

Лекция 1. Введение в моделирование

Моделирование (**М**) по определению есть исследование объектов познания на их моделях; построение и изучение моделей реально существующих предметов и явлений (живых и неживых систем, инженерных конструкций, разнообразных процессов – физических, химических, биологических, социальных) и конструируемых объектов (для определения, уточнения их характеристик, рационализации способов их построения и т. п.).

М. как познавательный прием неотделимо от развития знания. По существу, **М.** как форма отражения действительности зарождается в античную эпоху одновременно с возникновением научного познания. Однако в отчетливой форме (хотя без употребления самого термина) **М.** начинает широко использоваться в эпоху Возрождения; Брунеллески, Микеланджело и другие итальянские архитекторы и скульпторы пользовались моделями проектируемых ими сооружений; в теоретических же работах Г. Галилея и Леонардо да Винчи модели не только используются, но и выясняются пределы применимости метода. И. Ньютон пользуется этим методом уже вполне осознанно, а в 19–20 вв. трудно назвать область науки или ее приложений, где **М.** не имело бы существенного значения. Исключительную методологическую роль сыграли в этом отношении работы Кельвина, Дж. Максвелла, Ф. А. Кекуле, А. М. Бутлерова и других физиков и химиков. Именно эти науки стали, можно сказать, классическими "полигонами" методов **М.** Появление же первых электронных вычислительных машин (Дж. Нейман, 1947) и формулирование основных принципов кибернетики (Н. Винер, 1948) привели к поистине универсальной значимости новых методов – как в абстрактных областях знания, так и в их приложениях. **М.** ныне приобрело общенаучный характер и применяется в исследованиях живой и неживой природы, в науках о человеке и обществе (см. Модели в биологии, Модели в экономике, Модели в языкознании, Ядерные модели).

Единая классификация видов **М.** затруднительна в силу многозначности понятия "модель" в науке и технике. Ее можно проводить по различным основаниям: по характеру моделей (т. е. по средствам **М.**); по характеру моделируемых объектов; по сферам приложения **М.** (**М.** в технике, в физических науках, в химии, **М.** процессов живого, **М.** психики и т. п.) и его уровням ("глубине"), начиная, например, с выделения в физике **М.** на микроуровне (**М.** на уровнях исследования, касающихся элементарных частиц, атомов, молекул). В связи с этим любая классификация методов **М.** обречена на неполноту, тем более, что терминология в этой области опирается не столько на "строгие" правила, сколько на языковые, научные и практические традиции, а еще чаще определяется в рамках конкретного контекста и вне его никакого стандартного значения не имеет (типичный пример – термин "кибернетическое" **М.**).

Предметным называется **М.**, в ходе которого исследование ведется на модели, воспроизводящей основные геометрические, физические, динамические и функциональные характеристики "оригинала". На таких моделях изучаются процессы, происходящие в оригинале – объекте исследования или разработки (изучение на моделях свойств строительных конструкций, различных механизмов, транспортных средств и т. п.). Если модель и моделируемый объект имеют одну и ту же физическую природу, то говорят о физическом **М.** (см. Моделирование физическое). Явление (система, процесс) может исследоваться и путем опытного изучения каких-либо явления иной физической природы, но такого, что оно описывается теми же математическими соотношениями, что и моделируемое явление. Например, механические и электрические колебания описываются одними и теми же дифференциальными уравнениями; поэтому с помощью механических колебаний можно моделировать электрические и наоборот. Такое "предметно-математическое" **М.** широко применяется для замены изучения одних явлений изучением других явлений, более удобных для лабораторного исследования, в частности потому, что они допускают из-

мерение неизвестных величин (см. [Моделирование аналоговое](#)). Так, электрическое **М.** позволяет изучать на электрических моделях механических, гидродинамических, акустических и другие явления. Электрическое **М.** лежит в основе т. н. [аналоговых вычислительных машин](#).

При знаковом **М.** моделями служат знаковые образования какого-либо вида: схемы, графики, чертежи, формулы, графы, а также слова и предложения в некотором алфавите (естественного или искусственного языка) (см. [Знак](#), [Семиотика](#)).

Важнейшим видом знакового **М.** является математическое (или логико-математическое) **М.**, осуществляемое средствами языка математики и логики (см. [Математическая модель](#)). Знаковые образования и их элементы всегда рассматриваются вместе с определенными преобразованиями, операциями над ними, которые выполняет человек или машина (преобразования математических, логических, химических формул, преобразования состояний элементов цифровой машины, соответствующих знакам машинного языка, и др.). Современная форма "материальной реализации" знакового (прежде всего, математического) **М.** – это **М.** на цифровых электронных вычислительных машинах, универсальных и специализированных. Такие машины – это своего рода "чистые бланки", на которых в принципе можно зафиксировать описание любого процесса (явления) в виде его [программы](#), т. е. закодированной на машинном языке системы правил, следуя которым машина может "воспроизвести" ход моделируемого процесса.

