

## ГЛАВА 2

# ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОСФЕРЕ

### 2.1. Понятие и краткая характеристика моделей

Без особого преувеличения можно сказать, что в своей осознанной жизни человек имеет дело с большим количеством самых различных моделей. При этом чаще всего он их использует в качестве аналога своего или чьего-то будущего поведения либо какого-либо реального процесса или объекта. На этом основании не редко утверждают, что понятие «человек моделирующий» можно считать тождественным термину «человек разумный» [9].

Однако особенно широко понятия «модель» и «моделирование» распространены в сфере науки, образования, а также при выполнении проектно-конструкторских работ и в серийном техническом производстве. Обычно термин «модель» там используется для обозначения а) устройства, воспроизводящего строение или действие какого-либо другого устройства (уменьшенное, увеличенное или в натуральную величину), и б) аналога (чертежа, плана, графика, схемы, описания...) конкретного явления, предмета или процесса.

Важное место при составлении всех моделей принадлежит умению людей строить соответствующие *гипотезы* и пользоваться аналогиями. Первое понятие часто определяют как предсказание или предположительное суждение, основанное на некотором количестве опытных данных, наблюдений и догадок. Тогда как под *аналогией* обычно подразумевается представление о каком-либо частном сходстве, причем такое сходство может быть как существенным, так и несущественным, в зависимости от уровня абстрагирования, определяемого конечной целью исследования.

Гипотезы и аналогии, в определенной мере отражающие реальный, объективно существующий мир, должны обладать наглядностью или сводиться к удобным для человека логическим схемам. Вот почему моделями также считают некоторые образы или логические схемы, упрощающие рассуждения и логические построения или позволяющие проводить такие эксперименты, которые уточняют представления людей об окружающем их мире. Другими словами, модель обычно играет роль как бы не которого заместителя реального объекта и используется для его изучения. Только что сделанные пояснения позволяют сделать следующие определения рассматриваемых здесь категорий.

*Модель* - такой материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе познания (изучения) замещает объект-оригинал, сохраняя некоторые его важные для данного исследователя типичные черты\*. *Моделирование* - процесс построения и использования модели.

\*Уточним, что под *объектом* здесь подразумеваются все предметы, процессы и явления, которые наблюдают или могут наблюдать; под *определением* "описание понятия посредством уже известных понятий, а под *категорией* наиболее общее понятие.

Как следует из данных определений, все модели и методы моделирования с определенной условностью могут быть разделены на следующие наиболее общие классы: *материальные* (реально существующие) и *идеальные* (мысленно воображаемые). Примерами материальных моделей служат лабораторные установки, макеты автомашин, манекенщицы, а идеальных - описание или представление любых явлений, процессов и предметов с помощью графических и математических символов и даже слов. Кроме того, среди моделей последней группы иногда выделяют *когнитивный* тип модели, понимая под ним мысленный образ конкретных объектов, допустим, персонажей какого-либо прочитанного вами литературного произведения.

Поскольку один и тот же объект может восприниматься разными людьми по-разному, то и создаваемая ими модель зависит от множества субъективных факторов - объема и качества знаний, особенностей мышления и эмоционального состояния, ряда других причин, зачастую не доступных рациональному осознанию. Естественно, что по этим же причинам всегда будут отличаться между собой и модели одного и того же объекта, создаваемые разными людьми или тем же самым человеком, но, например, в разном возрасте.

Второй (после субъективности восприятия) особенностью моделей служит их относительная неполнота. Дело в том, что при моделировании исследователь всегда исходит из вполне определенной цели, учитывая только наиболее существенные для ее достижения факторы. Поэтому любая созданная им модель не тождественна оригиналу: для сравнительно простых объектов она может быть совершеннее оригинала, тогда как для сложных объектов она всегда значительно проще его.

К другим важным характеристикам моделей следует отнести то, что называют адекватностью, а также степень их сложности и предсказательности (или потенциальности). Если результаты использования модели удовлетворяют цели, т. е. могут быть пригодными, например, для прогнозирования поведения или свойств оригинала, то говорят, что модель *адекватна* реальности. Однако, учитывая заложенную при создании неполноту модели, можно утверждать, что идеально адекватная сложному объекту модель принципиально невозможна.

Что касается *сложности* (или простоты) модели, то уместно сказать следующее: из двух моделей, позволяющих достичь желаемой цели, предпочтение должно быть отдано более простой. При этом адекватность и простота модели далеко не всегда представляют собой противоречивые требования. Следовательно, для сложного объекта можно создать множество разных моделей, отличающихся по степени полноты, адекватности и сложности.

Наконец, говоря о *предсказательности* модели, обычно имеют в виду ее пригодность для получения новых знаний об объекте-оригинале. Обоснованно считается, что хорошая модель содержит в себе потенциальное знание, которое человек, исследуя ее, может приобрести, сделать доступным

для других и использовать в практических целях. Именно свойство потенциальности, иногда называемое «богатством» модели, позволяет ей выступать в качестве самостоятельного объекта исследования.

Следующая (после особенностей) группа характеристик рассматриваемых здесь моделей касается предназначения, а точнее, тех функций, ради которых они и создаются. Кратко ознакомимся с совокупностью соответствующих черт, важных как в теоретическом, так и в практическом отношении.

Самым важным и наиболее распространенным предназначением моделей является их применение в целях исследования и *прогнозирования* поведения сложных процессов и явлений, в том числе интересующих нас здесь - техносферных. Дело в том, что ряд подобных объектов вообще не может быть изучен непосредственным образом, например, в силу быстротечности их процессов, дороговизны или опасности натурального исследования. Недопустимы также эксперименты с экономикой и прошлым, какого то государства, поскольку в первом случае всегда будут страдать люди, а во втором - история, которая, как известно, «не терпит сослагательного наклонения».

По этим причинам, проведению крупных и/или сложных экспериментов всегда должно предшествовать создание и исследование различных моделей, вначале идеальных, а затем и материальных, при необходимости. Тем более что в последнее время появилась мощная электронно-вычислительная техника, позволяющая проводить так называемые машинные эксперименты - не столь дорогостоящие и в то же время довольно обстоятельные (учитывающие колоссальное число объективно действующих факторов).

