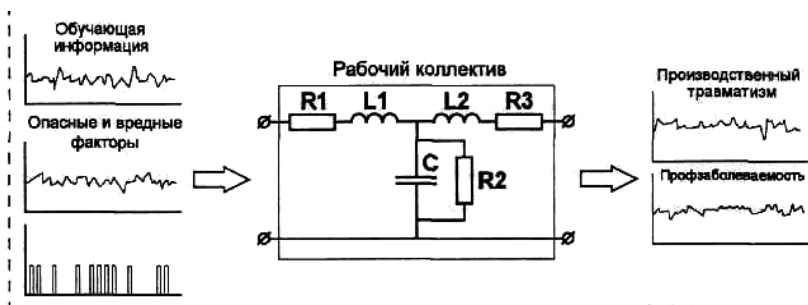


Рис. 6. Зависимость производственного травматизма и профзаболеваемости рабочего коллектива от входных параметров

Применение положений теории информационных цепей отвечает таким важным требованиям, как наглядность математической модели, простота формализации, доступность для специалистов смежных областей, возможность исследования структурированных разветвленных систем, а также быстрота и точность формирования компьютерных моделей.

Рассмотрим рабочий коллектив как пассивный четырехполюсник (зададимся условием, что активные элементы — источники тока и напряжения — в системе отсутствуют) с Т-образной эквивалентной схемой замещения. При этом диссипативный

элемент R1 соответствует необратимым потерям информации на входе в систему (например, при записи конспектов лекций человек физически не успевает фиксировать все фразы лектора). Индуктивный элемент L1 – накопитель кинетической энергии потока информации – можно представить как субъективное сопротивление входному потоку информации при наличии остаточных знаний от предыдущей деятельности человека. Чем старше становится человек, тем больший профессиональный опыт он приобретает. При этом часто специалист начинает самонадеянно считать собственный опыт самодостаточным, после чего любые попытки преподнесения ему новых знаний он воспринимает только через призму накопленной прежде информации. Нередко новая информация в корне противоречит его опыту, и специалист замыкается в себе, отвергая не только данную «противоречивую», как ему кажется, информацию, но и идущую с ней в связи нейтральную. По аналогии с электротехническими элементами начинает идти встречный поток накопленных прежде знаний, который не пускает в сознание входящую информацию, значительно повышая входное сопротивление. Тем не менее, при этом не происходит необратимой потери информации, поскольку психологически человек все же частично воспринимает «негативный», в его понимании, поток знаний – запоминание «от противного».

Далее информация откладывается в долговременной памяти человека емкостной элемент C, накапливающий потенциальную энергию потока знаний. В отличие от цифровых и даже аналоговых хранителей мозг отдельного человека и коллективная память рабочей бригады с течением времени теряют накопленную информацию – конденсатор разряжается на резистор R2, величина сопротивления которого может колебаться в значительных пределах, в первую очередь в зависимости от возраста отдельного человека или среднего возраста работников коллектива. В дальнейших исследованиях необходимо обосновать оптимальную периодичность как проверки знаний, так и повышения квалификации, исходя из величины эквивалентного сопротивления данного диссипативного элемента.

При проведении проверки знаний при повседневной работе информационный поток от человека (от совокупности работни-

ков) идет, преодолевая индуктивное сопротивление L_2 (если человек взаимодействует с другим человеком) и диссипативное сопротивление R_3 (если человек взаимодействует непосредственно со средствами труда). Процессы в резисторе R_3 можно представить как необратимую потерю не столько теоретических знаний (они были потеряны в резисторе R_2), сколько практических навыков (моторная память, ухудшающаяся также с возрастом). Индуктивное сопротивление L_2 возникает в результате общения людей в процессе производства. Наиболее наглядно это проявляется в ходе проведения экзаменов – экзаменуемый владеет неким шаблоном идеального ответа, и любые отступления от него, даже правильные по существу, а просто выраженные другими словами, вызывают у экзаменующего рефлекторное отторжение, которое не все люди способны полностью преодолеть. В экстремальных ситуациях общение людей может привести к несчастному случаю только потому, что в условиях явного дефицита времени команда, поданная нестандартными фразами, может быть неадекватно воспринята (или воспринята правильно, но время будет упущено).

На выходе Т-образного четырехполюсника появляются два стационарных стохастических процесса - производственный травматизм и профессиональная заболеваемость. В данном случае оба процесса носят аналоговый характер, что облегчает их перевод в частотную форму для дальнейших исследований.

Таким образом, теория информационных цепей позволяет проводить исследования социальных систем в области безопасности труда и рассматривать любой рабочий коллектив как сложную динамическую систему. Проблема заключается в создании методов статистической обработки случайных входных и выходных параметров системы, идентификации передаточной функции, а также и формировании эквивалентного входного сигнала, включающего в себя аналоговую и дискретную составляющие.

4.2. Прогнозирование и моделирование возникновения опасных ситуаций

Прогнозированием понимается определение перспектив какого-либо явления. Необходимым условием успешного обеспечения БЖД является достоверный прогноз уровня травматизма и заболеваемости. Прогноз травматизма базируется на прогнозировании опасных ситуаций, определении риска их реализации. Общепринятыми методами научного прогнозирования являются экстраполяция, математическое моделирование и экспертные оценки, экстраполяция основывается на анализе временных рядов или результатах оценки тенденций развития современной техники. Именно так был обоснован прогноз комиссии акад. В. А. Легасова в начале 80-х годов о повсеместном назревании крупных аварий и катастроф (один из самых достоверных прогнозов в БЖД). При этом в качестве главной причины тяжелых последствий был назван недостаточных учет эргономических требований при разработке и эксплуатации современной техники. На уровне предприятия необходимость прогноза аварий и НС возникает при каждом изменении технологии и установке новых машин и аппаратов. Только обоснованный прогноз обеспечит в этом случае успешную профилактику производственного травматизма и заболеваемости. Математические модели при анализе и прогнозировании НС и травматизма разрабатываются для получения обоснованных прогнозов, установления количественных зависимостей, выявления скрытых закономерностей процессов, особенно в ситуациях, когда отсутствует возможность экспериментальной проверки безопасности новых конструкций и технологий. Полученные при расчетах значения индивидуального и социального риска, результаты прогнозирования и математического моделирования должны использоваться для нормирования опасности НС, обоснования нормативов для численности службы ОТ на предприятиях и количества обязательных занятий с рабочими по ОТ. В ФРГ, например, в зависимости от опасности и вредности труда устанавливается одночисловой нормативных показатель, меняющийся от 0,2 (работники управления) до 5,0 (поземные работы). С учетом

этого показателя и количества работающих определяется и количество работников по ОТ. В некоторых странах, например, в Голландии установлен в законодательном порядке приемлемый уровень индивидуального риска – 10^{-6} гибели/год, а в РФ минимально допустимый риск пожаров – 10^{-6} .

Максимально приемлемый риском для экосистем считается тот, при котором страдает 5 % видов биогеоценоза.

Всё большие тенденции в современном мире набирает применение высоких технологий для обеспечения безопасности жизнедеятельности работников предприятий – это различные информационные системы управления безопасностью (ИСУБ), в которые как важный составляющий элемент входит Автоматическая Система Управления Пожаротушением (АСУП); в ней для прогнозирования и расчёта опасных факторов, их влияния на ситуацию, и схемы развития техногенной аварии применяется математическое моделирование пожароопасности. Новые принципы, положенные в математическое моделирование, позволяют применять его для для всё более широкого круга проблем – от прогнозирования лесных пожаров до расчёта технологичных способов пожаротушения на объектах промышленности с применением рабочих станций на основе персональных компьютеров. Развитие компьютерной техники и математического моделирования позволило создавать математические модели развития пожаров, анализировать пожарную опасность защищаемого объекта, упростить схему обнаружения пожара и пуска автоматического управления пожаротушением (АУП), способствовать оценке эффективности выбранных средств системы Автоматической Противопожарной Защиты (АППЗ) (пожарных извещателей), упростить гидравлический расчёт АУП. Весь этот комплекс прогнозирования и в первую очередь моделирования условий возникновения ЧС уже давно применяется в развитых странах Европы и постепенно находит применение и в развивающихся странах Центральной Азии. В настоящее время Казахстан переходит как и многие другие активно развивающиеся азиатские государства от системы нормативных трудовых отношений к рыночной. Компетенция предприятия становится базовым, определяющим фактором. Любое производство, будь то добыча угля, нефти или урана, рассматривается прежде всего

как бизнес. И наёмный работник своё рабочее место должен рассматривать тоже как бизнес, обеспечивающий его благосостояние, здоровье и безопасность. Но при этом повышаются требования к квалификации и ответственности за принятые решения. Никакая автоматическая система безопасности, даже тот же суперкомпьютер, не сможет заменить реального человека, его оценку происходящей ситуации. Но она позволит создать технологию подготовки и решения задач по предупреждению и тушению пожаров и др. ЧС, упростить расчёт, например, огневых испытаний. В таких случаях используются математические методы, позволяющие с помощью итераций дать ответы приближительной или высокой степени точности. Наиболее эффективно математическую модель можно реализовать на компьютере в виде алгоритмической модели (модель точечного очага пожара, оценка применения тепловых пожарных извещателей, расчёт АУП), математическое моделирование какого-либо явления (пожара, взрыва, задымления и т. д.) за счёт отображения этих явлений средствами машинной графики, т. е. перед коллективом исследователей демонстрируется своеобразный видеоролик в 3D, снимаемый в реальном масштабе времени. По такому принципу моделируются последствия падения самолётов, столкновения транспортных средств, ядерные взрывы на виртуальных макетах городов и т. п. Инновацией здесь является внедрение аппаратно-программных комплексов 3D-моделинга, использующихся в разработке компьютерных игр и анимационных фильмов, а также производства спецэффектов в современных фильмах, способных к разработке на основе искусственной программируемой физики (основана на математических моделях физических взаимодействий объектов) графических фильмов и демонстраций возникновения и последствий техногенных аварий и ЧС. Трёхмерная графика здесь приходит на помощь математическому моделированию, т. к. сама основана на физических и математических моделях и их взаимодействии (физика частиц (моделирование огня), законы преломления света, физика упругих тел, различные виды деформаций). Наглядность здесь очень велика. Именно она и является вкпе с эффективностью поводом к внедрению математического моделирования с привлечением 3D-моделинга в расчёты объектов охраны труда.

4.3. Моделирование обеспечения безопасности труда

Согласно современным представлениям, основная идея реализации программно-целевого планирования и управления сложными системами сводится к разработке совокупности целевых программ и созданию системы оперативного управления их выполнением. При этом *программа* обеспечения безопасности конкретного производственного или технологического процесса должна представлять собой комплекс взаимосвязанных мероприятий, выполнение которых позволяет реализовать одну из задач, поставленную перед соответствующей системой.

От используемых ныне подобных планов такая целевая программа будет отличаться тем, что: а) включает все этапы жизненного цикла используемого оборудования – от проведения поисковых исследований до его ликвидации,

б) разрабатывается головным разработчиком процесса после выдачи ему задания и согласовывается с заказчиком, в) содержит четкую количественную формулировку цели и условия оценки степени ее достижения, г) определяет необходимые ресурсы, сроки и промежуточные результаты. Считается также, что данная программа должна иметь примерно одинаковые по сложности блоки и структурные уровни, соответствующие органам оперативного управления и этапам жизненного цикла производственного процесса, обеспечивать контролепригодность, наглядность и сопрягаемость с традиционными планами и смежными программами.

Система *оперативного* управления обеспечения безопасности рассматриваемого процесса в техносфере должна быть предназначена для создания условий, максимально соответствующих выполнению программы. Основу такой системы могут составлять создаваемые на отдельных этапах его жизненного цикла временные органы и средства оперативного управления, которые будут взаимодействовать с подконтрольными им человеко-машинными системами. Наиболее важными задачами оперативного управления безопасностью следует считать регулирование ресурсов, необходимых для предупреждения аварийности и травматизма, контроль сроков и качества выполнения соответствующих мероприятий, разработку и реализацию при необходимости корректирующих воздействий.

Построение программы обеспечения безопасности должно начинаться одновременно с разработкой других связанных с ней программ – надежности, эргономичности и качества продукции, которые будут использоваться в последующем как составные части рассматриваемого документа. Структура же программы может включать состав показателей безопасности и требования к их значениям, основные принципы и мероприятия обеспечения и контроля заданных показателей при проектировании, изготовлении, отработке и производстве (эксплуатации) соответствующего оборудования, подборе и обучении персонала, создании для них должных условий рабочей среды, а также порядок корректировки программы.

В терминах теории оптимального управления разработка программы обеспечения безопасности сводится к определению объема мероприятий, реализация которых позволяет обеспечить требуемую траекторию годографа вектора $E(t)$ выходных характеристик соответствующей системы в коридоре его допустимых значений. Иллюстрация этой задачи показана на рис. 7. Двумя кривыми, которые изображают возможные проекции годографа этого вектора на плоскость фазовых координат, а затемненная там область – проекцию коридора допустимых значений векторного показателя $E(t)$.