Действия со знаками всегда в той или иной мере связаны с пониманием знаковых образований и их преобразований: формулы, математические уравнения и т. п. выражения применяемого при построении модели научного языка определенным образом интерпретируются (истолковываются) в понятиях той предметной области, к которой относится оригинал (см. [Интерпретация](#)). Поэтому реальное построение знаковых моделей или их фрагментов может заменяться мысленно-наглядным представлением знаков и (или) операций над ними. Эту разновидность знакового **М.** иногда называется мысленным **М.** Впрочем, этот термин часто применяют для обозначения "интуитивного" **М.**, не использующего никаких четко фиксированных знаковых систем, а протекающего на уровне "модельных представлений". Такое **М.** есть непереносимое условие любого познавательного процесса на его начальной стадии.

По характеру той стороны объекта, которая подвергается **М.**, уместно различать **М.** структуры объекта и **М.** его поведения (функционирования протекающих в нем процессов и т. п.). Это различие сугубо относительно для химии или физики, но оно приобретает четкий смысл в науках о жизни, где различие структуры и функции систем живого принадлежит к числу фундаментальных методологических принципов исследования, и в кибернетике, делающей акцент на **М.** функционирования изучаемых систем. При "кибернетическом" **М.** обычно абстрагируются от структуры системы и рассматривают ее как "черный ящик". Его описание (модель) строится в терминах соотношения между состояниями его "входов" и "выходов". При этом "входы" соответствуют внешним воздействиям на изучаемую систему, "выходы" – ее реакциям на них, т. е. поведению.

Для ряда сложных явлений (например, турбулентности, пульсаций в областях отрыва потока и т. п.) пользуются стохастическим **М.**, основанным на установлении [вероятностей](#) тех или иных событий. Такие модели не отражают весь ход отдельных процессов в данном явлении, носящих случайный характер, а определяют некоторый средний, суммарный результат.

Понятие **М.** является гносеологической категорией, характеризующей один из важных путей познания. Возможность **М.**, т. е. переноса результатов, полученных в ходе построения и исследования моделей, на оригинал, основана на том, что модель в определенном смысле отображает (воспроизводит, моделирует) какие-либо его черты; при этом такое отображение (и связанная с ним идея подобия) основано, явно или неявно, на точных понятиях [изоморфизма](#) или [гомоморфизма](#) (или их обобщениях) между изучаемым объектом и некоторым другим объектом "оригиналом" и часто осуществляется путем предвари-

тельного исследования (теоретического или экспериментального) того и другого. Поэтому для успешного **М.** полезно наличие уже сложившихся теорий исследуемых явлений, или хотя бы удовлетворительно обоснованных теорий и гипотез, указывающих предельно допустимые при построении моделей упрощения. Результативность **М.** значительно возрастает, если при построении модели и переносе результатов с модели на оригинал можно воспользоваться некоторой теорией, уточняющей связанную с используемой процедурой **М.** идею подобия. Для явлений одной и той же физической природы такая теория, основанная на использовании понятия размерности физических величин, хорошо разработана (см. [Моделирование физическое, Подобия теория](#)). Но для **М.** сложных систем и процессов, изучаемых, например, в кибернетике, аналогичная теория еще не разработана, чем и обусловлено интенсивное развитие теории [больших систем](#) – общей теории построения моделей сложных динамических систем живой природы, техники и социально-экономической сферы.

М. всегда используется вместе с др. общенаучными и специальными методами. Прежде всего **М.** тесно связано с [экспериментом](#). Изучение какого-либо явления на его модели (при предметном, знаковом **М.**, **М.** на ЭВМ) можно рассматривать как особый вид эксперимента: "модельный эксперимент", отличающийся от обычного ("прямого") эксперимента тем, что в процесс познания включается "промежуточное звено" – модель, являющаяся одновременно и средством, и объектом экспериментального исследования, заменяющим изучаемый объект. Модельный эксперимент позволяет изучать такие объекты, прямой эксперимент над которыми затруднен, экономически невыгоден, либо вообще невозможен в силу тех или иных причин [**М.** уникальных (например, гидротехнических) сооружений, сложных промышленных комплексов, экономических систем, социальных явлений, процессов, происходящих в космосе, конфликтов и боевых действий и др.].

Исследование знаковых (в частности, математических) моделей также можно рассматривать как некоторые эксперименты ("эксперименты на бумаге", умственные эксперименты). Это становится особенно очевидным в свете возможности их реализации средствами электронной вычислительной техники. Один из видов модельного эксперимента – модельно-кибернетический эксперимент, в ходе которого вместо "реального" экспериментального оперирования с изучаемым объектом находят [алгоритм](#) (программу) его функционирования, который и оказывается своеобразной моделью поведения объекта. Вводя этот алгоритм в цифровую ЭВМ и, как говорят, "проигрывая" его, получают информацию о поведении оригинала в определенной среде, о его функциональных связях с меняющейся "средой обитания".