Второе, не менее важное предназначение моделей состоит в том, что с их помощью выявляются наиболее существенные факторы, формирующие те или иные свойства объекта-оригинала. Заметим - не все его факторы и свойства, а лишь те, которые интересуют разработчика и пользователя модели. Например, исследуя движение тел в атмосфере, конструктор самолета может выяснить, что их ускорение существенно зависит от массы, формы и шероховатости поверхности, но практически не зависит от цвета последней.

Наконец, модель позволяет научиться управлять самим объектом, апробируя различные варианты воздействия на него. Использовать в этих целях оригинал часто бывает экономически не выгодно или рискованно. Допустим, получить первые навыки в управлении тем же самолетом безопаснее, быстрее и дешевле на его тренажерной модели, чем непосредственно подвергать неоправданному риску себя и такую дорогостоящую машину.

Более того, поскольку свойства реальных сложных объектов непрерывно меняются с течением времени, то особое значение приобретает задача прогнозирования их состояния под воздействием этого и других факторов. Например, при проектировании, изготовлении и эксплуатации любого сложного технического устройства желательно уметь прогнозировать

изменения надежности и безопасности его функционирования, а также определять наиболее эффективные меры по поддержанию таких свойств.

Таким образом, мы ознакомились с наиболее существенными признаками и свойствами моделей. В частности, установили, что модели и моделирование вообще нужны для того, чтобы а) понять, как устроен конкретный объект-оригинал; каковы его структура, основные свойства, закономерности функционирования и развития; б) научиться управлять объектом и процессом его функционирования, в том числе определять наилучшие для него управляющие воздействия при заданных целях и критериях; в) прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации конкретных способов и форм воздействия на моделируемый объект.

## **2.2. Классификация моделей и методов моделирования**

Следующий этап знакомства с моделированием, выбранным здесь в качестве основного аппарата исследования опасных процессов в техносфере, логично посвятить рассмотрению классификации используемых при этом моделей и методов. Предварительно поясним необходимость подобной классификации: ее следует рассматривать, как определенный этап в создании некоторого полезного инструментария, который в последующем позволит не только изучить свойства самого процесса моделирования, но и усовершенствовать его.

С другой стороны, отмеченная выше неоднозначность термина «модель», огромное количество ее видов и способов использования, а также их быстрое развитие в настоящее время затрудняют построение логически стройной и удовлетворяющей всех классификации. Более того, любая попытка какого-либо деления объектов - всегда условна, поскольку она отражает не только пристрастие автора, но и ограниченность его познаний в чрезвычайно большом числе областей научного познания.

Несмотря на обозначенные трудности, разработка классификации изучаемых объектов всегда полезна. Не зря же иногда утверждается, что истинно научное исследование должно начинаться с классификации. К тому же сделать это не очень трудно, поскольку первый шаг в этом направлении нами уже сделан ранее – путем деления всех рассмотренных выше моделей на материальные и идеальные.

Систематизация известных к настоящему времени моделей и методов их использования позволяет утверждать о правомерности классификации, изображенной на рис. 2.1. Сразу же отметим, что в качестве оснований для деления рассматриваемых в ней объектов приняты их природа и тип формализованного представления. Что касается предназначения или каких-то других признаков классификации, то о них будет сказано несколько ниже.

Кратко поясним особенности всех основных классов интересующих нас объектов, начиная с тех, которые размещены в левой части, содержащей материальные (реальные, натурные или предметные) модели. Такой приоритет обусловлен тем, что их значительно меньше, хотя эти модели и

вторичны по отношению к идеальным, поскольку процесс их создания начинается с соответствующего мысленного предвосхищения.

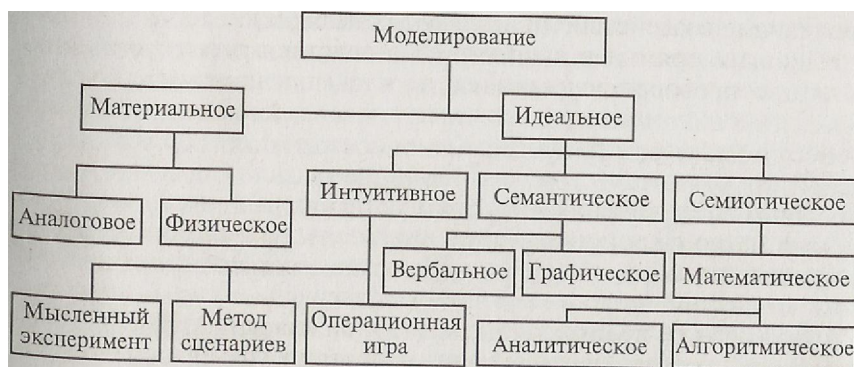


Рис. 2.1. Классификация методов моделирования

Более того, ситуация с материальными моделями еще характерна и тем, что они более наглядны и просты для понимания. В самом деле, все модели этого класса основаны на использовании свойства подобия между ними и какими-либо объектами-оригиналами. При этом физические модели обычно являются геометрически подобными оригиналам, а аналоговые - напротив, физически. Допустим, макет торпеды должен обладать геометрическим подобием, а процесс обтекания его потоками жидкости и газа или колебаний в этих средах - описываться одними и теми же математическими соотношениями.

Напомним, что две геометрические фигуры подобны, если отношение всех соответственных длин и углов одинаково. Следовательно, при известном коэффициенте подобия (или масштабе) для перехода от модели к оригиналу и наоборот достаточно простого перемножения или деления. В случае же физического подобия подобный переход требует такого пересчета характеристик модели и оригинала, который аналогичен переходу от одной системы координат (единиц измерения) к другой.

Методы *физического* (натурного, предметного) моделирования нашли самое широкое применение в авиа-, автомобиле-, ракетно- и судостроении, а также в других отраслях промышленности и транспорта. Например, при разработке нового летательного аппарата большое значение имеют эксперименты с натурными образцами или моделями в аэродинамической трубе. Исследование полученных там результатов их обтекания воздушным потоком позволяет найти наиболее рациональные формы корпуса самолета либо ракеты и всех их выступающих частей.

В основу же *аналогового* моделирования положено совпадение (преимущественно - качественное) математического описания различных предметов, процессов и явлений. Характерным примером аналоговых моделей служат механические и электрические колебания, которые подчинены одним и тем же законам, т.е. описываются одинаковыми аналитическими формулами, но относятся к качественно различным физическим процессам.