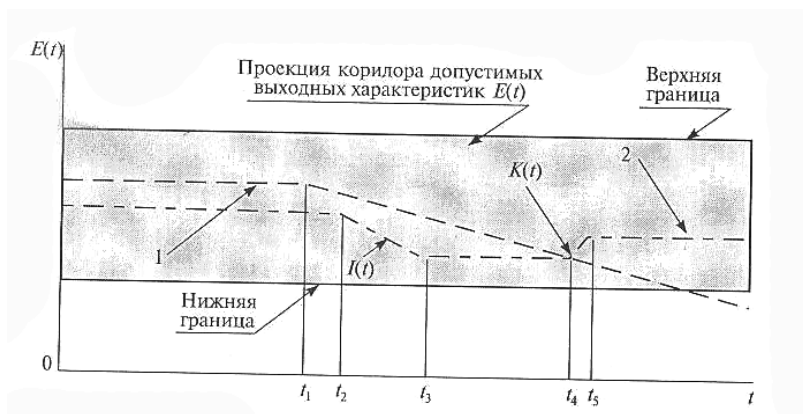


Рис. 7. Изменение вектора выходных характеристик

Главное предназначение системы оперативного управления процессом обеспечения безопасности производственных или технологических процессов будет заключаться в создании условий, необходимых для вывода соответствующих показателей на заданный уровень и удержания их в допустимых пределах. Подобная цель может быть достигнута путем периодической оценки значений $E(t)$, а также выработки и реализации при необходимости вектора управляющих воздействий $K(t)$.

При создании и функционировании рассматриваемой системы следует стремиться к управляющим воздействиям, учитывающим прогнозируемые возмущения, и минимизировать ущерб, возникающий при отклонении вектора $E(t)$ от заданной траектории. Штриховыми линиями на рис. 7 изображены две проекция реализации данного вектора: 1 – без учета управляющих воздействий со стороны системы оперативного управления, 2 – с учетом ее функционирования. А вот отрезками $I(t)$ и $K(t)$ там показаны изменения проекций годографа этого вектора соответственно – по причине появления в моменты времени t_1 , t_2 внешних возмущений и отработки корректирующих воздействий на его интервале t_3 - t_5 .

В целом же внедрение программно-целевого подхода в практику обеспечения и совершенствования безопасности может быть разделено по меньшей мере на два таких взаимосвязанных и крупных этапа:

1) *стратегическое* планирование – с целью выработки общей идеологии и программы обеспечения безопасности конкретных процессов;

2) *оперативное* управление – для создания условий, максимально соответствующих выполнению такой программы.

Для более детального изучения особенностей реализации программно- целевого планирования и управления процессом обеспечения безопасности создаваемых процессов и совершенствования уже существующих рассмотрим подробнее содержание мероприятий каждого из двух только что перечисленных этапов. При этом начнем со стратегического планирования, обобщенная структура которого представлена на рис. 8.

Стратегическое планирование мероприятий безопасности должно содержать следующие периодически повторяющиеся шаги:

- а) уяснение приоритетных задач обеспечения безопасности рассматриваемых здесь техносферных процессов;
- б) прогнозирование возможных ситуаций (вероятных изменений в состоянии конкретных человекомашинных систем и внешней относительно их среды);
- в) выбор и обоснование основных способов обеспечения безопасности их функционирования;
- г) определение функций и мероприятий по предупреждению техногенных происшествий;
- д) выделение и распределение ресурсов по этапам жизненного цикла производственного или технологического процесса;
- е) отработка вопросов координации и взаимодействия при планировании обеспечения безопасности в техносфере.

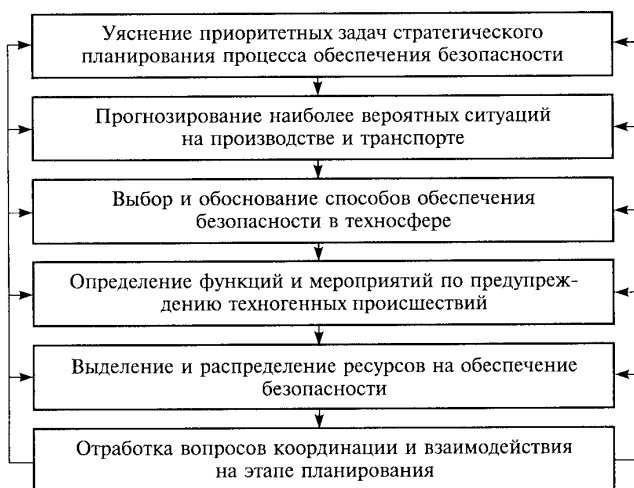


Рис. 8. Структура этапа планирования обеспечения безопасности

При уяснении приоритетов в обеспечении безопасности конкретных техносферных процессов следует исходить из их предназначения и степени потенциальной опасности. Такой анализ необходим для перераспределения требований к уровню безопасности функционирования отдельных человеко-машинных систем или эксплуатации соответствующего оборуду-

дования. Так, если риск каких-либо работ чрезвычайно высок, то повышенная угроза причинения техногенного ущерба персоналу и проживающему вблизи населению должна быть компенсирована дополнительными гарантиями, привилегиями и льготами.

В процессе прогнозирования условий функционирования конкретных человеко-машинных систем и их изменения в ходе взаимодействия с внешней средой нужно вначале считать, что главные задачи системы обеспечения безопасности достижимы в принципе, а требуемые для этого средства и другие ресурсы реально доступны. Используя данные предположения в качестве исходных, далее разумно оценить характер возможного изменения качества компонентов исследуемых систем при ухудшении окружающих условий. В последующем это позволит спрогнозировать реальные ситуации, предусмотреть дополнительные ресурсы или откорректировать поставленные задачи в новых, чаще всего усложнившихся условиях обстановки.

Разработка основных способов обеспечения безопасности рассматриваемых здесь процессов должна проводиться с учетом принятых представлений о факторах аварийности и травматизма, а также средств, выделяемых для их предупреждения. На стадии создания технологического оборудования основными способами обеспечения безопасности следует считать повышение безотказности силовых и других ответственных элементов его конструкции, выбор наиболее совершенной технологии выполнения работ, создание эргономичных производственных помещений и рабочих мест. При непосредственной подготовке и выполнении конкретных работ основные пути обеспечения, безопасности могут сводиться к профессиональному отбору, обучению и воспитанию персонала в духе технологической дисциплинированности, к поддержанию оборудования и технических средств защиты в исправном состоянии, к поддержанию качества рабочей среды.

При определении функций и мероприятий обеспечения безопасности нужно исходить из иерархичности структуры соответствующей системы и возможности перераспределения решаемых задач между ее основными компонентами – человеком и машиной. Основная идея такого распределения будет заклю-

чаться в непрерывном уточнении возложенных на них задач или обязанностей по мере изменения складывающихся условий, тогда как при определении объема необходимых мероприятий следует руководствоваться принципами предупреждения и снижения техногенного ущерба.

При распределении ресурсов на обеспечение безопасности между этапами жизненного цикла каждого технологического процесса целесообразно отказаться от традиционного введения дополнительных организационно-технических мероприятий в ходе его реализации вместо этого следует заблаговременно предусмотреть специальные средства, например технические средства защиты и технологические способы предупреждения происшествий. Этот подход более экономичен: затраты на внедрение одних и тех же усовершенствований уменьшаются примерно на порядок - каждый раз по мере перехода от серийного производства к опытному, а от него – к изготовлению технологического оборудования и его проектированию.

В процессе отработки вопросов взаимодействия при планировании обеспечения безопасности разрабатываемых технологических процессов необходимо увязать цель и количественные показатели соответствующей системы с целями и показателями взаимодействующих систем, а также согласовать необходимые документы. При возникновении противоречий или несоответствий следует откорректировать цель и средства рассматриваемой системы или перераспределить функции между ее отдельными элементами и компонентами управляемого объекта.

В сущности, к только что рассмотренному стратегическому планированию обеспечения безопасности в техносфере нужно относиться как к многошаговому итерационному процессу и продолжать его до достижения согласованных целей и утверждения соответствующих документов. В тех случаях, когда имеющимися в распоряжении средствами не удастся удовлетворить требования безопасности, должна быть откорректирована сама целевая программа.

Второй этап программно-целевого обеспечения безопасности производственных и технологических процессов – собственно оперативное управление – также (с определенной условностью) может быть разделен на ряд следующих основных шагов: а) уточнение основных задач и способов управления безо-

пасностью; б) сбор и обработка информации о реальных ситуациях (состояниях управляемых человекомашинных систем и внешней среды); в) оценка необходимости и способов альтернативных воздействий на них; г) обоснование и выбор комплекса оптимальных организационно-технических мероприятий; д) разработка плана их реализации, организация и контроль выполнения каждого из составляющих его мероприятий.

Рассмотрим подробнее данный этап, наглядно представленный на рис. 9.

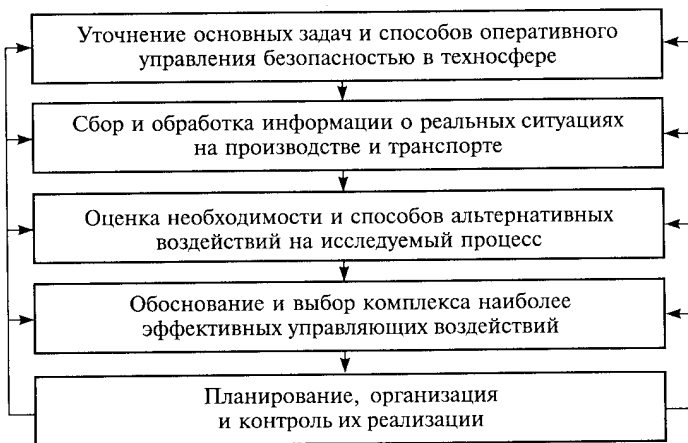


Рис. 9. Структура этапа оперативного управления безопасностью

Уточнение основных задач и способов оперативного управления процессом обеспечения безопасности может проводиться параллельно с определением условий реализации соответствующей целевой программы. При наличии в ней заданных количественных показателей, а также методик их контроля и поддержания с помощью корректирующих воздействий данный этап может осуществляться по заранее подготовленным алгоритмам. В тех же случаях, когда разработанная программа не совершенна или условия проведения техносферного процесса постоянно меняются, способы оперативного управления должны быть адаптивными, гибко реагирующими на изменение обстановки и возможную корректировку

задач обеспечения безопасности.

Сбор и обработка информации об уровне безопасности контролируемого процесса должны быть предназначены для оценки не только степени удовлетворения последней заданным показателям, но и необходимости в выработке корректирующих воздействий. Основными требованиями к данному этапу оперативного управления следует считать непрерывность получения подобных сведений и их достоверность. Своевременная и точная информация о реальном положении дел с обеспечением безопасности и обозначившихся при этом тенденциях – необходимое условие для оперативного вмешательства в производственный или технологический процесс с целью разработки адекватных обстановке управляющих воздействий.

Оценку необходимости и возможных способов реализации корректирующих мер нужно осуществлять при угрозе недопустимого рассогласования между реальными и требуемыми значениями показателей безопасности техносферного процесса. Решение о внедрении организационно-технических мероприятий, необходимых для поддержания или повышения фактического уровня безопасности может быть принято после оценки их предполагаемой эффективности, например, с помощью рассмотренных далее моделей и методов системного анализа и синтеза.

Обоснование и выбор комплекса наиболее эффективных корректирующих воздействий – один из самых ответственных моментов в оперативном управлении безопасностью проведения производственных и технологических процессов. Его осуществление должно проводиться с учетом полученной информации о степени рассогласования соответствующих количественных показателей и предполагаемой эффективности альтернативных мер по его устранению. Успех при реализации данного этапа оперативного управления не возможен без оптимизации принимаемых решений с помощью современных математических методов и вычислительных средств.

Планирование, организация и контроль осуществления корректирующих воздействий может стать либо заключительным шагом оперативного управления обеспечением безопасности (см. рис. 9), либо основанием для возобновления его очередного цикла. Все это в значительной мере определяется соответст-

вующей системой, декомпозирующей управление по соответствующим функциям, контурам и циклам. Иногда целесообразно, чтобы структура органов оперативного управления воспроизводила процесс подготовки и реализации принимаемых решений, т.е. включала компоненты, предназначенные для уточнения задач и способов управления, сбора и обработки необходимой для этого информации, оценки необходимости и способов коррекции, выбора наиболее эффективных для этого мероприятий, планирования, организации и контроля их выполнения.

Вследствие несовершенства соответствующих целевых программ управление данным процессом в настоящее время зачастую сводится лишь к последнему элементу только что рассмотренной структуры – планированию мероприятий по исключению повторяемости техногенных происшествий, организации и контролю их выполнения на всех без исключения рабочих местах. При этом в подавляющем числе случаев объем и содержание таких мероприятий а также выделенные для них ресурсы регламентированы действующими нормативными документами.

Все это свидетельствует о необходимости совершенствования управления процессом обеспечения безопасности на основе программно-целевых методов. Один из первых шагов в этом направлении - совершенствование структуры и содержания соответствующих мероприятий.

4.4. Структура мероприятий по совершенствованию управления обеспечением безопасности

При определении содержания исследуемых здесь мероприятий и последовательности их реализации на практике будем базироваться на основных положениях только что рассмотренного программно-целевого подхода к управлению процессом обеспечения безопасности в техносфере, а также на принятых выше исходных предпосылках и известном опыте. Отсюда следует, что совершенствование структуры управления безопасностью также должно основываться на системном подходе, под которым подразумевается учет всех наиболее существенных для этого процесса факторов.

Уточним также, что основными условиями практического осуществления этого подхода по отношению к сложным системам

считаются универсальность, научность, конкретность, учет неопределенностей, ориентированность на перспективу и чувствительность к затратам. Для управления безопасностью это соответствует необходимости: а) использования достижений различных отраслей теории и практики; б) стремления к использованию таких критериев, которые могут быть проверены и подтверждены другими специалистами; в) поиска путей учета неопределенности факторов аварийности и травматизма; г) широкого использования как статистических данных о происшествиях, так и методов прогнозирования возможности их появления в будущем; д) оценки и оптимального распределения соответствующих ресурсов.