Т. о., можно прежде всего различать "материальное" (предметное) и "идеальное" **М.**; первое можно трактовать как "экспериментальное", второе – как "теоретическое" **М.**, хотя такое противопоставление, конечно, весьма условно не только в силу взаимосвязи и обоюдного влияния этих видов **М.**, но и наличия таких "гибридных" форм, как "мысленный эксперимент". "Материальное" **М.** подразделяется, как было сказано выше, на физическое и предметно-математическое **М.**, а частным случаем последнего является аналоговое **М.** Далее, "идеальное" **М.** может происходить как на уровне самых общих, быть может даже не до конца осознанных и фиксированных, "модельных представлений", так и на уровне достаточно детализированных знаковых систем. В первом случае говорят о мысленном (интуитивном) **М.**, во втором – о знаковом **М.** Важнейший и наиболее распространенный вид его – логико-математическое **М.** Наконец, **М.** на ЭВМ (часто именуемое "кибернетическим") является "предметно-математическим по форме, знаковым по содержанию".

М. необходимо предполагает использование абстрагирования и [идеализации](#). Отображая существенные (с точки зрения цели исследования) свойства оригинала и отвлекаясь от несущественного, модель выступает как специфическая форма реализации [абстракции](#), т. е. как некоторый абстрактный идеализированный объект. При этом от характера и уровней лежащих в основе **М.** абстракций и идеализаций в большой степени зависит весь

процесс переноса знаний с модели на оригинал. В частности, существенное значение имеет выделение трех уровней абстракции, на которых может осуществляться **М.**: уровня потенциальной осуществимости (когда упомянутый перенос предполагает отвлечение от ограниченности познавательно–практической деятельности человека в пространстве и времени, см. [Абстракции принцип](#)), уровня "реальной" осуществимости (когда этот перенос рассматривается как реально осуществимый процесс, хотя, быть может, лишь в некоторый будущий период человеческой практики) и уровня практической целесообразности (когда этот перенос не только осуществим, но и желателен для достижения некоторых конкретных познавательных или практических задач).

На всех этих уровнях, однако, приходится считаться с тем, что **М.** данного оригинала может ни на каком своем этапе не дать полного знания о нем. Эта черта **М.** особенно существенна в том случае, когда предметом **М.** являются сложные системы, поведение которых зависит от значительного числа взаимосвязанных факторов различной природы. В ходе познания такие системы отображаются в различных моделях, более или менее оправданных; при этом одни из моделей могут быть родственными друг другу, другие же могут оказаться глубоко различными. Поэтому возникает проблема сравнения (оценки адекватности) разных моделей одного и того же явления, что требует формулировки точно определяемых критериев сравнения. Если такие критерии основываются на экспериментальных данных, то возникает дополнительная трудность, связанная с тем, что хорошее совпадение заключений, которые следуют из модели, с данными наблюдения и эксперимента еще не служит однозначным подтверждением верности модели, т. к. возможно построение других моделей данного явления, которые также будут подтверждаться эмпирическими фактами. Отсюда – естественность ситуации, когда создаются взаимодополняющие или даже противоречащие друг другу модели явления; противоречия могут "сняться" в ходе развития науки (и затем появляться при **М.** на более глубоком уровне). Например, на определенном этапе развития теоретической физики при **М.** физических процессов на "классическом" уровне использовались модели, подразумевающие несовместимость корпускулярных и волновых представлений; эта "несовместимость" была "снята" созданием квантовой механики, в основе которой лежит тезис о корпускулярно-волновом дуализме, заложенном в самой природе материи.

Другим примером такого рода моделей может служить **М.** различных форм деятельности мозга. Создаваемые модели интеллекта и психических функций – например, в виде эвристических программ для ЭВМ – показывают, что **М.** мышления как информационного процесса возможно в различных аспектах (дедуктивном – формально-логическом, см. [Дедукция](#); индуктивном – см. [Индукция](#); нейтрологическом, эвристическом – см. [Эвристика](#)), для "согласования" которых необходимы дальнейшие логические, психологические, физиологические, эволюционно-генетические и модельно-кибернетические исследования.

М. глубоко проникает в теоретическое мышление. Более того, развитие любой науки в целом можно трактовать – в весьма общем, но вполне разумном смысле, – как "теоретическое **М.**". Важная познавательная функция **М.** состоит в том, чтобы служить импульсом, источником новых теорий. Нередко бывает так, что теория первоначально возникает в виде модели, дающей приближенное, упрощенное объяснение явления, и выступает как первичная рабочая гипотеза, которая может перерасти в "предтеорию" – предшественницу развитой теории. При этом в процессе **М.** возникают новые идеи и формы эксперимента, происходит открытие ранее неизвестных фактов. Такое "переплетение" теоретического и экспериментального **М.** особенно характерно для развития физических теорий (например, молекулярно-кинетической или теории ядерных сил).

М. – не только одно из средств отображения явлений и процессов реального мира, но и – несмотря на описанную выше его относительность – объективный практический критерий проверки истинности наших знаний, осуществляемой непосредственно или с помощью установления их отношения к другой теории, выступающей в качестве модели,

адекватность которой считается практически обоснованной. Применяясь в органическом единстве с другими методами познания, **М.** выступает как процесс углубления познания, его движения от относительно бедных информацией моделей к моделям более содержательным, полнее раскрывающим сущность исследуемых явлений действительности.

Модель – способ замещения реального объекта, используемый для его изучения. Впоследствии мы уточним данное определение.

