

## Оглавление

Глава 1. Моделирование как универсальный подход изучения явлений и задач механики .....	4
Глава 2. Основы анализа размерностей и теории подобия .....	14
Глава 3. Применение теории подобия и анализа размерностей к моделированию задач механики .....	23
Глава 4. Экспериментальные методы моделирования.....	35
Глава 5. Применение экспериментальных методов к решению инженерных задач .....	41
Глава 6. Численное моделирование инженерных задач .....	48
Глава 7. Комплексный расчетно-экспериментальный подход к решению инженерных задач .....	53
Библиографический список .....	58
Приложение. Рекомендации к выполнению курсовой работы .....	59

## Глава 1

# МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПОДХОД ИЗУЧЕНИЯ ЯВЛЕНИЙ И ЗАДАЧ МЕХАНИКИ

В процессе осуществления профессиональной, научно-исследовательской образовательной деятельности людям приходится сталкиваться с необходимостью решать задачи, различающиеся по своей сути и оттого подразделяющиеся на *вычислительные* и *функциональные*. В ходе реализации таких процессов, как проектирование или управление, возникают *функциональные* задачи, требующие решения. Так, например, к ним относятся составление сетевого графика строительства, управление деятельностью научной лаборатории, проектирование здания. *Вычислительные* же задачи возникают, когда необходимо провести расчет характеристик и параметров исследуемого объекта, а также обработать сопряженные массивы данных.

Одним из методов исследования реальных объектов (таких как процесс, система, явление) является *моделирование*, суть которого заключена в использовании моделей как замещающих аналогов для исследуемых объектов. В свою очередь, *модель* представляет собой объект, способный заместить реальный объект в процессе исследования и сохраняющий все его значимые свойства. Исходный объект, свойства которого проецируются на модель, называется *прототипом*, или *оригиналом*.

Моделирование может быть осуществлено по отношению не только к материальным объектам, но и к различного рода процессам. Так, для воспроизведения на земле условий полета летательных аппаратов инженеры используют аэродинамическую трубу.

Модель не является точной копией реального объекта, а отражает лишь его существенные свойства, необходимые для корректного функционирования.

Ключевым в моделировании является понятие цели. Именно цель определяет, какие из свойств объекта должны быть сохранены в модели.

Моделирование используется в тех случаях, когда изучение реального объекта затруднительно или невозможно. Реальный объект может быть слишком большим (галактика) или слишком маленьким (элементарная частица), слишком быстрым (молния) или слишком медленным (движение тектонических плит), опасным (ядерная реакция); в ходе исследования объект может быть разрушен (исследование объекта на прочность).

Модель объекта может быть выполнена в множестве различных вариантов. Какому из этих вариантов отдавать предпочтение в ходе исследования – зависит от цели моделирования, тесно связанной с решаемыми задачами.

И наоборот, различные объекты могут быть отражены в одной модели. Так, накопленный в бионике опыт моделирования имеет практическое значение не только для медицины, но и для физики, экономики, техники. Например, модели суставов могут применяться в проектировании элементов машин и механизмов.

«Существует ряд общих требований к свойствам, которым должны удовлетворять модели:

- **адекватность** — достаточно точное отображение свойств объекта;
- **конечность** — модель отображает оригинал лишь в конечном числе его отношений и свойств;
- **полнота (информативность)** — предоставление исследователю всей необходимой информации об объекте в рамках гипотез, принятых при построении модели;
- **упрощенность** — модель отображает только существенные стороны объекта;
- **гибкость** — возможность воспроизведения различных ситуаций во всем диапазоне изменения условий и параметров;
- приемлемая для имеющегося времени и программных средств **трудоемкость** разработки модели» [1].