Кроме того, следует иметь в виду, что вследствие объективной сложности управляемого объекта (человеко-машинная система) принципиально невозможно одновременное выявление всех их существенных свойств, что указывает на потребность в непрерывно-последовательном характере этого процесса. Данное обстоятельство, а также принципы общесистемной методологии свидетельствуют о том, что каждая итерация должна начинаться с идентификации управляемого объекта и совокупности присущих ему в данный момент проблем. Выявленные при этом несоответствия между его реальным и желаемым положениями могут указывать на необходимость каких-либо улучшений, их возможность или целесообразность.

Приведенные рассуждения подводят нас к выводу о том, что структура мероприятий, связанных с синтезом управляющих воздействий по совершенствованию безопасности в техносфере, должна базироваться на уже упомянутой гибкой системной методологии. Иначе говоря, помимо собственно системного синтеза путей совершенствования управляемого и/или управляющего объектами реализации соответствующих мероприятий, позволяющих устранить проблемную ситуацию, в ней следует предусмотреть и такие вспомогательные шаги, как выявление проблемной ситуации, определение управляемого объекта и управляющего органа, разработка комплекса моделей и проведение соответствующих теоретических исследований.

Вытекающая из вышеизложенного структура синтеза мероприятий, направленных на совершенствование управления процессом обеспечения безопасности в техносфере, изображена на рис. 10.



Рис. 10. Структура процесса совершенствования безопасности объектов

Перед тем, как приступить к более подробному раскрытию приведенной здесь иллюстрации, укажем ее связь с рассмотренными ранее структурами системного анализа и системного син-

теза, а также дадим самую общую характеристику каждого из трех ее блоков, представляется, что такие предварительные замечания будут способствовать лучшему уяснению особенностей и предназначений только что предложенной последовательности мероприятий по совершенствованию управления безопасностью в техносфере.

Сравнительный анализ свидетельствует об их преемственности и определенном сходстве. Действительно, во всех этих случаях основанием для осуществления соответствующего процесса служит несоответствие между текущей и требуемой ситуациями. Его выявление указывает не только на потребность в устранении возникших там противоречий и идентификации соответствующей человеко-машинной системы, но и на необходимость декомпозиции цели такого процесса на более простые задачи.

Вместе с тем в этих трех структурах имеются различия, обусловленные предназначением интерпретируемых ими процессов. Действительно, целью моделирования и системного анализа может служить выявление закономерностей техногенных происшествий и прогноз связанного с этим риска, а в двух других случаях речь идет о системном синтезе мер по его снижению. Более того, основным способом реализации подобного синтеза является генерирование каких-либо альтернативных воздействий рекомендаций, а необходимым для этого средством служит моделирование, позволяющее выявить из них самые эффективные по выбранным критериям.

Что касается общей характеристики обсуждаемой здесь структуры, то уместно отметить следующие три момента:

а) первым этапом, предшествующим системному синтезу управляющих воздействий по совершенствованию безопасности в техносфере, является идентификация системы и имеющихся в ней противоречий;

б) вторым предварительным для такого синтеза этапом служат теоретические исследования, основанные на обработке имеющейся информации с целью определения эффективных способов устранения выявленных противоречий;

в) сама же процедура этого синтеза завершается оценкой выбранных альтернатив и реализацией корректирующих воздействий, чаще всего – оптимальных и рациональных.

Дадим более подробный комментарий к каждому блоку рис. 10, начиная с *идентификации* (выделения из окружения и уточнения состава) человеко-машинной системы. При выполнении этой работы необходимо исходить из того, что перед каждым элементом системы должна стоять определенная цель, т.е. его функционирование должно иметь явно выраженную временную и предметную направленность. Результат же такой идентификации может быть оформлен в виде дерева целей данной системы с их привязкой к конкретным техническим устройствам и должностным лицам.

Конечной же целью этого этапа служит выявление несоответствий и противоречий внутри человеко-машинной системы и в ходе ее взаимодействия с окружением. Обнаруженные здесь симптомы удобно представлять в виде таблиц связности между выявленными недостатками, этапами выполнения работ и их участниками, с одной стороны, и возможными способами их устранения и требуемыми ресурсами – с другой. Анализ подобной симптоматики, даже на интуитивном уровне, приведет к пересмотру представлений о значимости связей между элементами и структурными звеньями идентифицируемой системы.

Полученные на первом этапе сведения являются исходной базой для тщательного и всестороннего теоретического *исследования* рассматриваемой системы на предмет определения общей стратегии и конкретных управляющих воздействий по совершенствованию ее безопасности. В основу этого исследования может быть положен анализ накопленных к данному моменту данных и моделирование процесса появления в ней техногенного ущерба с помощью различных диаграмм влияния. Наиболее типичные задачи такого системного исследования помечены буквами в центральном блоке рис. 10.

На данном шаге целесообразно также выделить координационную, информационную и функциональную подструктуры исследуемой системы. Изучение этих звеньев и полученных при моделировании данных о закономерностях возникновения происшествий позволяет установить не только слабые места конкретной человеко-машинной системы, но и способы их возможного устранения. Чаще всего такие места следует искать на стыках структурных звеньев внутри системы или между нею и ок-

ружающей средой, где чаще всего наблюдаются всевозможные сбои, а также потери информации и ресурсов.

Результаты выполненных теоретических исследований следует использовать на третьем (завершающем в принятой структуре) этапе *совершенствования* управления безопасностью в техносфере. Именно здесь и осуществляется системный синтез соответствующих эффективных воздействий. Что касается собственно его процедуры, то она может быть разбита на такие шаги:

а) выбор размерностей пространства исходных данных, оптимизируемых параметров и ограничений;

б) построение векторов, соответствующих каждому такому фазовому пространству;

в) определение функции цели и метода ее оптимизации;

г) проведение вычислений и анализ результатов.

При этом обоснование наилучших или рациональных управляющих воздействий рекомендуется осуществлять в следующей последовательности:

а) выбор альтернатив, учитывающих достижимость цели, накопленный опыт и ресурсы, необходимые условия и факторы случайности;

б) модельный прогноз эффективности выбранной альтернативы и оценка возникшей в связи с этим ситуации – с учетом расстояния в факторном пространстве до цели, математического критерия и ожидаемого выигрыша;

в) отбрасывание непригодных альтернатив и выбор следующего шага - непосредственно к достижению цели, параллельно с другими шагами, на основе разумного компромисса.

В случае же оптимизации альтернативных управляющих воздействий в качестве соответствующего *критерия* целесообразно использовать а) максимум ожидаемой от них эффективности (снижения величин техногенного ущерба) при фиксированных затратах или б) минимум затрат на реализацию воздействий заданной эффективности. Учитывая общее знакомство читателя с методами оптимизации принимаемых решений, конкретизируем лишь ту их часть, которая касается постановки и решения соответствующих задач при функционировании человеко-машинных систем.

Считается, что условием, необходимым и достаточным для математически корректной постановки конкретных задач опти-

мизации, является определение:

а) критерия оптимизации $Z = f(x_i) \rightarrow \min(\max)$, т. е. показателя или параметра, в экстремуме которого (его максимальном или минимальном значении) заинтересован исследователь;

б) целевой функции $f(x_i)$, связывающей критерий с переменными $x_i (i = 1 \dots n)$, т. е. теми характеристиками системы, которые могут быть изменены при необходимости;

в) ограничений $g_j(x_i) \geq b_j (j = 1 \dots m)$ на ряд этих характеристик, являющихся функциями x_i ;

г) области значений учитываемых переменных:
 $x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}$.

Принципиальная же возможность математически строгой постановки задач оптимизации возникает лишь при аналитическом выражении критерия оптимизации Z и функций ограничений $g_j(x_i)$ через параметры x_i , изменяя которые можно найти экстремум целевой функции $f(x_i)$. Для совершенствования безопасности техносферных процессов в качестве целевой функции $Z = f(x_i)$ можно использовать показатели соответствующей системы: вероятности $P_o(\tau)$, $Q(\tau)$ и математические ожидания $M_\tau[Y]$, $M_\tau[Z]$, $M_\tau[S]$.

Зависимостями $f(x_i)$ между критерием оптимизации Z и оптимизируемыми параметрами x_i могут служить аналитические модели. Ограничения в рассматриваемых задачах будут касаться следующего: доступных ресурсов (средств, времени) – смысловые; природы рассматриваемых прогрессов и учитываемых переменных – структурные; особенностей принятой аксиоматики и области значений, принимаемых переменными, – специфические.

Последовательность решения оптимизационных задач в человеко-машинных системах обычно совпадает с рассмотренной ранее общей последовательностью математического моделирования, поскольку включает следующие основные этапы:

- 1) содержательная (словесная или вербальная) и концептуальная постановка задачи;
- 2) составление модели (математическая постановка задачи);
- 3) подготовка исходных данных по каждому из альтернативных воздействий (заполнение области допустимых решений – основы для определения их оптимальных значений);

- 4) поиск и выбор метода решения задачи;
- 5) разработка или подбор алгоритма (программы) вычислений вручную или на ЭВМ;
- 6) решение задачи (нахождение оптимального значения выбранного критерия);
- 7) верификация (проверка полученных результатов на правдоподобность) и системный анализ всего решения.

Что касается систематизации известных задач оптимизации человеко-машинных систем и методов их решения, то ее обычно проводят исходя из природы целевой функции $f(x_i)$, ограничений $g_i(x_i)$ и входящих в них переменных x_i . Одна из часто встречающихся классификаций, построенная с учетом указанных признаков, проиллюстрирована на рис. 11.

Следует заметить, что оптимизация человеко-машинных систем связана с решением наиболее сложных задач, характеризующихся стохастическими, нелинейно зависящими от переменных векторными критериями большой размерности, а потому и требующих введения целого ряда упрощающих допущений. Более подробные сведения об особенностях решения рассматриваемых задач могут быть почерпнуты в работах по избранным главам высшей математики.

В целом же приведенные выше сведения о порядке совершенствования управления безопасностью в техносфере на основе программно-целевого подхода могут интерпретироваться как преамбула к заключительному этапу трехзвенной формулы преобразования действительности: «созерцание – мышление – практика». Особо хотелось бы обратить внимание на показанный на рис. 10. итерационный характер совершенствования безопасности существующих на производстве и транспорте процессов, а также на необходимость использования при этом последних достижений теории и практики [4].

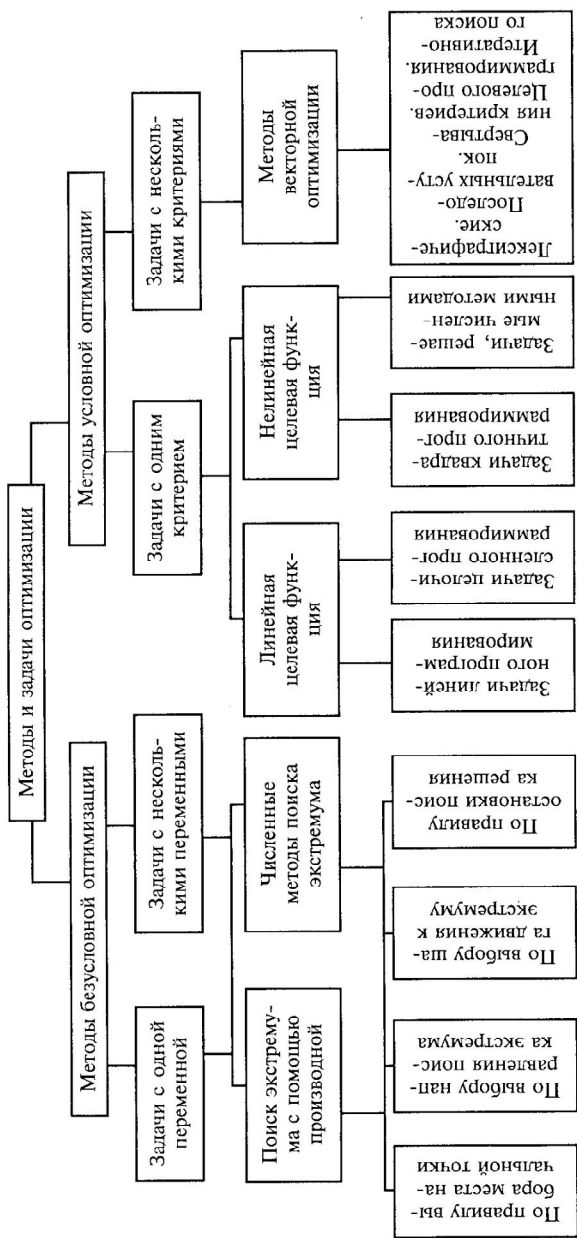


Рис. 11. Классификация методов и задачи оптимизации сложных систем

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Завершающей и, пожалуй, наиболее важной задачей программно-целевого подхода к совершенствованию безопасности в техносфере является поддержание требуемого качества и безопасности, непрерывно выполняемых в ней производственных и технологических процессов путем максимально возможного снижения техногенного ущерба.

5.1. Общие принципы поддержания требуемого уровня безопасности

Контрольно – профилактическая работа по предупреждению техногенных происшествий и снижению тяжести их последствий – часть оперативного управления процессом обеспечения безопасности, осуществляемого в ходе серийного производства продукции или массовой эксплуатации техники. Содержание этой работы может быть раскрыто с помощью, приведенной на рис. 12 модели, осуществляется она совместными усилиями органов управления (надзора) соответствующей системы и персонала конкретных объектов.

Цель контрольно-профилактической работы, как и всего оперативного управления безопасностью в целом, состоит в удержании выходных характеристик человеко-машинных систем в заданных пределах $[E_L(\psi), E_U(\psi)]$. Для ее достижения необходима информация о задачах $I(t)$ поднадзорных объектов и результативности $E(\psi)$ их функционирования, на основе которой и с помощью соответствующих средств могут вырабатываться корректирующие воздействия $K(t)$ возможность целенаправленного изменения или случайного искажения некоторых из перечисленных показателей рассматриваемого процесса учитывается на рис. 12 введением штрихов в их обозначения.