При некоторых допущениях аналогичными можно считать большинство процессов, протекающих в газе и жидкости, включая обтекание их потоками различных тел, а также явления теплопереноса и диффузии примесей. Основное удобство аналоговых моделей заключается в том, что изучение одних процессов можно проводить в других, более удобных условиях. Например, изучение тех же механических колебаний можно вести с помощью электрической схемы, а обтекание жидкости заменить обтеканием газом, и наоборот.

Что касается правой части рис. 2.1, включающей в себя идеальные (воображаемые) модели и методы их использования, то здесь ситуация значительно сложнее. Как по их количеству и строгости деления по классам, так и по однозначности восприятия и интерпретации конкретных моделей. Несмотря на некоторую условность их деления и возможную спорность определения отличительных признаков, кратко охарактеризуем каждый приведенный там тип моделей.

Под *интуитивным* (иногда называемым также «ненаучным») обычно подразумевают моделирование, использующее не обоснованное с позиций формальной логики представление объекта исследования, которое к тому же не поддается формализации или не нуждается в ней. Такое моделирование осуществляется в сознании человека, в форме мысленных экспериментов, сценариев и игровых ситуаций с целью его подготовки к предстоящим практическим действиям за счет заблаговременной преднастройки к ним.

Естественно, что основой для подобных моделей служит жизненный опыт людей, т. е. знания и умения, накопленные каждым человеком и передающиеся от поколения к поколению. Кроме того, любое эмпирическое знание, полученное людьми из эксперимента или в процессе наблюдения без объяснения причин и механизмов наблюдаемых явлений, также можно считать интуитивным и использовать при соответствующем моделировании.

В отличие от интуитивного *семантическое* (смысловое) моделирование логически обосновано с помощью некоторого числа исходных предположений. Сами эти предположения нередко принимают форму гипотез, создаваемых на основе наблюдения за объектом моделирования или какими-либо его аналогами. Главное же отличие этого вида моделирования от предыдущего заключается не только в умении выполнять и воспроизводить для других его действия, но и в знании внутренних механизмов, которые используются при этом.

Как показано на рис. 2.1, в данную группу методов входит вербальное (словесное) и графическое моделирование. При этом первый тип моделей образуется с помощью слов, из которых составляются высказывания, суждения и умозаключения относительно моделируемого объекта. А вот при графическом моделировании уже используются материальные носители информации - бумага, классная доска или монитор компьютера, на которых размещаются различные рисунки, чертежи, структурно-функциональные схемы или диаграммы причинно-следственных связей.

В отличие от смыслового семиотического, или знакового, моделирование является наиболее формализованным, поскольку использует не только общеизвестные слова или довольно наглядные изображения (как в семантических моделях), но и разного рода символы - буквы, иероглифы, нотные знаки, цифры. Более того, в последующем все они объединяются с помощью специфических правил, по которым принято оперировать как отдельными элементами, так и создаваемыми из них знаковыми образованиями.

Основным и наиболее представительным\* подвидом данного моделирования считается математическое моделирование. Далее под *математическим* моделированием будет подразумеваться идеальное знаковое формальное моделирование, при котором описание объекта-оригинала осуществляется на языке математики, а исследование модели проводится с использованием тех или иных математических методов [9].

\*Такое суждение, конечно же, не бесспорно, так как и все слова естественной разговорной речи человека, и любые графические изображения вполне правомерно относить к знакам. Однако, учитывая использование в последующем еще более формализованных моделей, здесь эти образования умышленно отнесены к смысловым, а не семиотическим моделям.

Учитывая широкое и плодотворное распространение математических моделей, уместно привести и более строгое их определение, представляющее собой так называемую «операторную форму». В этом случае такой моделью называют оператор  $A$ , позволяющий по соответствующим значениям входных параметров  $X$  установить выходные значения параметров объекта моделирования  $Y$ . Формально это записывается следующим образом:

$$A: X \rightarrow Y; X \in \Omega_x, Y \in \Omega_y, \quad * \quad (2.1)$$

где  $\Omega_x$  и  $\Omega_y$  - множество значений входных и выходных параметров моделируемого объекта.

При этом в зависимости от природы объекта-оригинала, элементами множеств  $\Omega_x$  и  $\Omega_y$  могут являться любые символы, обозначающие числа, векторы, функции, подмножества и т. п.

Что касается классификации математических моделей, то основаниями для их разбиения на классы могут быть не только каждый компонент выражения (2.1): вид оператора  $A$  (линейный, нелинейный) и его сложность (предмет, система), тип входных  $\Omega_x$  и выходных  $\Omega_y$  параметров, но также способ и цель исследования образованной ими модели. Проиллюстрируем возможность такой классификации моделей на примере последних трех из только что перечисленных признаков в обратной последовательности относительно перечисления.

При использовании в качестве признака классификации *цели* моделирования (или предназначения математических моделей) все эти, да и другие идеальные модели могут быть разделены на следующие три типа: дескриптивные, нормативные и ситуационные. При этом в различных литературных источниках можно встретить и другие их наименования,

например, модели первого типа там иногда называют описательными, второго - оптимизационными, а третьего - управленческими.

Предназначением *дескриптивных* моделей обычно является описание признаков моделируемых объектов и объяснение законов изменения их параметров с помощью слов, рисунков или каких-либо символов. Считается, что эти модели лучше всего приспособлены для ответа на примерно такие вопросы: что такое техногенный риск? как его величина зависит от вероятности и тяжести, происшествий в техносфере? или как эти параметры будут изменяться в зависимости от времени?

В отличие от дескриптивных *нормативные* или оптимизационные модели имеют целью не поиск ответа на вопросы о том, как есть или будет, а о том, как должно быть. Иначе говоря, основная их функция состоит не столько в отражении действительности, сколько в определении желательного способа поведения. Вот почему они должны обосновывать рациональные структуры и параметры моделируемых объектов, а также определять оптимальные траектории достижения стоящих перед ними целей с учетом тенденций и противоречий, выявленных с помощью упомянутых выше дескриптивных моделей.

Еще более конструктивными считаются *ситуационные*, или управленческие, модели, предназначенные для выявления наиболее существенных для моделируемого объекта факторов. Кроме того, эти модели могут также использоваться для априорной, оценки его основных количественных характеристик, а значит, и векторов текущего и прогнозируемого состояний оригинала. Сопоставление же этих и нормативных показателей может способствовать нахождению ошибок управления реальным объектом.