## Классификация моделей

### Классификация по области использования

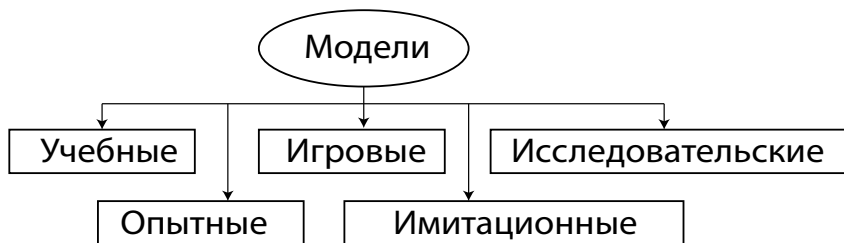


Рис. 1.1. Классификация моделей по области использования

*Учебные модели* — наглядные пособия, тренажеры, обучающие программы.

*Игровые модели* — это экономические, военные, деловые игры. Они как бы репетируют поведение объекта в различных ситуациях.

*Исследовательские модели* создаются для исследования процессов или явлений, например, стенды для проверки электронной аппаратуры.

*Опытные модели* — это копии объектов, взятые в приемлемом для исследования масштабе (увеличенные или уменьшенные). Их используют для изучения объекта и прогнозирования его будущих характеристик (например, опытная модель проектируемого корабля).

*Имитационные модели* имитируют реальность, при этом, как правило, эксперимент многократно повторяется.

**Классификация по отрасли представленных в модели знаний** разделяет все модели на *физические, биологические, социальные, экономические* и т.д.

**Классификация по способу представления модели.** Существуют различные методы, которыми можно спроецировать свойства объекта на модель. Свойства можно продублировать в *натурной (материальной)* модели. В натуральных моделях, взятых в необходимом масштабе, могут быть отражены внешний вид объекта (глобус), структура (модель молекулы) или его поведение (модель моста).

Можно построить модель объекта, описав его свойства на одном из языков кодирования информации — дать словесное описание, привести формулу, чертеж, рисунок. Такая модель называется *информационной*. Замена реального объекта его формальным описанием, т.е. его информационной моделью, называется *формализацией*. Существуют разные формы представления информационных моделей: словесные (вербальные), графические, математические, табличные и др. (рис. 1.2).

*Вербальная* — информационная модель в мысленной или разговорной форме.

*Знаковая* — информационная модель, выраженная знаками, т.е. средствами любого формального языка.

*Математическая* — модель, представленная с помощью математических формул.

*Логическая* — это модель, в которой представлены различные варианты выбора действий на основе умозаключений и анализа условий.

*Специальные модели* — это, например, химические формулы, ноты и т.д.

*Геометрическая* — модель, представленная с помощью графических форм (граф, блок-схема алгоритма решения задачи, диаграмма).

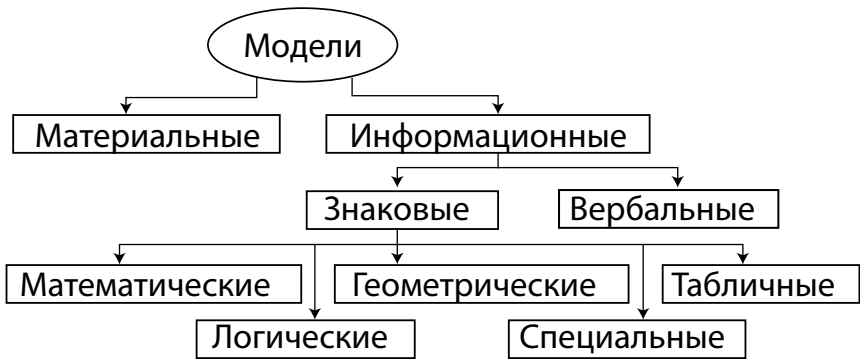


Рис. 1.2. Классификация моделей по способу представления

*Граф* — это множество *вершин* и множество *ребер*, соединяющих между собой все или часть этих вершин. На рис. 1.3, *а* показана геометрическая модель в виде графа, представляющая схему дорог, соединяющих населенные пункты. В вершинах графа расположены населенные пункты, а соединяющие их ребра символизируют дороги между ними. Данная модель отражает взаимосвязи между городами. С ее помощью можно построить маршрут, которому можно следовать, чтобы добраться из одного города в другой (из *A* в *B*). Однако узнать расстояние от одного пункта до другого эта модель не поможет. Для этой цели можно составить модель в виде взвешенного графа, каждое ребро которого маркируется числом, соответствующим расстоянию между соединяемыми им населенными пунктами (рис. 1.3, *б*).