Для поддержания требуемого уровня безопасности в техносфере следует руководствоваться не только целью соответствующей подсистемы, но и принятой ранее концепцией аварийности и травматизма в техносфере. Напомним, что возникновение техногенных происшествий, согласно этим представлениям,

есть результат неуправляемого выхода энергии и следствие цепей предпосылок, обусловленных отказами техники, ошибками людей и нерасчетными воздействиями на них рабочей среды. Следовательно, для поддержания требуемой безопасности, необходимо сохранять высокое качество и взаимную совместимость всех компонентов человеко-машинной системы.

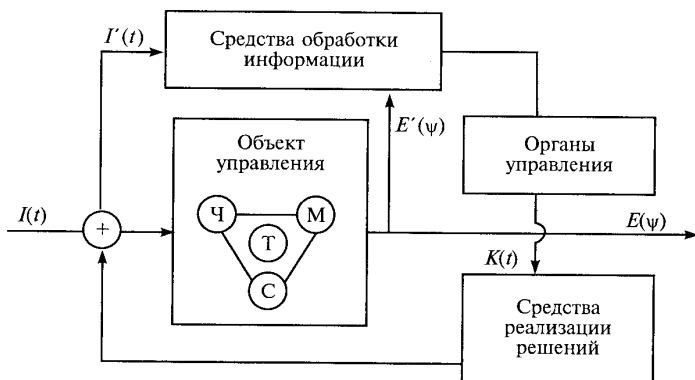


Рис. 12. Модель контрольно-профилактической работы

Исходя из этой концепции основные принципы поддержания безопасности также должны ориентироваться как на предупреждение предпосылок к происшествиям, так и на принятие мер по снижению ущерба от них в случае появления. Естественно, что практическая реализация подобных принципов предполагает более конкретное целеполагание соответствующей подсистемы и декомпозицию решаемых ею задач.

Основные цели и задачи поддержания требуемой безопасности производственных и технологических процессов, а также перечисленные выше условия их реализации показаны на рис. 13, где представлено дерево целей соответствующей подсистемы, включающее все задачи, решение которых необходимо и достаточно для их достижения. Рассмотрим подробнее содержание каждого из четырех показанных в основании дерева условий и уточним те основные особенности, которые должны быть использованы при их практической реализации в ходе подготовки и проведения исследуемого здесь процесса.

Первым условием минимизации техногенного ущерба от происшествий и профессиональных заболеваний является поддержание высокой готовности работающих к безопасному выполнению возложенных на них обязанностей. Основные способы решения этой задачи состоят в качественном профотборе и воспитании персонала в духе безусловного соблюдения установленных правил безопасности, обучении его не только безошибочным и своевременным действиям в нормальных и аварийных ситуациях, но и умелому оказанию помощи пострадавшим и ликвидации других последствий происшествий. Очевидно, что достижение всех этих условий может быть реализовано лишь в результате регулярной переподготовки работающих и наличия у них соответствующих психофизиологических показателей.

Приведенные требования позволяют сформулировать некоторые *принципы* поддержания высокой обученности работающих безопасному выполнению порученных им обязанностей. Главными из них являются дифференцированный подход к теоретической и практической подготовке, непрерывность и целенаправленность соответствующего обучения и воспитания, систематический контроль состояния здоровья, знаний и навыков. Наиболее приемлемыми формами и методами поддержания у персонала соответствующих знаний и навыков служат периодические медицинские обследования и аттестации по технике безопасности, а также теоретическое обучение, практические тренировки и инструктажи.

Второе из условий, необходимых для максимально возможного снижения техногенного ущерба, связано с заблаговременным приведением и постоянным поддержанием техники в установленном положении. Согласно энергоэнтропийной концепции, особое внимание при *этом* нужно уделять энергоемкому оборудованию, а также аккумуляторам тех видов энергии, которые не могут быть обнаружены человеком без применения специальных устройств. Как показывает опыт, наибольшую опасность представляют на практике электросиловое и подвижное технологическое оборудование, средства хранения токсичных и агрессивных веществ, источники электромагнитных и ионизирующих излучений.



Рис. 13. Цели и условия поддержания безопасности

Основные принципы поддержания такого оборудования в «безопасном» состоянии могут быть установлены с учетом предпосылок, приводящих к неконтролируемому выбросу накопленной в нем энергии. Так как ими являются отказы ответственных узлов техники, то сохранение этого состояния достигается поддержанием безотказности ее силовых элементов, приборов безопасности, других технических средств защиты и предупреждения об опасности, а также своевременное освидетельствование или проверка объектов надзора.

Третьим из приведенных выше основных условий минимизации ущерба от аварийности, травматизма и профессиональных заболеваний является поддержание условий, не допускающих возникновения предаварийных ситуаций по причине нерасчетных воздействий на людей и технику со стороны рабочей среды. Актуальность реализации данного принципа обусловлена тем, что интенсивность ошибок персонала зависит не только от внутренних факторов (настроения, мотивации и т. п.), но и от состояния рабочей среды.

Следовательно, рабочие места следует оснащать средствами контроля и поддержания физико-химических параметров воздушной среды, предупредительной сигнализации и пожаротушения, оказания первой помощи пострадавшим. Кроме того, отдельные помещения должны быть оборудованы устройствами нейтрализации и удаления вредных отходов, а также инструкциями, памятками, плакатами и знаками безопасности.

Четвертое и завершающее в выбранной логической схеме (см. рис. 13) условие состоит в соблюдении правил подготовки, выполнения и окончания работ в техносфере, в четком взаимодействии всех участвующих в них сил и средств. Заметим, что реализация рассматриваемого принципа непосредственно не способствует повышению качества отдельных компонентов человеко-машинной системы, однако его внедрение приводит к росту безопасности ее функционирования. Достигается же это благодаря поддержанию максимально возможной взаимной совместимости между людьми и техникой.

Опыт подтверждает эффективность следующих *принципов* безопасной организации работ: а) централизация управления в лице единого руководителя; б) четкое определение обязанностей исполнителей в нормальных и экстремальных ситуациях; в) контроль качества и очередности выполнения ответственных операций; г) немедленное их прекращение при возникновении нештатной ситуации; д) регистрация получаемых команд и докладов об их исполнении; е) начало работ после проверки готовности привлекаемых сил и средств; ж) соблюдение технологии работ и установленных мер безопасности.

В целом же перечисленные выше и иные руководящие положения должны быть учтены нормативно-технической документацией на конкретные технологические процессы и программы обучения персонала. Практическое усвоение и соблюдение этих принципов позволяет также обосновать дополнительные рекомендации по поддержанию безопасности в техносфере и повышению эффективности соответствующей контрольно-профилактической работы.

5.2. Модели и методы поддержания готовности персонала к обеспечению безопасности

Поддержание профессиональной подготовленности специалистов представляет собой актуальную задачу, в том числе и для предупреждения аварийности и травматизма в техносфере. Связанные с этим проблемы обусловлены, как ни странно, естественными защитными механизмами человека, приводящими к постепенной утрате не используемых каждодневно знаний и навыков. Это свойство работающих особенно ярко проявляется при отсутствии происшествий, формируя у них так называемый синдром безопасности.

В этой связи возникает потребность в разработке рекомендаций, направленных на а) обоснование периодичности переподготовки и инструктажей персонала по технике безопасности, б) совершенствование содержания и методики их проведения. При решении этих задач может быть использована принятая ранее концепция аварийности и травматизма, а также некоторые представления, касающиеся закономерностей не только приобретения, но и утраты людьми знаний и навыков по обеспечению безопасности после завершения соответствующего обучения.

При рассмотрении *первой* задачи – определении периодичности переподготовки или инструктирования специалистов по технике безопасности, будем использовать как известные модели обучаемости, так и предположение об экспоненциальном характере снижения вероятности безошибочных и своевременных действий при выполнении ими заданных функций. Такое допущение подтверждается достоверными данными об изменении во времени психофизиологических характеристик человека, например, снижении его мускульной силы после полной иммобилизации или уменьшении объема информации с момента ее получения.

Руководствуясь этими соображениями, в качестве модели «забывания» в последующем будет использована следующая зависимость:

$$P(t) = P_H / [1 - (1 - P_H)e^{-K_H t}], \quad (6)$$

где $P(t), P_H$ – текущее и начальное значения вероятности своевременных и безошибочных действий по ликвидации специалистом аварийных ситуаций; χ, ϕ – параметры «забываемости», зависящие от уровня требуемых (минимально допустимых) для этого знаний и сложности выполняемых алгоритмов; t – время с момента окончания практического или теоретического обучения или инструктажа по «технике безопасности».

С достаточной для практики точностью, можно принимать величину χ равной 0,005; тогда как корректирующий ее значение параметр ϕ рекомендуется рассчитывать по такой формуле:

$$\phi = P^*(1 - \sqrt[r]{P^*}) / [\sqrt[r]{P^*}(1 - P^*)], \quad (7)$$

где $r = m/l$ – индекс сложности рассматриваемых алгоритмов, характеризуемый средним числом m образующих их операций P^* – требуемая вероятность безошибочных и своевременных действий специалиста, определяемая минимумом суммарных издержек на его подготовку.

Напомним, что при нахождении вероятности P^* должны учитываться как затраты на обучение персонала безопасности, так и ущерб от возможного невыполнения ими действий, предусмотренных на случай возникновения аварийных ситуаций. Для широкого класса задач операторской деятельности и сравнительно небольшом ущербе от аварийных ситуаций, величина P^* может быть принята равной 0,8–0,9.

После уточнения моделей приобретения и утраты людьми знаний и навыков по технике безопасности необходимо также условиться и о коридоре допустимых значений соответствующих показателей $[PL, Pu]$. В этих условиях, обоснование исковой периодичности переподготовки персонала может быть сведено к определению таких интервалов времени между проведением отдельных занятий $\tau_{MO} = t_2 - t_1$ и продолжительности их осуществления $\tau_{ПО} = t_3 - t_2$, при которых соблюдается следующее соотношение:

$$P_U \geq P(\tau_{MO}, \tau_{ПО}) > P_L \quad (8)$$

где P_U, P_L – нижняя и верхняя границы требуемой вероятности безошибочных и своевременных действий специалиста по ликвидации аварийных ситуаций.

Динамика приобретения и потери людьми знаний (навыков) безопасного выполнения работ, соответствующая данным моделям, показана на рис. 14.

Аналитическое же решение рассматриваемой задачи дает такие выражения для периодичности и продолжительности проведения очередных циклов переподготовки или инструктажей персонала по «технике безопасности».

а) продолжительность времени между очередными циклами обучения

$$\tau_{MO} = \frac{m_T}{-k\varphi} \ln \frac{P_U(P_L - P_H)}{P_L(P_U - P_H)} \quad (9)$$

б) длительность каждого цикла такой переподготовки или инструктажа

$$\tau_{PO} = m_T n_0 - \frac{m_T}{\tau^*} \left[1 + \frac{\ln \left[1 - \frac{(1-A)(P_L - P_H)}{B(P_U - P_H)} \right]}{\ln A} \right], \quad (10)$$

где τ^* – время непосредственного обучения специалиста действиям в не стандартных условиях, определяемое с учетом других занятий или отдыха в течение суток; A, B, m_T, n_0 – параметры данного учебного процесса.

Апробация только что рассмотренного подхода осуществлена путем решения задачи по обоснованию рациональной цикличности переподготовки персонала по технике безопасности. При этом предполагалось, что $\tau^* = 0,33$, $P_L = 0,75$, $P^* = 0,8$ и $P_U = 0,85$. После подстановки этих исходных данных в формулу найдено значение показателя «забываемости» $\varphi = 0,8(1 - \sqrt{0,8}) / \sqrt{0,8(1 - 0,8)} = 0,498$.

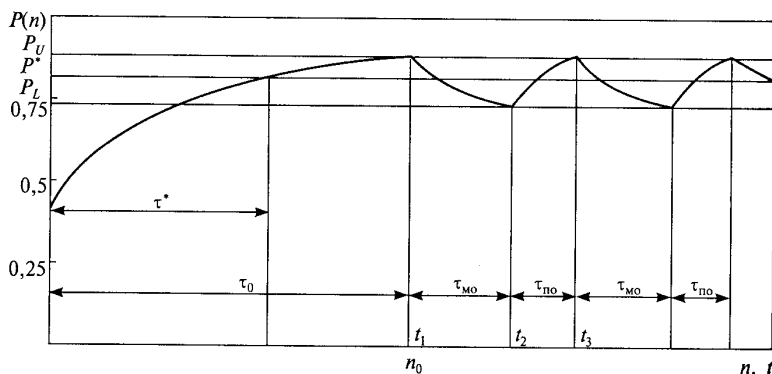


Рис. 14. Динамика приобретения и потери знаний (навыков)

После выбора рациональной цикличности обучения, *второй*, рассматриваемой здесь задачей поддержания готовности персонала к обеспечению безопасности, является определение содержания и методики его обучения или инструктажа. Сущность такой методики может быть сведена к таким трем моментам: а) обоснование необходимых мер безопасности при проведении конкретных работ, б) своевременное доведение этих мер до исполнителей и в) обеспечение их строгого выполнения. Проанализируем особенности реализации каждого из этих трех основных положений.

Если попытаться узнать мнение об относительной сложности указанных компонентов методики, то чаще всего приоритет отдается последнему, а затем упоминаются в различной очередности и два других. Для опровержения такой градации попробуем показать недооценку сложности самого первого положения и уточним те соображения, которыми следует руководствоваться при его практическом выполнении.

При ответе на вопрос о том, чем следует пользоваться при обосновании необходимых мер безопасности, обычно встречаются единодушные - соответствующими инструкциями и другими руководящими документами, а также собственным опытом. Реже рекомендуется учитывать условия проводимых работ, хотя не всегда уточняется, какие именно. Однако практически никогда не упоминается необходимость пользования знаниями о

природе и закономерностях проявления опасности. В подобных ситуациях трудно убедить собеседника в несостоятельности таких ответов.