В самом деле, величина ошибки будет определяться разностью векторов между точками желательного и действительного состояний в исследуемом их пространстве, а ее своевременная оценка может способствовать не только выявлению «узких мест» при функционировании объекта, но и разработке наиболее эффективных стратегий его совершенствования. Основным же достоинством ситуационных моделей является их пригодность для количественного прогноза соответствующих рисков, а также для априорной оценки и оптимизации мероприятий по их уменьшению.

В целом же можно рекомендовать следующие области *предпочтительного* использования моделей, принадлежащих каждому из следующих трех основных классов: а) дескриптивные (описательные) модели - для словесной, графической и математической интерпретации объекта системного анализа и моделирования процессов в техносфере; б) нормативные - для обоснования или уточнения значений показателей безопасности их проведения; в) ситуационные - для исследования явлений и процессов, оказывающих наиболее существенное влияние на возникновение и предупреждение техногенных происшествий.

Сразу же оговоримся, что данную рекомендацию не следует считать



безальтернативной, поскольку изложенные выше формальные модели и методы исследования могут применяться и в других сочетаниях. Более того, лишь комплексное их применение может способствовать не только лучшей сравнимости полученных при моделировании результатов, но и росту достоверности основанных на них выводов и практических рекомендаций.

В зависимости же от способа исследования все математические модели принято делить на *аналитические* и алгоритмические. Аналитическое моделирование позволяет получить выходные результаты в виде конкретных аналитических выражений, использующих счетное число арифметических операций и переходов к пределу по натуральным числам. При этом частными случаями соответствующих моделей являются все корректные алгебраические выражения, а также та их часть, которая имеет умышленно ограниченное число параметров и применяется для получения приближенных результатов.

В отличие от аналитических *алгоритмические* модели могут учитывать практически любое число существенных факторов, а потому используются для моделирования наиболее сложных объектов и чаще всего с помощью мощных и быстродействующих компьютеров. Однако в большинстве подобных случаев алгоритмические модели позволяют получать лишь приближенные результаты, используя метод численного или имитационного моделирования. Дополнительные сведения о данных моделях и методах будут приведены ниже.

Наконец, третьим признаком классификации математических моделей будет служить тип их входных и выходных параметров. Дело в том, что некоторые их группы нередко имеют различную «математическую природу», например, являясь постоянными величинами, или функциями, скалярами, или векторами, четкими или нечеткими подмножествами. Вот почему в зависимости от вида используемых параметров эти модели правомерно разделить на такие пять типов: детерминированные, стохастические, случайные, интервальные и нечеткие.

Перечисленные типы математических моделей отличаются между собой, прежде всего по степени определенности или неопределенности своих параметров, обусловленной недостатком или спецификой имеющейся о них информации. Естественно, что особое положение, соответствующее полной определенности, занимают *детерминированные* модели. В них каждому параметру соответствует конкретное целое, вещественное или комплексное число либо соответствующая функция.

В *стохастической* модели значения всех или отдельных параметров определяются случайными величинами, заданными плотностями вероятности, чаще всего - нормально или экспоненциально распределенными. Несколько сложнее обстоит с определенностью *случайной* модели, где некоторые или все параметры уже являются случайными величинами, найденными в результате статистической обработки ограниченной выборки и представленными в виде оценок соответствующих плотностей вероятности, а потому и менее точными.

Заметно более неопределенные параметры имеют *интервальные* модели, в которых вместо точечных оценок их значений (как в предыдущем случае) используются интервальные. Нередко такие интервалы задаются лишь их граничными значениями (наименьшим и наибольшим из возможных). Примерно этот же способ представления параметров применяется и в *нечетких* моделях, которые уже оперируют нечеткими величинами или числами, также заданными на некоторых интервалах возможных значений [16].

Другими отличиями между интервальными и нечеткими моделями служат специфические правила арифметической и логической обработки нечетких параметров, а также нечеткие алгоритмы логического вывода относительно конечных результатов моделирования.

Завершая краткую характеристику идеальных моделей, изображенных правой ветвью рис. 2.1, обратим внимание на недопустимость противопоставления всех указанных там видов мысленного, смыслового и знакового моделирования. Напротив, все они должны органично дополнять друг друга, поскольку имеют вполне конкретные области предпочтительного применения. При этом интуитивные модели чаще всего служат как бы генератором идей для последующего построения семантических, а последние - основой для семиотических и т. д.

Рассмотренную классификацию, конечно же, не следует считать всеобъемлющей, так как в ней отсутствуют такие разновидности, например, когнитивной модели, как «содержательная», т. е. модель этого же типа, но уже словесно выраженная; «концептуальная» - являющаяся подтипом последней и использующая лишь наиболее общие понятия конкретной предметной области; «формальная» - представляющая концептуальную модель с помощью одного или нескольких математических либо алгоритмических языков; «информационная» - олицетворяющая собой компьютерную базу данных, но не обладающая предсказательной силой.

Подобный список неучтенных выше моделей можно продолжить также за счет включения в него математических моделей, параметры которых имеют различное отношение, допустим: а) ко времени - «статическая», «динамическая»; б) к размерности пространства - «одномерная», «многомерная». Имеют место и совершенно специфические модели и методы, характеризующиеся неопределенностью своеобразного типа, например, той, которая рассматривается в теории игр. Ее принципиальное отличие проявляется, в том числе и в необходимости учета злонамеренной целенаправленности соперников, обычно отсутствующей у объектов неживой природы.

### **2.3. Обобщенная структура моделирования процессов в техносфере**

Приведем ряд правил и приемов моделирования, облегчающих исследование техносферных процессов. Необходимость в подобной методике или обобщенной технологии создания и анализа моделей обусловлена

трудоемкостью соответствующего процесса, необходимостью привлечения к нему различных специалистов. Особенно это характерно для процессов в техносфере, которые отличаются не только большим разнообразием, но и высокой сложностью, что указывает на потребность в знании не только многих наиболее общих законов, но и частых закономерностей.

Например, к числу наиболее общих законов техносферы относятся уравнения баланса массы, количества движения и энергии вообще, справедливые при определенных условиях для любых материальных тел и технологических процессов, независимо от их структуры, состояния и химического состава. Уравнения данного класса подтверждены огромным количеством экспериментов и в силу этого должны применяться, например, при математическом моделировании процессов в техносфере.