Модель вместо исходного объекта используется в случаях, когда эксперимент опасен, дорог, происходит в неудобном масштабе пространства и времени (долговременен, слишком кратковременен, протяжен...), невозможен, неповторим, ненагляден и т. д. Проиллюстрируем это:

- «эксперимент опасен» – при деятельности в агрессивной среде вместо человека лучше использовать его макет; примером может служить луноход;
- «дорог» – прежде чем использовать идею в реальной экономике страны, лучше опробовать ее на математической или имитационной модели экономики, просчитав на ней все «за» и «против» и получив представление о возможных последствиях;
- «долговременен» – изучить коррозию – процесс, происходящий десятилетия, – выгоднее и быстрее на модели;
- «кратковременен» – изучать детали протекания процесса обработки металлов взрывом лучше на модели, поскольку такой процесс скоротечен во времени;
- «протяжен в пространстве» – для изучения космогонических процессов удобны математические модели, поскольку реальные полеты к звездам (пока) невозможны;
- «микроскопичен» – для изучения взаимодействия атомов удобно воспользоваться их моделью;
- «невозможен» – часто человек имеет дело с ситуацией, когда объекта нет, он еще только проектируется. При проектировании важно не только представить себе будущий объект, но и испытать его виртуальный аналог до того, как дефекты проектирования проявятся в оригинале.

Важно: моделирование теснейшим образом связано с проектированием. Обычно сначала проектируют систему, потом ее испытывают, потом снова корректируют проект и снова испытывают, и так до тех пор, пока проект не станет удовлетворять предъявляемым к нему требованиям. Процесс «проектирование-моделирование» цикличен. При этом цикл имеет вид спирали – с каждым повтором проект становится все лучше, так как модель становится все более детальной, а уровень описания точнее;

• «неповторим» – это достаточно редкий случай, когда эксперимент повторить нельзя; в такой ситуации модель – единственный способ изучения таких явлений. Пример – исторические процессы, – ведь повернуть историю вспять невозможно;

• «ненагляден» – модель позволяет заглянуть в детали процесса, в его промежуточные стадии; при построении модели исследователь как бы вынужден описать причинно-следственные связи, позволяющие понять все в единстве, системе. Построение модели дисциплинирует мышление.

Важно: модель играет системообразующую и смыслообразующую роль в научном познании, позволяет *понять* явление, структуру изучаемого объекта. Не построив модель, вряд ли удастся понять логику действия системы. Это означает, что модель позволяет разложить систему на элементы, связи, механизмы, требует объяснить действие системы, определить причины явлений, характер взаимодействия составляющих.

Процесс моделирования есть процесс перехода из реальной области в виртуальную (модельную) посредством **формализации**, далее происходит изучение модели (собственно **моделирование**) и, наконец, **интерпретация** результатов как обратный переход из виртуальной области в реальную. Этот путь заменяет прямое исследование объекта в реальной области, то есть лобовое или интуитивное решение задачи. Итак, в самом простом случае технология моделирования подразумевает 3 этапа: **формализация**, собственно **моделирование**, **интерпретация** (**рис. 1.1**).

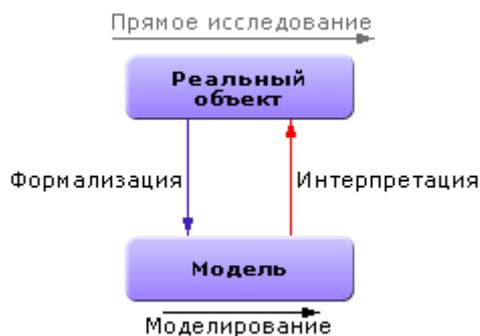


Рис. 1.1. Процесс моделирования (базовый вариант)

Вариант 1: соответствие – 100%. Очевидно, что точность решения в этом случае максимальна, а ущерб от применения модели минимален. Но затраты на построение такой модели бесконечно велики, так как объект повторяется во всех своих деталях; фактически, создается точно такой же объект путем копирования его до атомов (что само по себе не имеет смысла).

Вариант 2: соответствие – 0%. Модель совсем не похожа на реальный объект. Очевидно, что точность решения минимальна, а ущерб от применения модели максимален, бесконечен. Но затраты на построение такой модели нулевые.

Конечно, варианты 1 и 2 – это крайности. На самом деле модель создается из соображений компромисса между затратами на ее построение и ущербом от неточности ее применения. Это точка между двумя бесконечностями. То есть, моделируя, следует иметь в виду, что исследователь (моделировщик) должен стремиться к оптимуму суммарных затрат, включающих ущерб от применения и затраты на изготовление модели (см. [рис. 1.2](#)).

Просуммируйте две кривые затрат – получится одна кривая общих затрат. Найдите оптимум на суммарной кривой: он лежит между этими крайними вариантами. Видно, что неточные модели не нужны, но и абсолютная точность тоже не нужна, да и невозможна. Частое и распространенное заблуждение при построении моделей – требовать «как можно точнее».

«Модель – поиск конечного в бесконечном» – эта мысль принадлежит Д. И. Менделееву. Что отбрасывается, чтобы превратить бесконечное в конечное? В модель включаются только существенные аспекты, представляющие объект, и отбрасываются *все остальные* (бесконечное большинство). Существенный или несущественный аспект описания определяют согласно цели исследования. То есть каждая модель составляется с какой-то **целью**. Начиная моделирование, исследователь должен определить цель, отделив ее от всех возможных других целей, число которых, по-видимому, бесконечно.