В самом деле, действующие руководящие документы не могут в принципе содержать все действительно необходимые меры безопасности для всех реально возможных в техносфере ситуаций: реальность всегда богаче любого воображения. Более того, ни руководитель, ни исполнитель работ не в состоянии иметь эти документы постоянно при себе или помнить все их требования. С другой стороны, представляется недопустимым руководствоваться при обосновании необходимых мер безопасности и персональным опытом, поскольку на собственных сиюминутных и ошибках учатся, как известно, лишь неразумные.

Приведенные соображения свидетельствуют о недостаточности традиционных подходов к реализации первого положения методики, лишь с помощью соответствующих документов. Равно как и то, что ответ на вопрос о необходимых мерах безопасности следует искать методом индивидуальных проб и ошибок. В дополнение к этому надо аккумулировать весь накопленный опыт, т.е. учиться с тем, чтобы знать объективные представления о причинах и закономерностях появления техногенных происшествий.

Как представляется при обосновании методики обучения и инструктажа по мерам безопасности следует использовать принятую здесь энергоэнтروпийную концепцию и вытекающие из нее принципы обеспечения безопасности. В частности, исходить из практической невозможности гарантированного исключения всех ошибок людей, отказов техники и неблагоприятных воздействий на них извне. Следовательно, устанавливаемый порядок работ должен учитывать реальную возможность возникновения этих отдельных предпосылок и предусматривать меры по их своевременному выявлению и исключению опасных последствий.

Это означает, что при обосновании *первого* положения методики, т.е. определении объема содержания соответствующих мероприятий, в каждом конкретном случае необходимо четко разобраться со следующими дополнительными вопросами:

1. В чем заключается опасность предстоящих работ?
2. Появление каких событий недопустимо при их проведении?
3. Почему каждое из них может произойти?

Приведем ответы на каждый из них, вытекающие из принятой концепции.

На *первый* вопрос логично ответить следующим образом: опасность работ кроется в той энергии, которая накоплена в используемой технике эксплуатирующем ее персонале, окружающей их среде. Величина опасности характеризуется размерами ущерба от возможных происшествий, и, как правило, пропорциональна запасенной энергии. Количество же последней определяется разностью термодинамических потенциалов – химического, электрического, гравитационного, а также емкостью аккумуляторов энергии или объемом агрессивных и токсичных веществ.

Идея ответа на *второй* вопрос - не допустить любого нежелательного высвобождения этой энергии, в особенности если оно приведет к разрушительным последствиям. Стремление энергии к выравниванию соответствующих потенциалов и совершению работы закономерно. Примерами же нежелательного ее высвобождения из техники, людей и окружающей их среды являются соответственно: взрывы сосудов со сжатыми или горючими газами, падение с высоты или движущихся транспортных средств, воздействие предметов, не входящих в рассматриваемую человеко-машинную систему.

Несколько труднее найти ответ на *третий* вопрос, хотя и здесь просматривается следующая логика его поиска. Поскольку любое происшествие причинно обусловлено, то следует прогнозировать наиболее вероятные предпосылки, приводящие к нежелательному высвобождению накопленной энергии. Речь идет об а) ошибках персонала - пропуске или неверном выполнении алгоритма, возложенного на него в обычных и экстремальных условиях; б) отказах техники - потере работоспособности или целостности элементов, ответственных за поддержание разности энергетических потенциалов; в) нерасчетных внешних воздействиях - снижении сопротивления тел за счет оледенения, смачивания их поверхности или попадания токопроводящей пыли и т.п.

Несмотря на многообразие, все перечисленные и другие события - предпосылки - причинно обусловлены, а потому могут быть заблаговременно спрогнозированы. В предлагаемой логике рассуждений, как мог убедиться читатель, мало места

для его величества Случая; все здесь связано с конкретными людьми, техникой, условиями работы. Компетентность же инструктора как раз и состоит в том, чтобы в каждом случае выявить из всех предпосылок наиболее вероятные, по возможности исключить, или хотя бы подготовиться к их появлению.

Следующим за первым положением методики обучения и инструктажа персонала по технике безопасности (определением действительно, необходимых ее мер), возникает потребность в выполнении второго и не менее трудного – в своевременном их *доведении* до работающих, реализация его на практике довольно часто не достигает желаемой цели – убеждению людей в реальной необходимости этих мер. Чаще всего причиной этого служит недопонимание психологии человека, в особенности, если он молод и здоров.

В системе приоритетов подобных людей опасность и связанные с нею занятия или инструктажи стоят далеко не на первом месте, являясь чем-то иллюзорным и, как им кажется, совсем их не касающимся. Они, быть может, и делают вид, что внимательно слушают инструктора, но чаще всего их мысли – о другом. И, если занятие или инструктаж по технике безопасности делается для: «галочки» – в смысле «прокукарекал, а там хоть не рассветай», то считайте их пустой тратой времени и ждите беду.

Для того чтобы действительно необходимые меры безопасности были восприняты таковыми и дошли до сознания персонала, в словах и действиях инструктора должен быть минимум абстракции. Она часто интерпретируется человеком как специфический шум и его внимание переключается на более значимые (в понимании каждого) мысли или воспоминания. Если и такой информации недостаточно, то включаются защитные механизмы и человек может совсем расслабиться или даже уснуть.

Следовательно, для повышения результативности обучения «технике безопасности» иллюстрируйте его примерами, обращайтесь к конкретным фактам, фамилиям и должностным лицам, подводите обучаемых к необходимости делать так, а не иначе, убеждайте их в недопустимости конкретных несанкционированных действий. В этом случае можете быть уверены, что врожденное чувство опасности, которое, по словам З. Фрейда, у

человека развито совершенно недостаточно, будет пробуждено, и он станет для инструктора не обузой, а помощником в деле предупреждения аварийности и травматизма.

И именно поэтому меньше станет проблем с практической реализацией последнего (третьего) положения инструктажа – безусловным выполнением работающими установленных мер и правил безопасности.

Проиллюстрируем изложенную методику на конкретном примере – выработке руководителем работ решения, предотвращающего возникновение происшествий при транспортировке нефтепродуктов. Исходные данные: а) «человек» – водители авотранспорта, имеющие соответствующую подготовку и опыт работы; б) «машина» – колонна заправщиков в удовлетворительном техническом состоянии; в) «рабочая среды» – улучшенная грунтовая дорога по пересеченной местности (сопки), сухо, но пасмурно; г) задача – доставить топливо потребителю, удаленному на 350 км, срок доставки – 11 ч. следующего дня, начало движения – по готовности.

Излагаем последовательность и логику рассуждений руководителя работ:

1) опасность представляют: а) кинетическая; б) потенциальная энергия топливозаправщиков и расположенных в них людей; в) химическая энергия топлива, электролитов и других горючих веществ; г) электрическая энергия аккумуляторов и генераторов; д) энергия сжатых газов автошин, тормозных и пусковых баллонов; е) энергия других транспортных средств и соседних с дорогой объектов (линий электропередач, газопроводов и т. п.);

2) недопустимы нежелательные высвобождения энергии: а) кинетической – в результате столкновения с подвижными и неподвижными объектами; б) потенциальной – путем опрокидывания автозаправщиков и падения людей с них; в) химической – из-за проливов на людей и грунт электролитов и топлива или воспламенения последнего; г) электрической – вследствие коротких замыкания электрооборудования; д) сжатых газов – по причинам взрыва или резкого падения давления в баллонах и автошинах;

3) предпосылки столкновения и опрокидывания автозаправщиков: а) ошибки людей – превышение скорости, сокращение дистанции, выезд на встречную полосу; б) отказы техники –

выход из строя тормозных устройств, рулевого управления, колес передней оси, светосигналов; в) нерасчетные внешние воздействия внезапное появление людей и других предметов на проезжей части дороги, резкое торможение впереди идущего или наезд встречного транспорта, начало грозы, разрушение дорожного покрытия или соседних строений.

Подобным образом находят причины и других наиболее вероятных происшествий: а) выпадение людей из автозаправщиков их невнимательность при движении и на остановках, неисправности дверных замков и трапов, порывы ветра и дождь; б) пролив и воспламенение топлива – пользование открытым огнем, короткое замыкания электрооборудования, перегрев элементов автошасси, повреждение линии электропередач и начало грозы; в) короткое замыкание – некачественный осмотр электрооборудования перед маршем, обрыв проводов или снижение сопротивления их изоляции; г) взрыв и снижение давления в баллоне, закрытие кранов системы централизованной подкачки автошин, неисправность предохранительных и запорно-регулирующих клапанов, нарушение герметичности тормозной системы и автошин вследствие их прокола;

4) исходя из изложенного устанавливаемые здесь меры безопасности должны касаться следующего: а) отказ упомянутых выше элементов – систематический контроль их состояния и работоспособности; б) ошибка водителя – разъяснение особенностей и порядка перемещения по маршруту (дистанция, скорость, правила остановки и переключения передач при движении по уклонам); в) нерасчетные воздействия извне – изучение и оповещение об изменении дорожных условий. Кроме того, необходимо уточнить порядок действий водителей при появлении перечисленных выше ошибок, отказов и опасных внешних воздействий.

Очевидно, что реализация предложенных здесь мер безопасности будет способствовать сокращению числа дорожно-транспортных происшествий, за исключением их появления по причине внезапного стихийного бедствия, например, урагана или землетрясения. Учет всех, в том числе и только что упомянутых маловероятных факторов, как отмечалось выше, лежит за пределами возможностей человека вообще и руководителя работ, в частности. Однако и юридический или иной спрос с по-

следнего, равно как и чувство его моральной ответственности за случившееся по таким причинам, вряд ли могут быть скольконибудь значимыми.

В заключение данного параграфа – несколько слов о выводах и задачах, вытекающих из изложенного в нем материала. Несомненно, что проблема аварийности и травматизма в техносфере слишком сложна, для того чтобы решаться лишь поддержанием обученности персонала. для исключения техногенных происшествий необходимо руководствоваться и другими принципами, рассмотренными в начале данной главы. Вот почему, не ограничившись перечисленными мерами, продолжим обоснование методов поддержания требуемого уровня безопасности, на сей раз – за счет совершенствования соответствующей контрольно-профилактической работы.

5.3. Моделирование контрольно-профилактической работы по предупреждению происшествий

В соответствии с программно- целевым подходом к управлению безопасностью, поддержание ее требуемого уровня в техносфере достигается оперативным управлением выполнением соответствующих программ. В решении этой задачи также участвуют и контролирующие органы соответствующей системы, путем контрольно-профилактической работы на подчиненных им объектах. Главным же ее содержанием является инспектирование поднадзорных объектов с целью расследования имевших место происшествий, а также выработки управляющих воздействий по исключению их повторяемости в других местах.

Применительно к управляющему органу системы обеспечения безопасности рассмотрим возможность совершенствования следующих *задач* планирования контрольно-профилактической работы и оптимизации вырабатываемых при этом управляющих воздействий:

1. Обоснование объема выборки периодически проверяемых объектов техносферы.
2. Разработка планов-графиков их обследования конкретными подразделениями упомянутого выше органа надзора.
3. Оценка эффективности альтернативных воздействий по

предупреждению повторяемости техногенных происшествий.

4. Выбор из этих мер наиболее эффективных, по принятому критерию.

Первая из рассматриваемых задач – обоснование состава периодически инспектируемых объектов обусловлена фактической невозможностью управляющего органа одновременно и качественно проверять их каждый год. Данное требование реализуемо только на продолжительных интервалах времени, однако при этом не обеспечивается оперативность и целенаправленность управления безопасностью. Выходом из ситуации может быть лишь проведение выборочного контроля некоторых из подведомственных объектов.

При обосновании такой выборки, целесообразно использовать в качестве критерия $Z(i)$ оптимизации количество информации о происшествиях и предпосылках к ним, получаемой специалистами надзорного органа в процессе периодического инспектирования объектов. Полагая, что объем этой информации пропорционален числу изученных там таких событий, для повышения эффективности инспектирования, в первую очередь, следует планировать объекты с максимальным числом происшествий и предпосылок, тогда как посещение других, сравнительно благополучных, можно перенести на более поздние сроки.

Ограничением $g(i)$ к выбору состава обследуемых объектов должно служить социальное время, выделенное управляющему органу для работы на них, например, в течение года. В предположении о пропорциональности указанных издержек числу зарегистрированных на этих объектах происшествий и предпосылок к ним $X_i(T)$, может быть сделана такая словесная постановка рассматриваемой задачи: «Определить такой состав выборки обследуемых производственных предприятий, при котором обеспечивается получение максимально возможной информации об обстоятельствах аварийности и травматизма, а требуемые для ее сбора и изучения трудозатраты – не превышают выделенных на эти цели».

Математическая постановка этой задачи состоит в определении таких m объектов из N , при которых соблюдаются следующие, более строгие условия:

$$\left. \begin{aligned} Z(t) &= \sum_{i=1}^m \alpha_i x_i(\tau_i) \rightarrow \max; \\ g(t) &= \sum_{i=1}^m \alpha_i \tau_i \leq T_B; \\ \tau_i &= r x_i(\tau_i) + s d_i; \\ l, m &\in N, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где m , N – число выбранных и общее количество поднадзорных объектов соответственно; α_i – булева переменная (параметр, равный единице для объектов из подмножества m , и равный нулю для других объектов); T_B – трудозатраты, выделенные управляющему органу для инспектирования подчиненных объектов на рассматриваемом периоде времени; r , s – постоянные, пропорциональные времени, которое необходимо для изучения обстоятельств возникновения одного происшествия или предпосылки к нему на i -м объекте и для прибытия на него, соответственно.