Более частные соотношения другого класса в физике и механике обычно называют физическими уравнениями или уравнения состояния. Допустим, закон Гука устанавливает соотношение между величиной механического напряжения и деформацией упругих тел, а уравнение Клапейрона делает примерно то же, но уже применительно к идеальным газам. Следовательно, разработчикам моделей нужно знать и эти частности с тем, чтобы использовать их при исследовании некоторых техносферных процессов, поскольку они описывают особенности поведения материальных тел при воздействии реально существующих внешних и внутренних факторов.

Наконец, объективная сложность современных процессов в техносфере исключает возможность их всестороннего изучения с помощью одной модели какого-либо Типа. Напротив, моделирование таких процессов предполагает их представление в виде системы взаимодействующих и зачастую разнородных компонентов. Это означает, что и модель процесса их функционирования также может содержать в себе несколько разнотипных субмоделей.

Вот почему представляется целесообразным сформулировать не только совокупность отдельных правил и приемов моделирования, но и упорядочить их в форме, включающей как наиболее общие связи, так и этапы построения, проверки и использования моделей. Наличие такой обобщенной структуры, например, подобной той, которая изображена на рис. 2.2, позволило бы снизить затраты на моделирование и уменьшить вероятность появления трудно устранимых впоследствии ошибок.

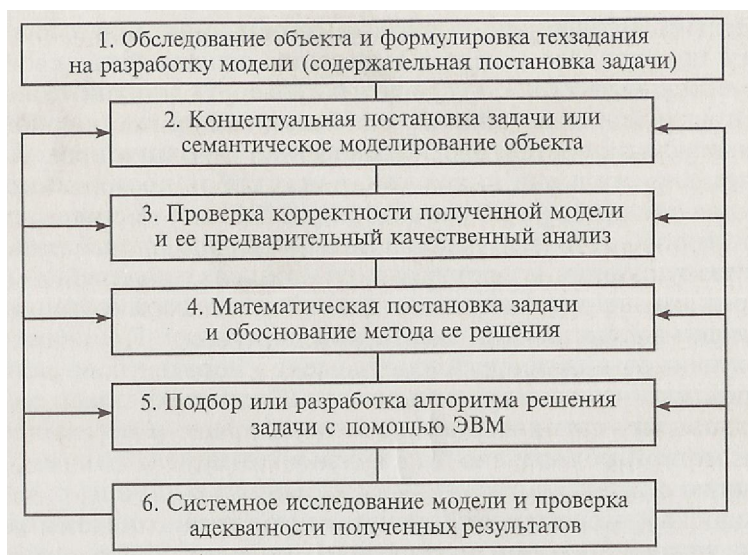


Рис. 2.2. Основные этапы процесса моделирования

Прокомментируем показанные на рис. 2.2 этапы, обращая внимание на их назначение, отличительные особенности, практическую реализацию и уделяя преимущественное внимание тем аспектам, которые имеют непосредственное отношение к моделированию процессов в техносфере.

*Этап 1.* Прежде всего, отметим, что решение о создании новой, в особенности алгоритмической или численной, модели следует принимать в случае отсутствия более простых путей решения возникшей проблемы (допустим, путем модификации уже существующих моделей). Необходимость в новых моделях возникает при проведении исследований на стыке различных отраслей, выполнении проектно-конструкторских работ на производстве и транспорте, создании там автоматизированных систем управления, планирования и контроля.

При этом в качестве *заказчика* обычно выступает организация, заинтересованная в новой модели и финансирующая работы по ее созданию. После принятия такого решения она осуществляет поиск наиболее подходящего исполнителя своего заказа и предоставляет ему для обследования моделируемый объект. Эту миссию и последующие этапы моделирования чаще всего исполняет рабочая группа, включающая специалистов разного профиля - конструкторов, технологов, эксплуатационников, а также прикладных математиков и экспертов по системной инженерии безопасности.

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

- а) тщательно обследовать собственно моделируемый объект или процесс с целью выявления основных его свойств, параметров и факторов; б) собрать и проверить доступные экспериментальные данные об объектах-аналогах и провести дополнительные испытания при необходимости; в) проанализировать литературные источники и сравнить между собой

построенные ранее модели данного объекта или ему подобные; г) систематизировать и обобщить весь накопленный материал, разработать общий план создания и использования комплекса моделей.

Предназначением данного этапа является формирование *содержательной* постановщиками задачи моделирования. При этом особую значимость приобретает составление перечня вопросов, на которые должна ответить новая модель. Подготовка такого списка посильна лишь специалистам, не только хорошо разбирающимся в предметной области, но и довольно коммуникабельным, т. е. умеющим общаться различными людьми.

Подобных экспертов иногда называют постановщиками задач. Кроме упомянутого, они должны уметь выделять главное из большого числа нечетко высказанных мнений других специалистов и расплывчато сформулированных пожеланий заказчика. Лишь на основе этого главного, выделенного из всей собранной информации, постановщик может сформулировать такие требования к будущей модели, которые, с одной стороны, удовлетворят заказчика, с другой - удовлетворят ограничениям на сроки и ресурсы, выделенные для создания и реализации модели.

Из перечисленных требований видно, насколько велика ответственность постановщика задачи и насколько могут быть тяжелы ошибки и просчеты, опущенные им. Поэтому специалисты данного профиля особенно высоко ценятся, являясь «золотым фондом» исследовательских коллективов. Думается, что по своему образованию постановщик задачи моделирования рассматриваемых здесь техносферных процессов должен быть экспертом в области системной инженерии безопасности либо математиком-прикладником.

Завершая рассмотрение этапа 1 обобщенной структуры процесса моделирования, еще раз подчеркнем его важность и ответственность. В целом обследование объекта и проработка соответствующего технического задания могут составлять до 30 % Времени, отпущенного на создание модели, а с учетом возможного уточнения и переформулировки - и того более.

*Этап 2.* Следующим (после оформления техзадания) этапом служит концептуальная постановка задачи или семантическое моделирование исследуемого объекта. В отличие от содержательной постановки этот этап выполняется рабочей группой без привлечения заказчика. В качестве же исходной информации здесь используются полученные к этому моменту сведения о моделируемом объекте и его аналогах, а также уточненные ранее требования к будущей модели.

Анализ и совместное обсуждение членами рабочей группы сделанной ранее содержательной постановки задачи и имеющихся у них когнитивных моделей позволяет синтезировать и более формализованную, концептуальную модель. Напомним, что концептуальная модель - это сформулированный в терминах конкретной отрасли теории и практики перечень основных вопросов, интересующих заказчика, а также

совокупность гипотез относительно свойств и поведения объекта моделирования.