К сожалению, указанная на [рис. 1.2](#) кривая является умозрительной и реально до

Если требуется уточнение, эти этапы повторяются вновь и вновь: формализация (проектирование), моделирование, интерпретация. *Спираль! Вверх по кругу.*

Более подробно весь цикл разработки показан на [рис. 1.14](#), где отражены методы, способы, приемы, с помощью которых реализуется каждый из этапов.

Поскольку моделирование – способ замещения реального объекта его аналогом, то возникает вопрос: насколько аналог должен соответствовать исходному объекту?

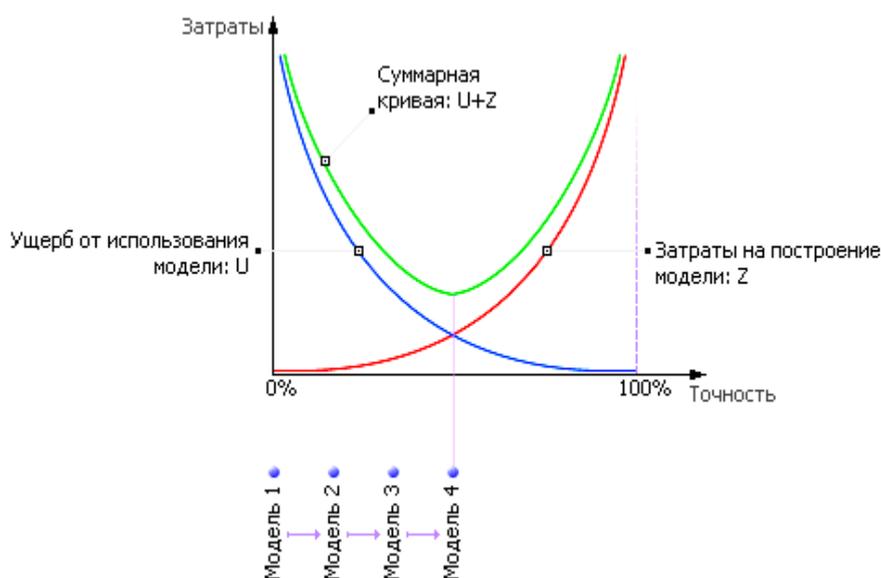


Рис. 1.2. Соотношение суммарных затрат и точности для различных вариантов детализации прикладной модели

начала моделирования построена быть не может. Поэтому на практике действуют таким образом: двигаются по шкале точности слева направо, то есть от простых моделей («Модель 1», «Модель 2»...) ко все более сложным («Модель 3», «Модель 4»...). А процесс моделирования имеет циклический спиралевидный характер: если построенная модель не удовлетворяет требованиям точности, то ее детализируют, дорабатывают на следующем цикле (см. [рис. 1.3](#)).

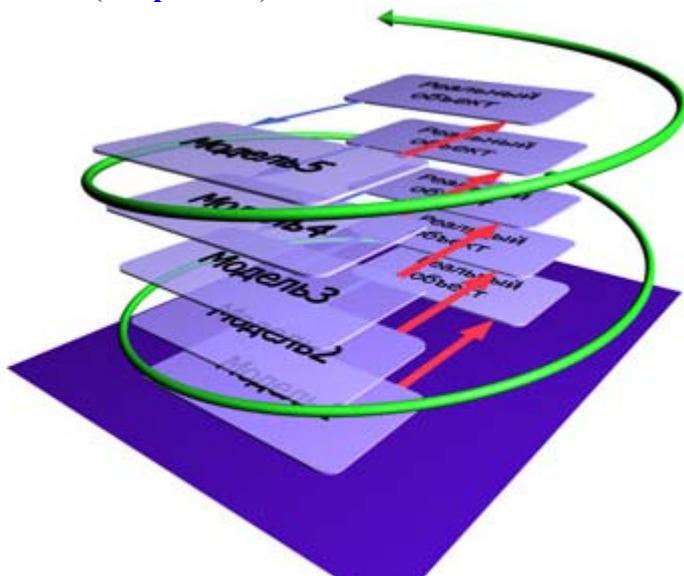


Рис. 1.3. Спиралевидный характер процесса проектирования и уточнения прикладных моделей

Улучшая модель, следят, чтобы эффект от усложнения модели превышал связанные с этим затраты. Как только исследователь замечает, что затраты на уточнение модели превышают эффект от точности при применении модели, следует остановиться, поскольку точка оптимума достигнута. Такой подход всегда гарантирует окупаемость вложений.

Из всего сказанного следует, что моделей может быть несколько: приближенная, более точная, еще точнее и так далее. Модели как бы образуют ряд. Двигаясь от варианта к варианту, исследователь совершенствует модель. Для построения и совершенствования моделей необходима их преемственность, средства

отслеживания версий и так далее, то есть моделирование требует инструмента и опирается на технологию.