Сравнение постановки рассматриваемой задачи с известными в математическом программировании, указывает на то, что она является так называемой задачей о рюкзаке, принадлежащей к классу задач линейного (комбинаторного) программирования. Достаточно хорошим способом ее решения могут служить машинные алгоритмы, основанные на методе ветвей и границ. Такой выбор обусловлен их эффективностью для задач с большой размерностью оптимизируемых параметров и их доступностью в библиотеках программ.

В результате решения задачи на ЭВМ определяются количество и состав объектов, включаемых в план контрольно-профилактической работы, суммарное (максимально возможное) число исследуемых происшествий и предпосылок к ним I' , израсходованные на эти цели трудозатраты T .

Отметим, что разработанная программа позволяет проводить решение задачи при нескольких пакетах исходных данных, отличающихся значением выделенных ресурсов. Данное ее свойство облегчает нахождение зависимости $X = X(T)$, знание которой необходимо для определения трудозатрат, требуемых надзорному органу для исследования на объектах заданного процента событий исследуемого явления. Указанная зависимость может быть использована для обоснования рациональной организационно-штатной структуры управляющих органов сис-

темы обеспечения безопасности или соответствующих подразделений производственных предприятий (объединений).

Вторая задача оптимизации контрольно-профилактической работы вызвана разными расстояниями между надзорным органом и теми, подлежащими обследованию производственными предприятиями, которые выбраны для периодической проверки. Отсюда вытекает возможность обоснования оптимальных в некотором смысле планов-графиков инспектирования этих объектов и определения рациональной очередности решения на них конкретных вопросов предупреждения техногенных происшествий. В зависимости от принятого критерия и привлекаемых для обследования сил, принципиально возможны две постановки этой задачи планирования контрольно-профилактической работы.

При формулировании и решении каждой из них должны быть учтены следующие дополнительные ограничения $g(i,j)$ и допущения:

- а) обследованию подлежат все запланированные выше m объектов;
- б) трудозатраты надзорного органа пропорциональны удаленности предприятий;
- в) все выбранные объекты равнодоступны для начала инспектирования;
- г) на каждом из них одновременно могут работать не более одной группы специалистов любого из подразделений управляющего (надзорного) органа.

Поясним, что последнее условие связано с возможностью одновременного обследования объектов несколькими группами специалистов, принадлежащих различным инспекциям.

Исходя из различий в расстоянии между управляющим органом и подчиненными объектами в качестве критерия оптимизации $Z(i, j)$ уместно выбрать транспортные расходы, необходимые для доставки к каждому из них инспекторского состава. В этом случае первый вариант словесной постановки рассматриваемой задачи будет следующим: «При найденном, оптимальном по информативности составе выборки обследуемых объектов и известных транспортных издержках на их посещение, определить такой график их инспектирования несколькими группами».

пами специалистов управляющего органа, при котором обеспечивается минимум суммарных транспортных расходов».

Анализ формулировки данной задачи указывает на ее сходство с классической «задачей о коммивояжере». Однако необходимость учета одновременной работы нескольких групп специалистов требует некоторой модификации ее постановки, что может быть осуществлено расширением матрицы затрат на число строк и столбцов, равное количеству привлекаемых групп, а также введением дополнительных ограничений на новые элементы. С учетом сказанного, математическая запись данной постановки задачи сводится к выбору последовательности $\pi_{ij}(m)$, при которой выдерживаются такие условия:

$$\left. \begin{aligned} Z(i, j) \sum_{i=1}^{m+v} \sum_{j=1}^{m+v} \beta_{ij} d_{ij} &\rightarrow \min; \\ g_1(i, j) = \sum_{i=1}^{m+v} \beta_{ij} &= 1, j = 1, 2, \dots, m + v; \\ g_2(i, j) = \sum_{j=1}^{m+v} \beta_{ij} &= 1, i = 1, 2, \dots, m + v; \\ g_3(i, j) = d_{ij} &= \infty, j = m + 1, m + 2, \dots, m + v; \\ g_4(i, j) = d_{ij} &= \infty, i = m + 1, m + 2, \dots, m + v, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где v – количество групп специалистов управляющего органа, выделенных для обследования запланированных m объектов; β_{ij} – параметр, равный единице при выборе маршрута следования от объекта i к объекту j , и равный нулю – в других случаях; d_{ij} – расходы на перевозку специалистов на расстояние между i и j объектами.

Заметим, что ограничения g_3 и g_4 исключают выбор маршрутов к несуществующим объектам (группам специалистов управляющего органа).

Среди известных методов решения задачи линейного программирования (12) – нахождения кратчайшего пути при соответствующих ему затратах – могут быть использованы алгоритмы также основанные на методе ветвей и границ. Дело в том, что он эффективен для компьютерного решения задач с достаточной для практики размерностью матрицы, исходных данных $(m + v) < 30$. Фрагмент отчета с данными по задаче (12) приведен в табл. 1.

В тех случаях, когда в качестве критерия оптимизации Z должна выступать минимальная общая продолжительность времени обследования всей выборки объектов, например, с целью принятия на них неотложных мер, возможен второй вариант словесной постановки рассматриваемой здесь задачи по оптимизации план-графика инспектирования запланированных объектов. Например: «При известном составе выборки из m объектов, подлежащих обследованию несколькими группами специалистов, и заданных длительностях работы на каждом из них любой группой, разработать такой график поочередного инспектирования ими всех этих объектов, при котором обеспечивается минимальная суммарная продолжительность времени, включая и вынужденные простои каждой группы».

Для решения задачи в такой постановке необходимы дополнительные допущения, введение которых позволило бы свести ее к классической задаче составления расписания для m работ на двух или трех станках. Помимо вышеперечисленных, такими допущениями будут предположения об одинаковой взаимной последовательности посещения объектов специалистами разных отделов и возможности простоя одних специалистов, в ожидании завершения обследования другими. С учетом приведенных допущений, математическая постановка рассматриваемой задачи в ее второй интерпретации состоит в поиске такой перестановки π_m объектов, обследуемых двумя группами специалистов, при которой обеспечивается минимум следующего рекуррентного выражения:

$$Z = \tau_2(\pi_m) + \{T_1(\pi_m) + T_2(\pi_m - I)\} \rightarrow \min, \quad (13)$$

где $\tau_2(\pi_m)$ – длительность инспектирования вторым отделом последнего объекта в выбранной их последовательности; $T_1(\pi_m)$ $T_2(\pi_m - I)$ – соответственно общие (с учетом возможных простоев) длительности времени обследования всех m объектов специалистами первого отдела и $(m - 1)$ – второго.

Таблица 1

Фрагмент отчета с данными по задаче

Задача											
Выбор оптимального графика обследования объектов											
Исходные данные											
Количество обследуемых объектов — 10											
Число привлекаемых специалистов — 2											
Модифицированная матрица затрат:											
99999	99999	124	80	127	14	32	96	112	234	25	300
99999	99999	124	80	127	14	32	96	112	234	25	300
124	124	99999	13	124	76	120	99	201	145	78	92
80	80	13	99999	49	20	79	52	34	89	66	112
217	217	124	49	99999	46	58	10	118	203	145	200
14	14	76	20	46	99999	132	78	59	67	72	96
32	32	120	79	58	132	99999	118	32	19	203	102
96	96	99	52	10	78	118	99999	205	170	34	12
112	112	201	34	118	59	32	205	99999	29	156	112
234	234	145	89	203	67	19	170	29	99999	34	87
25	25	78	66	143	72	203	34	1556	34	99999	69
300	300	92	112	200	96	102	12	112	87	69	99999

Результаты расчета											
При заданных исходных данных, наименьшая величина затрат = 351.											
Оптимальный график обследования											
1	11	2	6	5	8	12					
3	4	9	10	7	1						

Не отрицая общности рассуждений, обоснуем правомерность, этой постановки задачи на примере срочного инспектирования АЭС отделами Госатом- и Гостехнадзора, допустим, после какого-либо серьезного инцидента. Поскольку первый из них обследует лишь ядерные энергоустановки, то целесообразно, чтобы работу объекта начинали специалисты этого отдела, а завершали инспектирование – второго. Заметим также, что готовность АЭС к обследованию не

требует приведения их в особое положение, поэтому они одинаково доступны для инспектирования по каждому вопросу в любой момент времени и при этом возможны перерывы между окончанием работы одних специалистов и началом других.

Задачу оптимизации плана-графика обследования запланированных объектов удобно решать по известным алгоритмам теории расписаний. Фрагмент отчета с результатами компьютерного расчета иллюстративного примера по соответствующей программе приведен в табл. 2.

Как это видно из в табл. 1 и 2, при составлении оптимальных планов-графиков контрольно-профилактической работы на объектах используются данные об их числе и условных номерах, а также сведения о транспортных затратах на доставку специалистов к ним или продолжительности работы на каждом объекте разными их группами. Последние исходные данные могут быть подготовлены заблаговременно с учетом принятых выше допущений о пропорциональности затрат и времени – соответственно удаленности объектов и зарегистрированному на них количеству происшествий и предпосылок к ним.

В результате решения рассмотренных задач на ЭВМ получают оптимальные по выбранным критериям последовательности инспектирования производственных объектов, а также расходы на доставку специалистов управляющего органа или общую продолжительность работы на объектах и предполагаемые при этом потери времени каждого отдела вследствие вынужденных простоев.

Поясним также рекомендуемые табл. 1 и 2 очередности работ. Поскольку в матрице исходных данных задачи (12) первая и вторая группы специалистов закодированы объектами 1 и 2, то этот график инспектирования объектов следует понимать так: первая группа специалистов обследует только один объект NQ 11, а вторая - все остальные в указанной там последовательности. А вот при решении задачи подразумевалось, что первыми на объектах начинали работу специалисты первого отдела управляющего органа. При привлечении же для контрольно-профилактической работы и третьей группы, например, специалистов Госсанэпидем- или Энергонадзора, для решения последней задачи должен использоваться машинный алгоритм составления расписания для m работ на трех станках.

Таблица 2

Фрагмент отчета с данными о задаче

Задача					
Выбор оптимального графика обследования объектов					
Исходные данные					
Объект №	Длительность проверки		Объект №	Длительность проверки	
	отделом 1	отделом 2		отделом 1	отделом 2
1	192	168	15	240	192
2	216	200	16	120	48
3	112	240	17	144	72
4	48	72	18	156	144
5	96	144	19	72	72
6	120	124	20	120	144
7	96	110	21	72	48
8	216	114	22	192	240
9	122	144	23	72	96
10	72	144	24	72	48
11	96	120	25	60	72
12	168	144	26	72	96
13	120	72	27	96	120
14	72	48	28	120	72

Результаты расчета											
При выборке запланированных к обследованию объектов в составе 28 штук, оптимальный график обследования следующий:											
4	25	10	19	23	26	5	7	11	27	3	6
20	9	22	2	15	1	18	12	8	28	17	13
24	21	16	14								
Общая длительность обследования объектов составит 3401.00 ч.											
Время ожидания отделом № 1 = 48; время ожидания отделом № 2 = 94 ч											

Третья задача совершенствования контрольно-профилактической работы по поддержанию требуемого уровня безопасности касается количественной оценки тех организационно-технических мероприятий, которые могут быть разработаны в результате инспектирования поднадзорных объектов тех-

носферы. При ее решении будет предполагаться, что в процессе изучения информации об обстоятельствах имевших там место происшествий и предпосылок к ним, выявлены перечни наиболее опасных технологических операций и предложены мероприятия по повышению их безопасности. В этих условиях можно оценивать их эффективности либо априорно: с помощью рассмотренных во второй части методов, либо апостериорно: статистически.

Естественно, что в данной ситуации более предпочтительна априорная оценка эффективности альтернативных мероприятий, обладающая большей оперативностью, тогда как статистическая оценка может быть использована впоследствии – для подтверждения или опровержения предварительных выводов. При применении для этих нужд полученных ранее результатов моделирования аварийности и травматизма в техносфере целесообразно воспользоваться такими рекомендациями.

1. Для прогноза результативности мероприятий по повышению безошибочности и своевременности действий персонала или безотказности используемого им оборудования и средств защиты, нужно пользоваться математическими моделями и основанными на них машинными программами. Оценка эффективности возможных альтернатив реализуется путем оценки изменения вероятностей $Q(t)$ или $P_6(\tau)$ за счет корректировки значений их параметров соответствующими мероприятиями. Отчет с исходными данными и результатами такого прогноза представляется руководству предприятия.

2. Когда возникает потребность в определении эффективности не комплексных, а отдельно взятых мероприятий по поддержанию требуемого уровня безопасности, следует применять другие аналитические модели и основанные на них машинные алгоритмы. Их использование позволяет оценить сравнительную эффективность мероприятий, в том числе и с учетом затрат, требуемых для внедрения.

3. Наконец, когда оперируют большим числом нечетко определенных исходных данных, априорную оценку эффективности предлагаемых мероприятий лучше осуществлять либо счетом по формулам вручную или с помощью машинного алгоритма либо путем имитационного моделирования. В последнем случае оценка эффективности альтернатив проводится по

величине снижения вероятности возникновения происшествий $\Delta Q(t)$, ожидаемого от мероприятий по улучшению свойств человеко-машинной системы.