*Табличная модель* — это информация о моделируемом объекте, структурированная в виде таблицы.

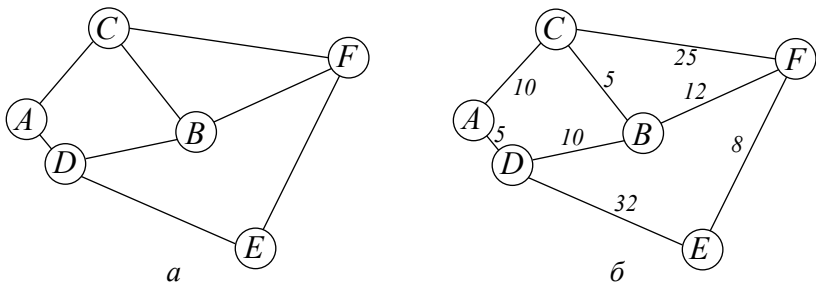


Рис. 1.3. Модель в виде графа

**Классификация по характеру отображаемых свойств объекта моделирования.** По характеру отображаемых свойств выделяют два типа моделей:

- **структурные** — отражают структуру (устройство) моделируемого объекта, существенные для целей исследования свойства и взаимосвязи компонентов этого объекта;
- **функциональные** — отражают внешне воспринимаемое поведение (функционирование) объекта.

Функциональные модели часто строятся как *модели черного ящика*. В такой модели задаются только входные и выходные связи моделируемого объекта со средой. Название «черный ящик» образно подчеркивает отсутствие сведений о внутреннем содержании объекта.

Наряду с моделью черного ящика по степени информированности исследователя о моделируемом объекте, выделяют еще два вида моделей:

- **«белый ящик»** — известно все о внутреннем содержании объекта;
- **«серый ящик»** — известна структура объекта, неизвестны количественные значения параметров.

**Классификация с учетом фактора времени.** С учетом фактора времени модели можно разделить на два класса:

- **статические** — это одномоментно снятые массивы информации об объекте;
- **динамические** модели позволяют увидеть изменения объекта, протекающие во времени.

Например, массивы данных с датчиков, устанавливаемых на ответственных зданиях и сооружениях для мониторинга состояния конструкций в ходе эксплуатации, отражают изменение состояния конструкций за некоторый период времени (динамическая модель), а расчет конструкций, производимый в ходе проектирования здания, дает одномоментную информацию об идеализированном объекте (статическая модель).

**Классификация по признаку причинной обусловленности** выполняется в зависимости от возможности или невозможности учета в рассматриваемой модели одного или нескольких случайных факторов, при этом выделяют два вида моделей:

- **детерминированные** — модели, в которых все воздействия и факторы определены и известны заранее;
- **стохастические (вероятностные)** — модели, в которых хотя бы один из факторов носит случайный характер.

По способу реализации информационные модели делятся на компьютерные и некомпьютерные. *Компьютерная модель* — модель, реализованная с помощью программных средств на компьютере. Программное обеспечение, средствами которого может осуществляться компьютерное моделирование, может быть, как универсальным (например, текстовые или табличные процессоры), так и специализированным, предназначенным лишь для определенного вида моделирования.

### Основные этапы моделирования

Построению модели реального объекта предшествуют *системный анализ*, заключающийся в выделении составных элементов модели и связей между ними, и *формализация информации* — отображение полученной структуры в некую заранее определенную исследователем форму.