Следует отметить, что наибольшие трудности при формулировке концептуальной модели приходится преодолевать для моделей, находящихся на стыке различных дисциплин. В интересующем нас аспекте техносферы - ее безопасности - это всегда относится к моделированию процесс, а появления происшествий в человеко-машинных системах. В самом деле, здесь нередко встречается разное представление об одних и тех же категориях, используемых, например, в общественных и технических науках.

А проявляются подобные разночтения при формулировании совокупности гипотез о поведении, как отдельных компонентов, так и всей человеко-машинной системы. Особенно это характерно для случаев возникновения там ошибок, отказов и нерасчетных внешних воздействий, являющихся звеньями причинной цепи возможного техногенного происшествия. Дело в том, что различные специалисты выдвигают различные версии развития подобных ситуаций, подтверждая их теми теоретическими доводами и экспериментальными данными, которые позаимствованы из близкой им области.

В частности, при моделировании аварийности и травматизма не все «человековеды» воспринимают гипотезу о случайном характере появления происшествий. Тогда как «технарю не могут согласиться, например, с так называемым синдромом безопасности, формирующимся у персонала по истечении примерно двух лет работы и проявляющимся в этот период в резком росте предпосылок к аварийности и травматизму по вине непосредственно работающих на технике. А специалисты по гигиене труда никак не могут согласиться с тем, что влияние напряженности труда в определенных ситуациях может благотворно сказываться на безошибочности человека -оператора.

И все же обычно удается прийти к взаимоприемлемым предположениям относительно поведения моделируемого объекта, определиться с концептуальной моделью и приступить к ее оформлению в виде какой-либо семантической модели. В случае моделирования аварийности и травматизма данное явление может быть интерпретировано в виде явления, декомпозируемого на потоки случайных событий - аварий и несчастных случаев. При этом каждое из них считается результатом возникновения совокупности других событий, образующих причинную цепь, вследствие которой и появляется конкретное происшествие.

В ряде случаев на этом данный этап не завершается, а полученные на нем результаты могут оформляться в более формализованной форме. Например, только что рассмотренное для примера явление удобно представлять не только в словесной форме, но и в виде каких-либо схематических рисунков, увязывающих отдельные предпосылки в причинную цепь, а случайные происшествия – в соответствующие потоки событий. Логично предположить, что оформление результатов концептуального моделирования в форме по-

добных причинно-следственных диаграмм, является документально оформленным результатом, пригодным для контроля и предварительного анализа.

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

Проверке подлежат все принятые ранее гипотезы и другие исходные предположения, касающиеся поведения моделируемого объекта. Особое внимание при этом уделяется контролю состава и способов описания тех его факторов, которые приняты существенными, т. е. подлежащими учету в моделях, а также свойств и параметров объекта, исключенных из последующего рассмотрения как второстепенные. Для принятия соответствующих решений здесь используются объективно действующие законы, включая и упомянутые выше уравнения баланса, и другие определяющие соотношения.

Если в ходе предыдущего этапа концептуальная модель была оформлена в Виде каких-либо наглядных рисунков или смысловых диаграмм, то и они подлежат пристальному исследованию. Его цель - проверка строгости определения и обозначения учитываемых там категорий, выявление других возможных недочетов и погрешностей. Что касается диаграммы причинно – следственных связей, то наиболее распространенными *ошибками* в их изображении являются ее недостающие или избыточные элементы, а так же излишне произвольная трактовка учитываемых там событий и связей между ними.

Иногда на данном этапе моделирования уже могут быть получены те дополнительные сведения об объекте-оригинале, ради которых он подвергается моделированию. Особенно часто это удается сделать в результате качественного анализа смысловых диаграмм, позволяющих учесть и изобразить на бумаге или экране компьютера такое количество существенных факторов, которым невозможно мысленно манипулировать одновременно.

Особенно актуально применение подобных диаграмм при моделировании опасных процессов в техносфере. Например, среди изображенных таким образом десятков факторов, реально влияющих на аварийность и травматизм, могут быть выявлены их сочетания, включающие в себя малое число факторов, появление и отсутствие которых необходимо и достаточно соответственно для возникновения и недопущения конкретных происшествий.

*Этап 4.* После завершения проверки концептуальной постановки задачи и

предварительного анализа соответствующей семантической модели рабочая группа приступает к построению математической модели, а затем к выбору наиболее подходящего метода ее исследования. Наиболее предпочтительной считается аналитическая постановка и такое же решение моделируемой задачи, поскольку в этом случае используется арсенал математического анализа, включая оптимизацию. Чаще всего оператором  $A: X$  у здесь служат системы алгебраических уравнений, для получения которых применяются различные методы аппроксимации имеющихся статистических данных.

Особая ценность аналитического моделирования заключается в возможности точного решения поставленной задачи, в том числе нахождения оптимальных (наилучших в каком-то смысле) результатов. Вместе с тем область использования аналитических методов ограничена размерностью учитываемых факторов и зависит от уровня развития соответствующих разделов математики. Поэтому для создания математических моделей сложных систем и процессов (как в техносфере, например) требуются уже алгоритмические модели, которые могут давать лишь приближенные решения.

Степень приближения результатов, например, численного и имитационного моделирования зависит от *погрешностей*, обусловленных преобразованием исходных математических соотношений в численные или имитационные алгоритмы, а также от ошибок округления, возникающих при выполнении любых расчетов на электронно-вычислительной технике в связи с конечной точностью представления чисел в ее памяти. Вот почему основным требованием к каждому такому алгоритму служит необходимость получения решения исходной задачи за конечное число шагов с заданной точностью.

Говоря об особенностях только что пере численных алгоритмических моделей, отметим лишь следующее. В случае применения *численного* метода совокупность исходных математических соотношений заменяется конечномерным аналогом, обычно получаемым в результате замены функций непрерывных аргументов на функции дискретных параметров. После такой дискретизации составляется вычислительный алгоритм, который представляет собой последовательность арифметических и логических действий, позволяющих за конечное число шагов получить решение дискретной задачи.