Инструмент – типовое средство, позволяющее достигать оригинальный результат и обеспечивающее сокращение затрат на выполнение промежуточных операций (имиджи, стандартные библиотеки, мастера, линейки, резинки...).

Технология – набор стандартных способов, приемов, методов, позволяющий достичь результата гарантированного качества с помощью указанных инструментов за заранее известное время при заданных затратах, но при соблюдении пользователем объявленных требований и порядка.

Среда – совокупность рабочего пространства и инструментов на нем, поддерживающая хранение и изменение, преемственность проектов и интерпретирующая свойства объектов и систем из них.

Иногда модели пишут на языках программирования, но это долгий и дорогой процесс. Для моделирования можно использовать математические пакеты, но, как показывает опыт, в них обычно не хватает многих инженерных инструментов. Оптимальным является использование среды моделирования. Модель, выполненная с учетом возможности ее модернизации, конечно, имеет недостатки, например, низкую скорость исполнения кода. Но есть и неоспоримые достоинства. Видна и сохранена структура модели, связи, элементы, подсистемы. Всегда можно вернуться назад и что-то переделать. Сохранен след в истории проектирования модели (но когда модель отлажена, имеет смысл убрать из проекта служебную информацию). В конце концов, модель, которая сдается заказчику, может быть оформлена в виде специализированного автоматизированного рабочего места (АРМ), написанного уже на языке программирования. Внимание в нем уже уделено интерфейсу, скоростным параметрам и другим потребительским свойствам, которые важны для заказчика. АРМ, безусловно, вещь дорогая, поэтому выпускается он только тогда, когда заказчик полностью оттестировал проект в среде моделирования, сделал все замечания и обязуется больше не менять своих требований.

Моделирование является инженерной наукой, технологией решения задач. Это замечание – очень важное. Так как технология есть способ достижения результата с известным заранее качеством и гарантированными затратами и сроками, то моделирование, как дисциплина:

- изучает способы решения задач, то есть является инженерной наукой;
- является универсальным инструментом, гарантирующим решение любых задач, независимо от предметной области.

Смежными моделированию предметами являются: программирование, математика, исследование операций.

Программирование – потому что часто модель реализуют на искусственном носителе (пластилин, вода, кирпичи, математические выражения...), а компьютер является одним из самых универсальных носителей информации и притом активным (имитирует пластилин, воду, кирпичи, считает математические выражения и т. д.). Программирование есть способ изложения алгоритма в языковой форме. **Алгоритм** – один из способов представления (отражения) мысли, процесса, явления в искусственной вычислительной среде, которой является компьютер (фон-Неймановской архитектуры). Специфика алгоритма состоит в отражении последовательности действий. Моделирование может использовать программирование, если моделируемый объект легко описать с точки зрения его поведения. Если легче описать свойства объекта, то использовать программирование затруднительно. Если моделирующая среда построена не на основе фон-Неймановской архитектуры, программирование практически бесполезно.

Какова разница между алгоритмом и моделью?

Алгоритм – это процесс решения задачи путем реализации последовательности шагов, тогда как **модель** – совокупность потенциальных свойств объекта. Если к **модели** поставить **вопрос** и добавить **дополнительные условия** в виде исходных данных (связь с другими объектами, начальные условия, ограничения), то она может быть разрешена исследователем относительно неизвестных. Процесс решения задачи может быть представлен алгоритмом (но известны и другие способы решения). Вообще примеры алгоритмов в природе неизвестны, они суть порождение человеческого мозга, разума, способного к установлению плана. Собственно алгоритм – это и есть план, развернутый в последовательность действий. Следует различать поведение объектов, связанное с естественными причинами, и промысел разума, управляющий ходом движения, предсказывающий результат на основе знания и выбирающий целесообразный вариант поведения.

Итак:

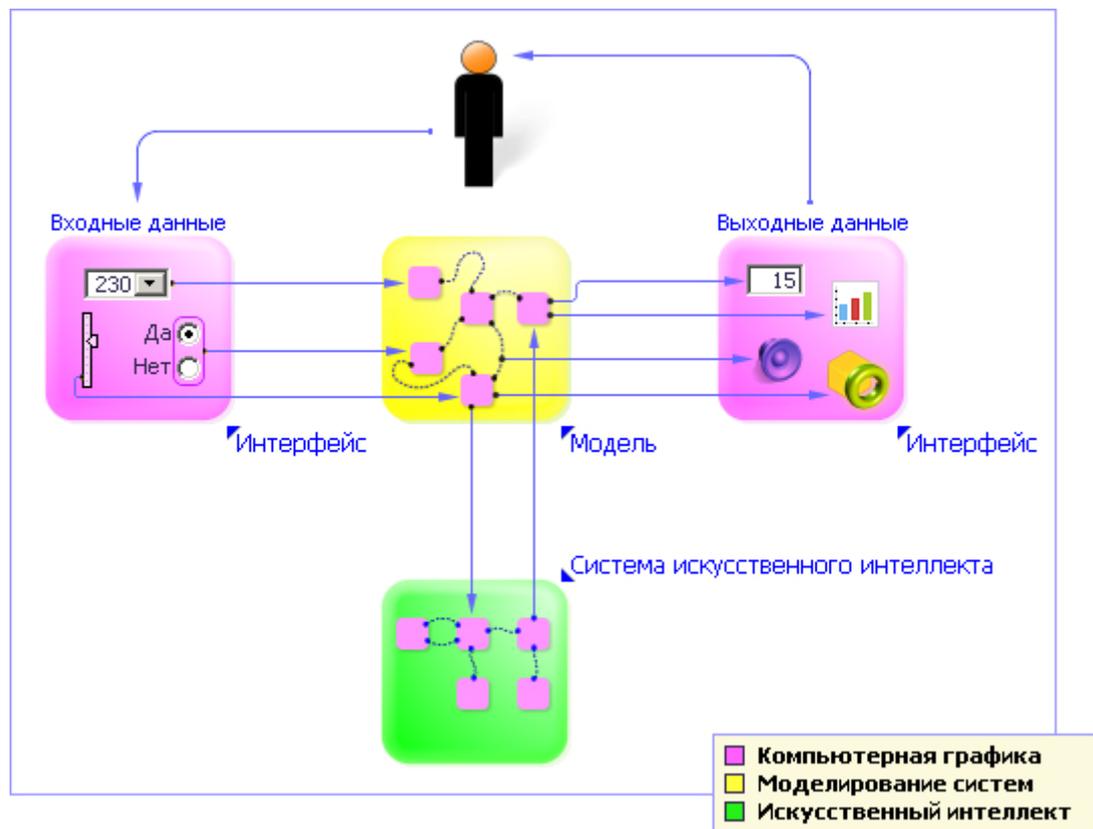
модель + вопрос + дополнительные условия = задача.

Математика – наука, предоставляющая возможность исчисления моделей, приводимых к стандартному (каноническому) виду. Наука о нахождении решений аналитических моделей (анализ) средствами формальных преобразований.

Исследование операций – дисциплина, реализующая способы исследования моделей с точки зрения нахождения наилучших управляющих воздействий на модели (синтез). По большей части имеет дело с аналитическими моделями. Помогает принимать решения, используя построенные модели.

Проектирование – процесс создания объекта и его модели; **моделирование** – способ оценки результата проектирования; моделирования без проектирования не существует.

Потребителями результатов моделирования можно признать электротехнику, экономику, биологию, географию и другие в том смысле, что они используют методы моделирования для исследования собственного прикладного объекта (например, модель ландшафта, модель электрической цепи, модель денежных потоков и т. д.). Подходя к проблеме шире, будем считать, что с моделированием связана любая целенаправленная деятельность. В этом смысле к смежным можно отнести дисциплины [«Компьютерная графика»](#) и [«Модели и методы искусственного интеллекта»](#) (см. [рис. 1.4](#)).



Компьютерная графика помогает организовать удобный естественный интерфейс для управления моделью, для наблюдения за ее реакциями. Важно понимать, что пользователь взаимодействует с моделью не напрямую, а именно через интерфейс: с одной стороны он посылает ей исходные (входные) данные (например, с помощью окон ввода, кнопок, движков, командной строки и т. д.), с другой – смотрит на результат работы модели, то есть воспринимает посредством интерфейса выходные данные.

Искусственный интеллект подразумевает построение высших моделей (например, адаптивных, которые умеют самонастраиваться, умеют создавать друг друга и т. д.). Подразумевается, что модель интеллекта в состоянии сама строить модели прикладных объектов и систем; объяснение того, как это делается, дается в курсе [«Модели и методы искусственного интеллекта»](#). Вместе с тем заметим, что ряд исследователей, говоря об искусственном интеллекте, имеют в виду применение моделей (обучения, воспроизведения, языка и т. д.) для изучения и имитации одной из самых сложных систем во Вселенной — человека.

Заметим, что искусственный интеллект – достаточно большая модель, которая содержит обширную информацию об окружающем мире и мета-модели, умеющие ее достраивать. Мета-модели имеют большое подобие с имитируемым ими человеком.

В зависимости от носителя различают модели: натурные, мысленные, математические, имитационные, графические, фотографические и так далее. Каждая из моделей обладает различной способностью к прогнозу свойств объекта. Например, по фотографии человека в анфас вряд ли можно верно представить, как выглядит его затылок. Приближение в виде трехмерной модели – намного лучше, но можно ли с ее помощью определить, когда, например, у виртуального человека вырастут волосы длиной 50 см? Имитационная модель еще более информативна. Но наибольшей ценностью обладают модели, пригодные для решения задач, то есть обладающие прогностическими свойствами, умеющие отвечать на вопросы. Следует различать два понятия – «модель» и «задача». Модель связывает переменные между собой законами. Эти законы действуют независимо от того, какая сейчас задача стоит перед нами. Модель объективна, она подобна миру, который нас окружает, и содержит в себе информацию об этом. Структура мира (в общем смысле) неизменна, фундаментальна, модель, следовательно, тоже. А человек, как существо субъек-

тивное, имеющее собственные цели, часто меняющиеся желания, ставит, в зависимости от своих потребностей, каждый раз новые задачи, требует решить возникающие у него проблемы. Он ставит вопросы к окружающему миру, с законами которого нельзя не считаться. Удобно ставить вопросы к модели, которая содержит нужную информацию о мире. Поэтому задача – это совокупность вопроса и модели. Можно к модели задавать все новые и новые вопросы и при этом не менять модель, но менять задачу.