«*Формализация — это процесс выделения и перевода внутренней структуры предмета, явления или процесса в определенную информационную структуру — форму*» [2].

### Этапы моделирования

Для реализации любого проекта необходимо представлять отправную точку, а также набор и очередность действий, приводящих к желаемому результату. В контексте моделирования отправной точкой будет являться прототип, которым может быть объект (существующий или проектируемый) или процесс. Результатом — принятие решения на основе полученных знаний об объекте.

Принципиальная схема процесса исследования посредством моделирования изображена на рис. 1.4.

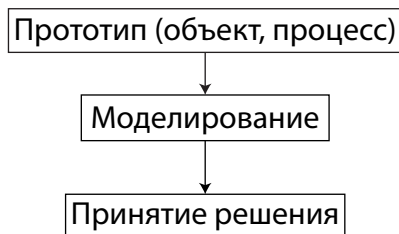


Рис. 1.4. Процесс исследования посредством моделирования

В качестве примера можно привести главу из обширной истории науки о сопротивлении материалов об исследованиях, проведенных А. Вёлером по усталостной прочности металлов.

В середине XIX века в Европе существовала проблема высокой аварийности на железных дорогах, состоявшая в поломках осей подвижных составов. Для ее решения Вёлер провел ряд экспериментальных исследований, в которых использовал приборы для измерения прогибов и углов закручивания вагонных осей в условиях эксплуатации, а также для измерения прочности в условиях знакопеременного напряженного состояния. Для фундаментального изучения усталости материалов нужно было проводить большое количество испытаний, поэтому Вёлер перешел от испытаний с настоящими осями составов к натурным моделям, выполненным в меньшем масштабе. Уменьшенный образец было возможно подвергать большому числу циклов напряжения, и путем сопоставления экспериментальных данных для двух образцов, нагружаемых циклически силами разной величины, Вёлер смог получить данные для вывода заключений о прочности испытываемых им материалов.

Результатом его исследований стали технические условия на материалы, использовавшиеся на железных дорогах, а также создание методик испытания материалов.

С научной работы Вёлера началось изучение усталости материалов. Все измерительные инструменты и установки создавались им самостоятельно и в настоящий момент являются экспонатами Музея германской техники в Мюнхене.

Процесс моделирования объекта или явления активно задействует творческий потенциал исследователя, поэтому формализовать этот процесс практически невозможно. Однако можно в общем случае выделить его этапы (рис. 1.5).

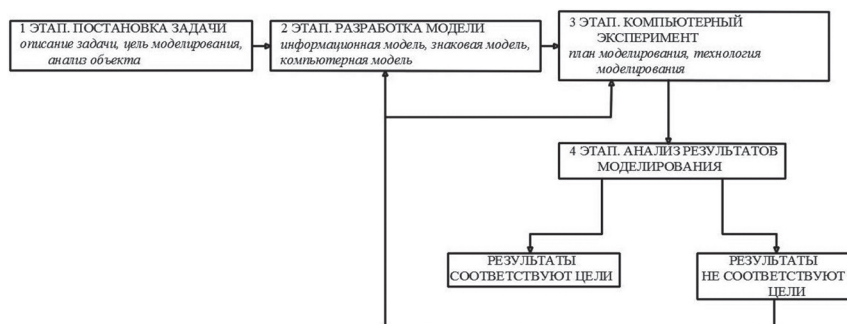


Рис. 1.5. Этапы моделирования



Данная структура является условной. И, как было сказано ранее, частные алгоритмы разрабатываются с опорой на цели и задачи, ставящиеся исследователем: блоки могут быть упразднены, усовершенствованы, убраны или добавлены.

## I Этап. Постановка задачи

На первом этапе исследователь обозначает проблему, которая требует решения. Происходит накопление информации об исследуемом объекте или процессе, ставятся цели моделирования, описываются задачи.