А вот при *имитационном* моделировании, дискретизации подвергаются не математические соотношения, как в предыдущем случае, а сам объект исследования, который разбивается на отдельные компоненты. Кроме того, здесь не записывается совокупность математических соотношений, описывающих поведение всего объекта-оригинала. Вместо этого обычно составляется алгоритм, моделирующий функционирование моделируемого объекта с помощью аналитических или алгебраических моделей.

Следует заметить, что использование математической модели, построенной с применением алгоритмических методов, аналогично



проведению экспериментов с реальным объектом, только вместо натурального эксперимента с объектом проводится машинный (вычислительный) эксперимент с его моделью. Именно это обстоятельство наряду с бурным развитием цифровой техники и вычислительной математики сделало рассмотренные здесь алгоритмические модели и методы исследования наиболее перспективными. Конечно же, и они имеют ограничения, связанные с невозможностью получения результатов решения в аналитической форме, а также с ограниченной пока мощностью и быстродействием компьютеров.

Что касается *контроля* правильности математических соотношений, то он достигается выполнением следующих обязательных проверок:

а) контроль размерностей, включающий правило, согласно которому приравняться, складываться, перемножаться и делиться могут только величины одинаковой размерности. При переходе же к вычислениям он дополняется требованием соблюдения одной и той же системы единиц для значений всех параметров;

б) проверка порядков, состоящая в сравнении порядков складываемых или вычитаемых величин и исключении из математических соотношений малозначимых параметров;

в) контроль характера зависимостей, предполагающий, что направление и скорость изменения выходных параметров модели должны быть такими, как это следует из физического смысла изучаемых процессов;

г) проверка экстремальных ситуаций, которая осуществляется наблюдением за выходными результатами модели после приближения ее параметров к предельно допустимым для них значениям, делающим математические соотношения более простыми и наглядными;

д) контроль физического смысла, связанный с установлением физического смысла результата и проверкой его неизменности при варьировании параметров модели от исходных до промежуточных и граничных значений;

е) проверка математической замкнутости, состоящая в выявлении и принципиальной возможности решения системы математических соотношений и получения на ее основе однозначно интерпретируемого результата.

Поясним, что математически замкнутой или «корректно поставленной задачей» принято считать такую ее постановку, при которой малым изменениям непрерывно меняющихся исходных данных соответствуют такие же незначительные изменения выходных результатов. При неудовлетворении этого условия применение численных алгоритмов не допустимо.

*Этап 5.* Для облегчения или ускорения моделирования сложных процессов, происходящих в техносфере, рабочей группе обычно требуется использовать электронно-вычислительную технику. В свою очередь, это указывает на потребность в соответствующих алгоритмах и компьютерных программах. Несмотря на наличие в настоящее время богатого арсенала математических алгоритмов и прикладных программ, нередко возникает необходимость в самостоятельной разработке новых.

Специалисты, разрабатывающие надежное программное обеспечение, сталкиваются с задачей, не уступающей по сложности предыдущим этапам моделирования. Ее успешное решение возможно лишь при уверенном владении современными алгоритмическими языками и технологиями программирования, знании возможностей нынешней вычислительной математики и техники, наличии соответствующего опыта. Сам же процесс создания компьютерных программ может быть разбит на ряд таких этапов: разработка технического задания, проектирование структуры программ, кодирование алгоритмов, их тестирование и отладка.

При этом соответствующее техзадание обычно оформляется в виде спецификации, включающей разделы: а) название задачи имя компьютерного кода, система программирования, требования к аппаратному обеспечению; б) описание - содержательная и математическая постановка задачи, метод дискретизации или обработки входных данных; в) управление режимами – интерфейс «пользователь-компьютер»; г) входные данные - содержание параметров, пределы их изменения; д) выходные данные - содержание, объем, точность и форма представления; е) ошибки - возможный перечень, способы выявления и защиты; ж) тестовые задачи - примеры, предназначенные для тестирования и отладки программного комплекса.

Общая же структура компьютерного кода, как правило, содержит три части - препроцессор (подготовка и проверка исходных данных), процессор (реализация вычислительного эксперимента) и постпроцессор (отображение полученного результата). Что касается трудоемкости создания надежных, обладающих Дружественным интерфейсом, легко модифицируемых и хорошо сопровождаемых программных комплексов, то она может оцениваться несколькими годами труда высококвалифицированных специалистов.

*Этап 6.* Предполагается, что системное исследование включает в себя качественный и количественный этапы. Предназначение первого - выявление общих закономерностей, связанных с функционированием моделируемого объекта. *Качественный* анализ модели и проверка адекватности полученных с ее помощью результатов осуществляется рабочей группой, иногда с привлечением представителей заказчика. Цель же *количественного* анализа достигается решением таких двух задач: а) прогнозирование соответствующих характеристик моделируемого объекта; б) априорная оценка эффективности различных стратегий его совершенствования. Для сложных объектов вторая задача считается приоритетной в силу затруднительности, а в ряде случаев - и принципиальной невозможности (см. разд. 1.2) точного количественного прогноза интегральных показателей.

Процедура количественного анализа зависит от вида полученной математической модели. Для сравнительно простых аналитических соотношений она проводится преимущественно вручную, с использованием инструментариев математического анализа и исследования операций. Тогда как анализ не поддающихся этому, т. е. довольно сложных или громоздких

моделей, реализуется на электронной вычислительной технике с помощью подобранных либо специально разработанных численных и имитационных алгоритмов.

Решение упомянутых выше двух задач количественного анализа осуществляется путем проведения соответствующих расчетов при реальных или предполагаемых значениях учитываемых Параметров моделируемого объекта. В отличие от первой задачи, предполагающей проведение одного ручного или машинного счета, при оценке эффективности различных стратегий уже требуется несколько вычислительных экспериментов. При этом каждый из них отличается значениями исходных параметров модели, целенаправленное изменение которых ожидается от внедрения каких либо мероприятий, направленных, например, на улучшение компонентов человеко-машинных систем.

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

Следует различать качественное и количественное согласие результатов сравнения. В первом случае достаточно лишь совпадения некоторых характерных особенностей в распределении оцененных параметров, например их знаков, тенденций изменения, наличия экстремальных точек и т.д. Если эти требования соблюдаются, то уместно оценить совпадение и на количественном уровне. При этом для моделей с оценочными функциями оно может оцениваться расхождением в 10-15 %, а для используемых в управляющих и контролирующих системах - в 1- 2 % и ниже [9].