Необходимые для расчета значения соответствующих частных производных - $\partial Q/\partial K_f$, указывающие на существенность влияния f -х факторов возникновения аварийности и травматизма, могут быть определены в результате проведения серии машинных экспериментов. При найденных подобным образом частных производных $P_{79}/\partial K_f$, равных тангенсам угла наклона графиков и предполагаемом улучшении качества f -го свойства ΔK_f , эффективность управляющего воздействия определяется величиной

$$\Delta Q(t) = (P_{79}/\partial K_f) \Delta K_f. \quad (14)$$

Таким образом, последовательность решения рассматриваемой здесь третьей задачи совершенствования контрольно-профилактической работы по предупреждению техногенных происшествий включает такие основные этапы:

а) выявление в процессе обследования объектов наиболее опасных производственных и технологических операций, а также присущих им факторов аварийности и травматизма;

б) подготовка альтернативных мероприятий по их ликвидации и предварительная оценка вызванных ими изменений: ΔP_{ij} – вероятностей предпосылок или ΔK_f – качества соответствующих свойств человеко-машинной системы;

в) корректировка модели или алгоритма имитационного моделирования с учетом особенностей каждой конкретной операции и процесса;

г) проведение расчетов (серии машинных экспериментов) при различных значениях вероятностей $P_{ij}(t)$ или оценок качества и построение соответствующих графиков;

д) определение по тангенсам угла наклона графиков или другим способом значений частных производных $\partial P_{79}/\partial K_f$

е) расчет по формулам либо величины снижения вероятности возникновения происшествий, ожидаемого от внедрения каждого из предлагаемых мероприятий.

Четвертая и заключительная здесь задача обусловлена потребностью в наиболее эффективном использовании тех ресур-

сов, которые выделены для ведения контрольно-профилактической работы и оперативного управления процессом поддержания требуемой безопасности в целом. Принципиальная возможность и необходимость оптимального распределения таких средств объясняется многообразием реально существующих факторов аварийности и травматизма и связанных с ними мероприятий, а также их различной эффективностью и стоимостью реализации.

Так, если в процессе контрольно-профилактической работы предложено всего два возможных мероприятия, а также оценены предполагаемые затраты и ожидаемая эффективность каждого из них, то при рассмотрении возможности их внедрения нужно рассматривать уже четыре альтернативы: внедрение только первого мероприятия; только второго; сразу обоих и отказ от внедрения каких-либо мероприятий. Естественно, что на практике число возможных мероприятий измеряется десятками, а их альтернативных сочетаний, обладающих различной стоимостью и эффективностью, – тысячами.

В связи с выше изложенным, возможна следующая словесная постановка рассматриваемой задачи оптимизации управляющих воздействий: «Выбрать из множества альтернативных мероприятий такой их комплекс, при котором обеспечивается максимально возможное снижение ожидаемого среднего ущерба, а требуемые для его внедрения затраты не превышают выделенных». Более строгая ее математическая постановка состоит в определении вектора Uik , при котором выдерживаются следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} Z(k) &= \Delta Y(W_k) \rightarrow \max; \\ g(k) &= S(W_k) \leq S_{\text{бюд}}(W); \\ W_k &\in W, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где $W = \{1, 2, \dots, k, \dots, m\}$ – множество альтернативных мероприятий, предложенных в ходе обследования объектов и оце-

ненных m по стоимости и эффективности; $\Delta Y(W_k) = \sum_{k=1}^m \Delta Q_k Y$ – ожидаемое от реализации выбранного их комплекса снижение среднего ущерба от возможных происшествий; $S(W_k)$, $S_{\text{выд}}(W_k)$ – необходимые для внедрения этого комплекса затраты и ресурсы, выделенные для этих целей управляющему органу соответственно.

В качестве способа решения оптимизационной задачи рекомендован метод динамического программирования и соответствующий ему машинный алгоритм. Такой выбор предопределен приспособленностью этого метода и алгоритма к задачам с различной структурой целевой функции $Z(k)$ и ограничений, удобством получения результатов одновременно для нескольких значений правой части ограничения $g(k)$ и имеющимся опытом. Фрагмент листинга с результатами решения конкретного примера с помощью данного машинного алгоритма приведен в табл. 3.

Как это видно из приведенных материалов, для решения задачи необходимы такие исходные данные: а) номера операций технологического процесса и внедряемых в них альтернативных мероприятий; б) затраты на их реализацию и ожидаемое от этого снижение среднего ущерба от происшествий; в) ресурсы, выделенные для поддержания требуемого уровня безопасности, и г) параметры, задающие дискретность вычислений на ЭВМ и выдачи полученного при этом решения. Результатом же расчета служат номера рекомендуемых для внедрения альтернатив, требуемые для их реализации затраты и ожидаемая от этого эффективность.

В заключение данного параграфа заметим, что постановка и решение двух последних задач должны проводиться также в процессе создания и статистического контроля безопасности объектов, например, когда оценка соответствующих показателей не удовлетворяет требуемым значениям. Еще одним приложением данных задач может стать обоснование затрат, выделяемых управляющему органу для поддержания заданного уровня безопасности.

Таблица 3

Фрагмент отчета с данными по задаче

Задача				
Определение оптимального комплекса мер по повышению безопасности выполнения технологического процесса				
Исходные данные				
Число операций – 10, дискретность счета – 100, шаг печати – 2000				
№ операции	№ альтернативы	Требуемые затраты	Ожидаемый эффект	Удельный Вклад
1	0	0	0	0,00
1	1	250	18	13,89
1	2	1440	120	12,00
2	0	0	0	0,00
2	1	180	24	7,50
2	2	2300	36	63,89
2	3	960	42	22,86
3	0	0	0	0,00
3	1	140	50	2,80
3	2	1850	400	4,63
4	0	0	0	0,00
4	1	220	86	2,56
4	2	5600	125	44,80
4	3	3200	110	29,09
5	0	0	0	0,00
5	1	1920	330	5,82
5	2	12000	850	14,12
5	3	5200	32	2,50
5	4	800	80	10,00
6	0	0	0	0,00
6	1	2100	120	17,50
6	2	1500	50	30,00
6	3	900	140	6,43
7	0	0	0	0,00
7	1	890	40	22,25
7	2	1400	60	23,33
8	0	0	0	0,00
8	1	3850	150	25,67
9	0	0	0	0,00
9	1	140	90	1,56
9	2	760	64	11,88
9	3	2100	1280	1,64
10	0	0	0	0,00
10	1	84	65	1,29
10	2	1680	745	2,26
10	3	2450	924	2,65

Результаты расчета

№ операции	№ альтернативы	Требуемые затраты	Ожидаемый эффект	Удельный вклад
2000,00	10	2	1680,00	885,00
	9	1	140,00	140,00
	8	0	0,00	50,00
	7	0	0,00	50,00
	6	0	0,00	50,00
	5	0	0,00	50,00
	4	0	0,00	50,00
	3	1	140,00	50,00
	2	0	0,00	0,00
	1	0	0,00	0,00
16000,00	10	3	2450,00	3494,00
	9	3	2100,00	2570,00
	8	1	3850,00	290,00
	7	1	890,00	1140,00
	6	3	900,00	1100,00
	5	1	1920,00	960,00
	4	1	220,00	630,00
	3	2	1850,00	544,00
	2	1	180,00	144,00
	1	2	1440,00	120,00
18 000,00	10	3	2450,00	3532,00
	9	3	2100,00	2608,00
	8	1	3850,00	1328,00
	7	2	1400,00	1178,00

Это достигается с помощью графиков $\Delta Y = \Delta Y(S_{\text{бид}})$, на которых можно установить диапазоны изменения затрат, после которых заметно снижается градиент $\Delta Y / (S_{\text{бид}})$.

Таким образом, реализация предложенных здесь рекомендаций может способствовать повышению результативности работы органов оперативного управления поддержанием безопасности объектов техносферы. В первую очередь, это проявится в повышении целенаправленности проводимой ими контрольно - профилактической работы по предупреждению техногенных

происшествий, а также в рациональном распределении выделенных для этого ресурсов. Еще одна задача, связанная с оптимизацией контроля при поддержании безопасности конкретных производственных и технологических процессов, рассматривается в заключительном подразделе данной главы.

5.4. Модели и методы поддержания безопасности особо ответственных работ

До сих пор рассматриваемые в данной главе подходы касались предупреждения аварийности и травматизма путем повышения качества компонентов человеко-машинных систем и улучшения проводимой управляющим органам контрольно-профилактической работы. Поскольку эти мероприятия преимущественно способствовали сокращению числа отдельных предпосылок к происшествию, то логическим завершением обоснования способов поддержания требуемой безопасности могли бы стать рекомендации по своевременному пресечению его причинной цепи. Естественно, что это предполагает совершенствование контроля технологии проведения работ.

Актуальность данного пути подтверждается и акцентом, уделяемым в настоящее время дополнительным организационно-техническим мероприятиям по предупреждению техногенных происшествий. В одних случаях это вызвано недостаточным вниманием к заблаговременному обеспечению высокой эргономичности и надежности техники, в других – невысокой подготовленностью эксплуатирующего ее персонала, в остальных – исходя из мнимой целесообразности такого подхода и кажущейся экономии ресурсов.

Однако действительность свидетельствует о неправомерности этих представлений, что убедительно подтверждается имевшими место трагедиями, воистину – «скупой платит дважды». Например, один лишь чернобыльский урок показывает, что причиной катастрофы стали 5 из 6 предпосылок организационного характера. Вот почему организационные методы предупреждения аварийности и травматизма должны использоваться как вынужденная мера в дополнение к техническим средствам обеспечения безопасности.

Ниже рассматривается способ совершенствования контроля некоторого технологического процесса повышенной опасности за счет более рационального расходования ресурсов, выделенных для предупреждения возможных там происшествий. Предполагается, что процесс состоит из m последовательно выполняемых операций, в каждой из которых с вероятностями $P(Xk) = Qk$ возможно появление соответствующих предпосылок.

Возможность или качество их своевременного обнаружения и ликвидации также характеризуется вероятностными параметрами: а) ошибки первого k^{01} и второго k^{10} рода, связанные с выявлением отдельных предпосылок; б) их дополнения до единицы k^{11} и k^{00} ; в) условные вероятности устранения обнаруженных предпосылок P_{ky} ; а под ресурсами $\tau (y_l | x_k)$, необходимыми для операционного контроля и устранения обнаруженных отклонений, затраты S_{kk} и S_{ky} соответственно.

Организация контроля безопасности проведения конкретного процесса в рассматриваемых условиях должна состоять в определении значений величины Xk , указывающей на необходимость ($Xk \neq 0$) и кратность ($Xk = 1, 2, 3$) такого контроля каждой операции, а его совершенствование – в выборе оптимального (в определенном смысле) вектора $X = \{X1, ..., Xk, ..., Xm\}$. В качестве же критерия оптимальности $Z(X)$ и ограничений $g(X)$ должны использоваться организационная характеристика $E\{\psi\}$ и ресурсы подсистемы обеспечения безопасности рассматриваемого опасного процесса – τ или S .

Уточним также, что цель данной подсистемы может заключаться в удержании в минимизации либо суммарных издержек от сопутствующих данному процессу опасностей, либо только ущерба от возможных там происшествий. Следовательно, при совершенствовании организации контроля безопасности его проведения необходимо взять из вектора $E\{\psi\}$ прежде всего вероятность не возникновения происшествий или предпосылок к ним $Pb(\tau) = 1 - Q(\tau)$ и зависящие от нее математические ожидания ущерба $M_\tau [Y]$ и затрат $M_\tau [S]$.

С учетом изложенного обоснование рекомендаций по совершенствованию контроля безопасности проведения рассматриваемых здесь процессов может быть сведено к постановке и

решению ряда задач, отличающихся либо оптимизируемыми параметрами, либо целевой функцией и ограничением. Так, при определении необходимости проведения однократного операционного контроля ($X \in \{0, 1\}$) возможна их следующая словесная постановка: «Определить такой набор контролируемых операций, при котором обеспечивается или максимум вероятности не возникновения происшествий и предпосылок к ним, или минимум величины затрат, необходимых для осуществления контроля и устранения выявленных при этом предпосылок».

Математически это может быть выражено в форме прямой и двойственной постановок задачи линейного программирования, связанной с определением таких векторов X_1 и X_2 , которые удовлетворяет следующим условиям:

$$\left. \begin{aligned} Z_1(X_1) &= P_\delta(X_1) \rightarrow \max; \\ g(X_1) &= S(X_1) \leq S_B(\tau); \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_2(X_2) &= P_\delta(X_2) \rightarrow \min; \\ g(X_2) &= S(X_2) \leq S_B(\tau); \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где $S_B(\tau)$ – затраты, выделенные для операционного контроля и устранения вскрытых при этом предпосылок к техногенным происшествиям; $P_\delta(T)$ – требуемое значение вероятности не возникновения происшествий и предпосылок к ним за время проведения конкретного процесса.

При проведении же особо опасных процессов в техносфере иногда требуется организовать уже многократный контроль выполнения отдельных операций. В этом случае, значение x_k будет принимать значения не 0 или 1, как выше, а 1, 2 и более. Это означает, что содержательная постановка оптимизационной задачи несколько изменяется.

При сохранении тех же критериев оптимизации и ограничений она будет связана с определением кратности контроля, т.е. с выделением операций, подлежащих двойному или тройному контролю и последующему устранению выявленных в них предпосылок *математически* это сводится к нахождению векторов X_3 и X_4 , удовлетворяющих следующим аналогичным условиям:

$$\left. \begin{aligned} Z_3(X_3) &= P_\delta(X_3) \rightarrow \max; \\ g(X_3) &= S(X_3) \leq S_B(\tau); \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_4(X_4) &= P_\delta(X_4) \rightarrow \min; \\ g(X_4) &= S(X_4) \leq S_B(\tau); \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Анализ свидетельствует, что для решения соответствующих задач необходимо знать аналитическое выражение целевых функций и ограничений, а также способы определения входящих в них параметров. С учетом этого, затем можно выбрать и соответствующий алгоритм поиска искомого оптимума. Очевидно, что при принятых предположениях вероятность $P_\delta(X)$ будет определяться произведением, а затраты $S(X)$ - суммой соответствующих показателей каждой отдельной операции рассматриваемых: здесь ответственных технологических процессов:

$$P_\delta(X) = P_\delta(\tau) = \prod_{k=1}^m P_{\delta k}(\tau); \quad Q(X) = 1 - P_\delta(X); \quad (20)$$

$$S(\tau) = S(X) = \sum_{k=1}^m S_k(\tau), \quad (21)$$

где $P_{\delta k}(\tau)$ - вероятность выполнения k -х ответственных технологических операций без происшествий и предпосылок к ним в течение времени; $S_k(\tau) = S_{kk}(\tau) + S_{ky}(\tau)$ - затраты, необходимые в это же время для *контроля* их безопасности и устранения выявленных там предпосылок к происшествиям.