### **Цель моделирования**

#### *1) Познание окружающего мира*

Тысячелетиями люди создают модели и передают накопленные знания из поколения в поколение. «Модели позволяют понять, как устроен конкретный объект, узнать его основные свойства, установить законы его развития и взаимодействия с окружающим миром моделей».

*2) Создание объектов с заданными свойствами* (определяется постановкой задачи «как сделать, чтобы...» [3]).

Чтобы облегчить тяжелые или рутинные процессы, люди создают объекты и разрабатывают алгоритмы действий с требуемыми свойствами. Башенный кран, лифт, двигатель — идеи многих великих изобретений, к которым мы с вами давно привыкли, были придуманы как ответ на вопрос: «Можно ли сделать это быстрее/дешевле/качественнее?»

*3) Определение последствий воздействия на объект и принятие правильного решения.* Цель моделирования задач типа «что будет, если...» (что будет, если возникнет необходимость совершить посадку проектируемого самолета на воду, или что произойдет, если уменьшить ширину поперечного сечения балки вдвое?)

#### *4) Эффективность управления объектом (или процессом).*

Критерии управления могут быть весьма многочисленными и противоречивыми, поэтому оно окажется эффективным в случае, если будет достигнут определенный баланс.

В качестве примера можно привести процесс архитектурного проектирования здания. Разрабатываемое решение должно быть функциональным, экономичным, реализуемым с точки зрения строительных конструкций, материалов и технологий возведения; должно вписываться в существующую культурную ткань города, но и быть современным и т.д. Построение моделей нескольких проектных решений и их сравнительный анализ помогает в выборе наиболее оптимального варианта проекта.

## Анализ объекта

На этом этапе четко выделяют моделируемый объект и его основные свойства, из чего он состоит, какие существуют связи между ними.

Если, к примеру, нам нужно создать модель автомобильной эстакады, мы должны собрать сведения по рельефу, на котором будет располагаться объект, определиться с геометрией дорожного полотна в плане и высотными отметками, ознакомиться с типами опор для мостов и со всей необходимой нормативной документацией.

## II Этап. Разработка модели

### 1. Информационная модель

«На этом этапе выясняются свойства, состояния, действия и другие характеристики элементарных объектов в любой форме: устно, в виде схем, таблиц. Формируется представление об элементарных объектах, составляющих исходный объект, т.е. *информационная модель*» [2].

Разберем процесс создания информационной модели на примере. В каталоге железобетонных строительных конструкций предприятия вам нужно найти элементы по их свойствам: плита типа ПК длиной 1580 мм, шириной 990 мм. Для того чтобы вставить элемент в предварительную разбивку пола этажа по плитам, этой информации будет достаточно. В случае же решения задачи конструирования список свойств элемента нужно будет уточнить и дополнить.

*«Этот пример показывает, что информации не обязательно должно быть много. Важно, чтобы она была «по существу вопроса», т.е. соответствовала цели, для которой используется»* [2].

Продолжая аналогию с плитами, в отличие от инженера-конструктора, водителю грузового автомобиля, доставляющему выбранные плиты на стройку, будет достаточно знать артикул плит и их количество. В перечисленных информационных моделях мы пренебрегли такими несущественными свойствами плит, как их запах, цвет, номер смены, в которую она была изготовлена.

Таким образом, информационная модель никогда не дает исчерпывающей характеристики объекту. Для одного и того же объекта можно построить различные информационные модели.

В качестве другого примера можно предложить различные информационные модели, составленные для здания Президиума РАН на Ленинском проспекте в Москве. Так, например, историк архитектуры обозначит это здание как «комплекс сооружений в стиле модернизма, относящийся к проектам 70-х годов прошлого века, архитектор — Ю.П. Платонов; является высотной доминантой юго-западного района Москвы...»; для спе-

циалиста, занимающегося навигацией, информационная модель примет вид: «Ленинский проспект 32а, Гагаринский район, Москва, телефон, сайт организации, расстояние от метро Ленинский проспект — 800 м...».