Наиболее типичными причинами неадекватности результатов моделирования обычно являются следующие: а) значения параметров модели не соответствуют области, определяемой принятой системой гипотез; б) выбранная совокупность гипотез верна, но константы и параметры в использованных моделью определяющих соотношениях установлены неточно; в) вся исходная совокупность принятых гипотез не применима для изучаемого объекта или условий его функционирования. Для устранения этих и подобных причин требуется проведение дополнительных исследований, как объекта-оригинала, так и самой модели.

Если полученная модель оказывается неадекватной в интересующей заказчика области параметров, то следует уточнить значения ее констант и исходных параметров. Если же и в этом случае не удастся получить положительных результатов, то единственной возможностью улучшения

модели остается изменение принятых гипотез. Данное решение фактически означает возвращение ко второму и последующим этапам разработки модели, на что указывают стрелки рис. 2.2, выходящие из его нижних блоков и направленные к верхним.

Завершая рассмотрение обобщенной процедуры моделирования, хотелось бы предостеречь о недопустимости игнорирования ее последнего этапа, поскольку это может привести к огромным издержкам. Ведь не исключено, что при решении реальной задачи с помощью не проверенной должным образом модели могут быть получены и правдоподобные результаты. Однако в других случаях модель будет давать качественно неверные результаты, но их причины разработчики станут искать уже не в модели.

В заключение проиллюстрируем работоспособность предложенной выше обобщенной структуры на примере моделирования аварийности и травматизма в техносфере.

### *1. Содержательная постановка задачи*

1.1. Разработать комплекс смысловых и знаковых моделей, позволяющих установить основные закономерности возникновения техногенных происшествий и количественно оценить меру возможности их появления -  $Q(\tau)$ .

1.2. Модели должны: а) выявлять условия появления и предупреждения происшествий; б) вычислять вероятность их появления.

1.3. Исходные данные: параметры производственного объекта Ч (человека), М (машины) и С (среды), проводимых на нем технологических процессов - Т, а также статистические данные по состоянию этих компонентов и их аналогов.

### *2. Концептуальная постановка задачи*

2.1. Исходные гипотезы и предпосылки относительно моделируемого явления:

а) аварийность и травматизм на производстве могут быть описаны в соответствии с канонами теории случайных процессов в сложных системах;

б) объектом моделирования должен быть случайный процесс, возникающий на производственном объекте и завершающийся появлением происшествий (аварий или несчастных случаев);

в) поток таких происшествий допустимо считать простейшим, т. е. удовлетворяющим условиям стационарности, ординарности и отсутствия последствия;

г) каждое происшествие может возникать при выполнении конкретных технологических операций, из-за случайно возникших ошибок персонала, отказов техники и нерасчетных для них внешних воздействий.

2.2. С учетом вышеизложенного можно сформулировать концептуальную постановку задачи моделирования следующим образом:

а) представить аварийность и травматизм в виде процесса просеивания потока заявок  $\omega(t)$  на конкретные технологические операции в выходной поток случайных происшествий с вероятностью  $Q(t)$  их появления в момент

времени  $t$ ;

б) изобразить данный процесс в виде потокового графа, интерпретирующего возникновение причинной цепи происшествя из отдельных предпосылок.

### 3. Проверка и качественный анализ семантической модели

3.1. Проверить обоснованность гипотез относительно природы потоков моделируемых событий и необходимости учета факторов внешней среды:

а) возможность представления простейшим потоком также и входного потока требований на проведение технологических операций;

б) правомерность допущения о несущественности предпосылок к происшествию, обусловленных неблагоприятными внешними воздействиями

3.2. Провести качественный анализ потоков ого графа с целью ответа на следующие вопросы:

а) какие производственные процессы можно считать относительно «безопасными»?

б) какое технологическое и производственное оборудование следует рассматривать более «безопасным» в эксплуатации?

### 4. Математическая постановка и выбор метода решения задачи

4.1. Сформулировать задачу моделирования в виде системы алгебраических уравнений и проверить корректность математических соотношений, полученных каким-либо образом:

а) с учетом гипотезы о простейшем характере потока требований на выполнение технологических операций использовать свойство его инвариантности после разрежения за счет исключения событий для получения зависимостей  $Q(T)=f[Q(t), \omega(t), \tau]$ ;  $Q(t) = v(Ч, М, С, Т, t)$ ;

б) в противном случае получить эти же математические соотношения путем составления топологического уравнения С. Мэсона [32] после искусственного замыкания выхода потокового графа с его входом.

4.2. Разработать процедуру априорной оценки каждого из параметров аналитической модели и проверить корректность всех полученных математических соотношений с применением всех соответствующих правил.

Таким образом, в данной главе удалось не только сформулировать основные этапы обобщенной структуры моделирования сложных техносферных объектов, но и проиллюстрировать ее работоспособность на отдельном примере. Реализация же всего предложенного в этой главе исследовательского инструментария в практике системного анализа и моделирования интересующих нас процессов может способствовать совершенствованию безопасности техносферы в целом. Некоторые подходы к решению связанных с этим конкретных задач излагаются в следующих трех разделах учебника.

### Контрольные вопросы

1. Что такое модель и каково предназначение моделирования?
2. Укажите главные виды моделей и методов моделирования.

3. Назовите отличительные признаки материальных и идеальных моделей.
4. В чем отличие между когнитивной и содержательной моделями?
5. Чем отличаются между собой смысловые и знаковые модели?
6. Какова цель дескриптивного, нормативного и ситуационного моделирования?
7. Какое моделирование называется математическим?
8. По каким признакам классифицируются математические модели?
9. В чем состоит основная ценность аналитических моделей?
10. Перечислите причины и способы описания неопределенности моделей.
11. Когда необходимо применять методы приближенного моделирования?
12. Кто участвует в разработке содержательной постановки задачи?
13. На основании какой информации формулируется концептуальная (семантическая) модель объекта-оригинала?
14. Какие функции выполняет постановщик задачи?
15. Укажите, какая из постановок задач (содержательная, концептуальная, математическая) является наиболее формализованной.
16. Что понимается под математической замкнутостью и корректностью математических соотношений?
17. Моделирование каких объектов чаще всего проводится приближенными методами - численным или имитационными?
18. Назовите основные погрешности приближенных методов моделирования.
19. Укажите главные способы проверки корректности математических моделей.
20. Какие задачи решаются в ходе количественного анализа модели?
21. Перечислите вероятные причины возможной неадекватности модели.