Значение вероятностей $P_{\delta k}(\tau) = 1 - Q_k(\tau)$ может быть найдено по соответствующим методикам в предположении, что из трех учтенных этой вероятностью нежелательных событий (происшествие, критическая и опасная ситуации), выявлению и устранению подлежат лишь предаварийные. Например, при использовании вероятностного графа можно показать, что уточненное по результатам контроля и коррекции значение вероятности $Q_k(\tau)$ рассчитывается по следующим формулам:

а) для однократного операционного контроля безопасности данного процесса

$$Q'_k(\tau) = Q_k(\tau) - x_k[(1 - Q_k(\tau))k^{11} + b_k P_{k11}]; \quad (22)$$

б) для многократного контроля и игнорирования ошибок первого рода ($k^{01} = 0$)

$$Q'_k(\tau) = Q_k(\tau) \prod_{i=1}^{x_k} [k_i^{10} + k_i^{00}(1 - P_{ki})] \quad (23)$$

а затраты на соответствующие процедуры определяются такими выражениями:

$$S_k(\tau) = x_k [S_{kx} + b_k S_{yx}], \quad (24)$$

$$S_k(\tau) = S_{k1} + Q'_k(\tau) k_1^{00} S_{y1} + S_{k2} + Q'_k(\tau) k_1^{10} k_2^{00} S_{y2} + \dots + S_{kx} + Q'_k(\tau) k_1^{10} k_2^{10} \dots k_{x-1}^{10} k_x^{00} S_{yx}, \quad (25)$$

где $P_{ki} = \mu_n$ - условные вероятности устранения выявленных предаварийных ситуаций на i -м шаге контроля (n -м шаге обучения специалиста); $b_k = [1 - Q_k(\tau)]k^{11} + Q_k(\tau)k^{10}$ - вероятность их своевременного обнаружения; S_{kx} , S_{yx} - затраты на организацию контроля и устранения возникающих на его i -м шаге предаварийных ситуаций.

Определение ограничений $g(X)$ должно проводиться с учетом требований к безопасности исследуемого процесса и выделенных для этого ресурсов. В тех случаях, когда они не заданы, но известны требования к их обобщенным значениям, эти ограничения могут рассчитываться другими способами. Например, найти $P;(-с)$ можно, путем а) сопоставления требуемой эффективности контроля и устранения предпосылок к происшествиям с безотказностью соответствующих средств защиты, б) либо по известным в настоящее время статистическим соотношениям между числом происшествий и предпосылок к ним: 1 : 300 – для аварий и поломок или 1 : 500 – для несчастных случаев с работающими на технике.

Что касается предпочтительного способа решения предложенных задач, то им целесообразно считать *градиентный* метод отыскания экстремума. При этом в качестве градиента на j -м шаге движения по координате x_k удобно использовать отношение:

$$\gamma_{jk} = \Delta P_g(x_{jk} \in X) / \Delta S(x_{jk} \in X), \quad (26)$$

Начальные же точки поиска экстремума x_{0k} и соответствующие им решения: $P_{\delta}(X_0)$ – для прямой постановки или $S(X_0)$ – для обратной, должны определяться из выражений (22)–(25), при условии подстановки в них значений параметров k^{00} , k^{01} , k^{10} , k^{11} , P_{ki} , S_{ki} и S_{yi} , удовлетворяющих ограничениям (16)–(19).

Для решения всех рассмотренных здесь задач могут быть применены известные алгоритмы и машинные программы. Идея же поиска экстремума состоит в использовании итерационных процедур, включающих пооперационное наращивание контроля до получения первого приемлемого решения, а затем последовательное улучшение полученного результата, за счет перераспределения средств, выделенных на контроль и коррекцию выполняемых операций. Фрагменты отчетов с исходными данными по задачам и результатами их решения приведены в табл. 4.

Таблица 4
Фрагмент отчета с результатами решения задачи

Задача						
Оптимизация контроля безопасности проведения технологического процесса а (по максимуму вероятности)						
Исходные данные						
Затраты, выделенные для предупреждения предпосылок и происшествий – 1260						
№ операции	Вероятность				Статья затрат	
	происшествий	ошибок 1	ошибок 2	ликвидации	Контроль	Ликвидация
1	0,0012	0,05	0,10 *	0,90	12	123
2	0,0075	0,05	0,10	0,95	74	88
3	0,0040	0,10	0,05	0,80	146	204
4	0,0098	0,05	0,05	0,60	82	418
5	0,0041	0,10	0,0	0,75	234	29
6	0,1053	0,05	0,10	0,82	123	180
7	0,0021	0,10	0,10	0,62	360	334
8	0,0049	0,15	0,05	0,45	28	124
9	0,0014	0,05	0,05	0,95	146	98
10	0,0005	0,10	0,05	0,90	284	72
Результаты расчета						
При заданных исходных данных, контролю и профилактике подлежат следующие операции: 1 5 6 7 8 9 10.						
Вероятность предпосылок и происшествий = 0,0290.						
Затраты на обеспечение требуемой безопасности = 1247.						

Как свидетельствуют приведенные материалы, исходными данными, необходимыми для решения задач оптимизации *однократно* контроля безопасности, являются вероятности возникновения, контроля и ликвидации предпосылок к аварийности и травматизму, а также связанные с этим ошибки и затраты. В результате же их решения получают оптимальные (по максимуму вероятности не возникновения происшествий или минимуму выделенных на *их* предупреждение затрат) перечни контролируемых операций, а также вероятность безопасного проведения процесса или необходимые для этого затраты.

Аналогичную структуру имеют исходные данные и результаты решения задач по оптимизации кратности контроля безопасности проведения особо опасных технологических процессов. Отличия в составе данных обусловлены допущениями о а) пренебрежении ошибок первого рода при контроле и б) достоверном устранении всех выявленных предаварийных ситуаций; тогда как результатами (см. табл. 8) служат не номера контролируемых операций, как в предыдущей задаче, а кратность контроля каждой из них. Такая кратность обеспечивает либо требуемый уровень безопасности проведения рассматриваемого процесса, либо минимальные затраты на предупреждение происшествий и предпосылок к ним, при условии соблюдения введенных ограничений.

Завершая данный параграф, обратим внимание также и на возможность повышения оперативности выполнения конкретного процесса с учетом предложенных рекомендаций. Для этого необходимо учитывать и потери времени на проведение операционного контроля, и снижение техногенного ущерба за счет обнаруженных и устраненных при этом предаварийных ситуаций, который должен измеряться в одних и тех же единицах социального времени. В этих условиях можно воспользоваться способами оптимизации ресурсов, выделяемых для поддержания требуемой безопасности

В целом же внедрение в практику изложенных в данной главе рекомендаций позволяет усовершенствовать процесс поддержания требуемого уровня безопасности производственных и технологических процессов. Полученные выше результаты представляются особенно актуальными, поскольку оценивают

эффективность дополнительных издержек, связанных с введением необязательных (по соображениям технологии) организационно-технических мероприятий по предупреждению техногенных происшествий.

Если же учесть все рекомендации учебного пособия, то становится очевидной реальность не только рассмотренного здесь действительно системного синтеза программно-целевого обеспечения безопасности в техносфере, но и действительно системного анализа ее моделируемых опасных процессов [5].

Таблица 5
Фрагмент отчета с результатами решения задачи

Задача				
Оптимизация кратности контроля безопасности проведения технологического процесса (по минимуму затрат)				
Исходные данные				
Допустимая вероятность возникновения происшествия и АС – 0.00600				
№ операции	Вероятность		Статья затрат	
	происшествий	ошибок	Контроль	Ликвидация
1	0,0024	0,1500	58	25
2	0,0044	0,2000	202	146
3	0,0096	0,2000	418	82
4	0,0012	0,2500	29	234
5	0,0105	0,1000	192	125
6	0,0061	0,1500	336	360
7	0,0068	0,2000	124	28
8	0,0056	0,1000	60	88
Результаты решения				
При заданных исходных данных задачи, рекомендуется следующая кратность операционного контроля операций: 1 3 2 3 1 1 2 1.				
Затраты на обеспечение требуемой безопасности = 2536.				
Вероятность возникновения происшествий и АС = 0,00577.				

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За время своего существования моделирование проникло во многие отрасли науки, среди которых уже традиционно на первом месте выделяются экономика, экология и военные области (в некоторых моделях они тесно переплетаются). Перечисленные дисциплины можно объединить по некоторым признакам объектов их исследований, которые характеризуются как большие системы. В последние годы имитация проникает в области разработки и применения сложных технических систем (в первую очередь, космических) что связано с радикальным усложнением самих этих систем, стоящих перед ними задач, а так же высокой ценой риска при неправильных действиях экипажа, оператора и т. д. Среди характерных примеров можно привести работу по стыковке и сборке крупногабаритных разветвленных элементов орбитальных станций, дистанционное управление планетными автоматами в условиях большой длительности распространения радиосигнала (до 40 мин. для Марса) и многие другие, когда принятие решений требует предварительного «проигрывания» нескольких вариантов развития событий и их последствий при различных стратегиях управления. Трудно переоценить значение моделирования и в других отраслях техники. В безопасности жизнедеятельности и охране труда моделирование применяется для решения многих многофакторных задач.

ГЛОССАРИЙ

Параметры системы – показатели, характеризующие систему и имеющие вполне определенную шкалу отчета. Любой параметр имеет числовое значение.

Структура системы – организация связи и отношений между ее элементами. Различают системы с постоянной и переменной структурами.

Организация системы – совокупность структуры системы и способов функционирования ее элементов.

Цель – желаемое состояние некоторых параметров и характеристик системы.

Управляемые переменные – конечное число параметров и характеристик, на которые можно активно воздействовать и менять их значения в определенном интервале.

Алгоритм – точное предписание относительно последовательности действий, преобразующих некоторые исходные данные о системе в конечный желаемый результат.

Адекватность модели – соответствие реальной системы его модели, отображаемой на формальном или описательном языке.

Критерий принятия решений – цель, измеряемая по некоторым параметрам системы, причем величины этих параметров устремляются либо к максимуму, либо к минимуму.

Модель – описательное или математическое отображение реальной системы, позволяющее адекватно характеризовать связи в системе, ее структуру, организацию и другие закономерности развития системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глинский Б. А., Грязнов Б. С. и др. Моделирование как метод научного исследования. – М.: Моск. Университет, 1965. – 247 с.
2. Бусленко Н. П.. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
3. Советов Б. Я., Яковлев С. А.. Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 1988, 134с.
4. Горшков Ю. Г., Юсупов Р. Х., Зайнишев А. В. Прогнозирование состояния производственного травматизма на основе теории информационных цепей // Журнал «БЖД». 2006. № 9.
5. Хашиковский А. В., Соларев С. А. Программное информационное обеспечение ДОЗОР иск // Журнал «БЖД». 2006. № 9.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Общие сведения о моделировании.....	4
1.1. Понятие модели.....	4
1.2. Моделирование и абстрагирование.....	16
1.3. Структура процесса моделирования.....	20
1.4. Исследование модели.....	27
1.5. Типы моделей.....	36
2. Математическое моделирование охраны труд.....	44
2.1. Моделирование.....	44
2.2. Математические модели.....	50
2.3. Использование математических моделей.....	55
2.4. Особенности математического моделирования условий труда.....	63
2.5. Задачи математического моделирования в охране труда.....	67
3. Методы построения математических моделей.....	70
3.1. Этапы построения математических моделей.....	70
3.2. Распределение функций между человеком и машиной.....	75
3.3. Моделирующие алгоритмы.....	79
3.4. Основные операторы моделирующего алгоритма.....	84
4. Моделирование промышленной безопасности.....	89
4.1. Математическое моделирование производственного травматизма.....	89
4.2. Прогнозирование и моделирование возникновения опасных ситуаций.....	99
4.3. Моделирование обеспечения безопасности труда.....	102
4.4. Структура мероприятий по совершенствованию управления обеспечением безопасности.....	110
5. Моделирование требуемого уровня безопасности.....	119
5.1. Общие принципы поддержания требуемого уровня безопасности.....	119

5.2. Модели и методы поддержания готовности персонала к обеспечению безопасности.....	124
5.3. Моделирование контрольно-профилактической работы по предупреждению происшествий.....	133
5.4. Модели и методы поддержания безопасности особо ответственных работ.....	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	156
ГЛОССАРИЙ.....	157
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	158

Учебное издание

Нурхаят Гарифовна Хайрлиева

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ
ПО ОХРАНЕ ТРУДА

Учебное пособие

Нач. РО УИЦ

З. Губайдулина

Редактор

З. Губайдулина

Компьютерная верстка

Л. Умирбекова

Подписано в печать 04. 02. 2014 г.

Тираж 300 экз. Формат 60х84 1/16. Бумага типогр. № 1.

Уч. изд. л. 10,1. Усл. п. л. 9,3. Заказ № 45. Цена договорная

Издание Казахского национального технического
университета им. К.И. Сатпаева
Учебно-издательский центр КазНТУ
г. Алматы, Сатпаева, 22.

ISBN 978-601-228-637-3



9

7 8 6 0 1 2 2 8 6 3 7 3