*Выбор наиболее существенной информации при создании информационной модели и ее сложность обусловлены целью моделирования.*

## 2. Знаковая модель

«Прежде чем приступить к процессу моделирования, человек делает предварительные наброски чертежей либо схем на бумаге, выводит расчетные формулы, т.е. составляет информационную модель в той или иной *знаковой форме*, которая может быть *либо компьютерной, либо некомпьютерной*» [2].

### III Этап. Компьютерный эксперимент

Чтобы дать жизнь новым конструкторским разработкам, внедрить новые технические решения в производство или проверить новые идеи, нужен эксперимент. В недалеком прошлом такой эксперимент можно было провести либо в лабораторных условиях на специально создаваемых для него установках, либо на натуре, т.е. на настоящем образце изделия, подвергая его всяческим испытаниям.

С развитием вычислительной техники появился новый уникальный метод исследования — *компьютерный эксперимент*, который включает последовательность работы с моделью, совокупность целенаправленных действий пользователя над компьютерной моделью.

### IV Этап. Анализ результатов моделирования

*Конечная цель моделирования* — принятие решения, которое должно быть выработано на основе всестороннего анализа полученных результатов. На этом этапе решается, продолжаете вы исследование либо заканчиваете. Возможно, вам известен ожидаемый результат, тогда необходимо сравнить полученный и ожидаемый результаты. В случае совпадения вы сможете принять решение.

*Основой для выработки решения служат результаты тестирования и экспериментов. Если результаты не соответствуют целям поставленной задачи, значит, допущены ошибки на предыдущих этапах. Если ошибки выявлены, то требуется корректировка модели, т.е. возврат к одному из предыдущих этапов. Процесс повторяется до тех пор, пока результаты эксперимента не будут отвечать целям моделирования.*

## Глава 2

# ОСНОВЫ АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ И ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

В ходе изучения объектов и процессов обычно вводятся понятия, способные характеризовать их количественно: ускорение, энергия, момент силы и проч. А задачи, решаемые в процессе, состоят в нахождении численных значений величин, стоящих за этими понятиями, а также функциональных зависимостей между ними. Однако для сложных процессов, попадающих в поле научного интереса, бывает крайне сложно найти эти функции и составить математическую модель. В этих случаях составление законов, описывающих изучаемые процессы, начинается с экспериментов.

Для проведения такого эксперимента, результаты которого были бы справедливы, и для более общих случаев, в которых эксперимент не производился, необходимо вникать в суть исследуемого процесса. Возможность предварительно осуществлять такой качественно-теоретический анализ заложена в *теории размерности и подобия*.

Теория размерности является инструментом, к помощи которого мы прибегнем, рассматривая теорию подобия. Последняя, в свою очередь, лежит в основе моделирования сложных объектов и процессов.

В теории размерности важными являются *понятия размерных и безразмерных величин*. Интуитивно понятно, что размерными называются такие величины, численное значение которых зависит от используемых единиц измерения, а безразмерными — значение которых от них не зависит.

Между физическими величинами существуют определенные соотношения, и, взяв набор из 3 величин и поставив им в соответствие единицы измерения, можно некоторым образом выразить и единицы измерения всех остальных величин. Набор из произвольно выбранных единиц называют основным, а единицы, выражаемые через основные, — *производные*.

Например, можно принять основным набор единиц измерения длины, массы и времени. Их можно обозначить либо латинским символом ( $L$  — *length*,  $M$  — *mass*,  $T$  — *time*), либо привычным кириллическим обозначением единиц измерения (м — метр, кг — килограмм, с — секунда).

Производные величины связаны с основными посредством формулы размерности, которая имеет вид степенного одночлена. В общем

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)