То есть модель – способ нахождения ответов на вопросы. Чтобы ответить на поставленный вопрос, модель должна быть преобразована по правилам, обеспечивающим ее эквивалентность, к виду, соответствующему ответу на вопрос. Это означает, что модель должна быть сформирована по правилам определенной алгебры (алгебра есть правила преобразования). А процедура, которая помогает применить такие правила к модели, называется **методом**.

Рассмотрим пример.

Модель падения тела под углом к горизонту содержит информацию о координатах траектории, заданных в осях (x, y) : $y = -x^2 + 4 \cdot x - 3$ (координаты тела в полете) – см. **рис. 1.5**.

Модель связывает две переменные y и x законом $f(y, x) = 0$. Модель может быть расширена некоторыми исходными данными, например, так: $y = -x^2 + 4 \cdot x - 3$, $y = 0$ (интересуют не все возможные значения y , а только точки на поверхности Земли).

$y = 0$ – это тоже закон, но более мелкого масштаба. Такие уравнения могут появляться и исчезать в зависимости от исследуемой проблемы. Обычно их называют **гипотезами**.

Вопрос: $x = ?$ Теперь модель и вопрос вместе образовали задачу: $y = -x^2 + 4 \cdot x - 3$, $y = 0$, $x = ?$

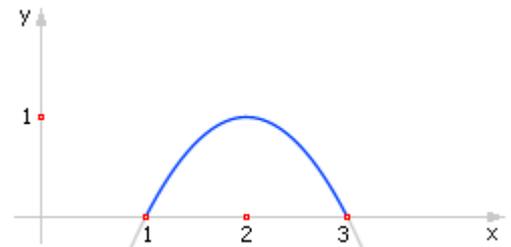


Рис. 1.5. Траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту

Трактовать задачу можно так: при каких значениях x тело окажется на поверхности Земли?

Модель подразумевает, что исследователь может решать с ее помощью прямые и обратные задачи.

Прямая задача не требует алгебраических преобразований, достаточно только арифметических подстановок: $x = 2$, $y = -x^2 + 4 \cdot x - 3$, $y = ?$. Ответ: $y = 1$. То есть, если на вход модели подать значение 2, то на выходе модели будет значение 1 – см. **рис. 1.6**.

Обратная задача: $y = 0$, $y = -x^2 + 4 \cdot x - 3$, $x = ?$ Ответ: $x = 1$, $x = 3$. То есть ответ говорит: чтобы на выходе модели обеспечить значение 0, надо, чтобы на вход модели было подано значение 1 (или 3).

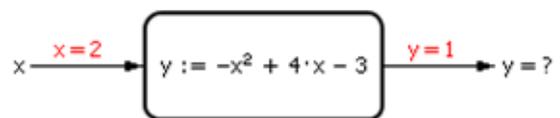


Рис. 1.6. Вид модели для решения прямой задачи

И в первом, и во втором случае мы в разной мере преобразовывали модель, но всегда так, чтобы на входе у нее была известная величина, а на выходе — неизвестная.

В первом варианте $y := -x^2 + 4 \cdot x - 3$.

Во втором варианте модель преобразуется к виду: $0 = -x^2 + 4 \cdot x - 3$. Здесь мы опустили ряд преобразований, известных из курса средней школы, а именно:

$D := b^2 - 4 \cdot a \cdot c$, где $a = -1$, $b = 4$, $c = -3$. $x := (-b \pm \text{sqrt}(D)) / (2 \cdot a)$. $x = 1$ или $x = 3$.

Преобразования происходили с учетом правил алгебры. Если бы правила алгебры были нам неизвестны, то решить обратную задачу нам бы не удалось. А значит, не удалось бы ответить на поставленный вопрос: « $x = ?$ ».

Способность модели преобразовываться с помощью алгебры дает возможность в дальнейшем использовать ее многократно для решения различных задач, делать на ней прогнозы.

Сравните: телефонный справочник – это тоже своеобразная модель, но какие прогнозы вы можете сделать, какие обратные задачи решить? Как вычислить фамилию абонента по номеру телефона? Какую алгебру вы используете?

Поэтому, создавая модель, следует обязательно думать о том, какой алгеброй она будет преобразовываться. Создавать алгебру следует параллельно с моделью или использовать уже готовую алгебру и не отходить при построении модели от ее правил.

Еще один тип задач, который приходится решать на моделях – задачи настройки модели.

Приведем пример. При каких значениях параметра a модель $y = a \cdot x^2 + 4 \cdot x - 3$ обеспечит $y = 9$ при $x = 2$? Решая систему уравнений $y = a \cdot x^2 + 4 \cdot x - 3$, $y = 9$, $x = 2$ или $9 = a \cdot 2^2 + 4 \cdot 2 - 3$, по правилам арифметики и алгебры, получим ответ: $a = 1$.



Рис. 1.7. Структурное изображение модели в среде моделирования

На **рис. 1.7** показано структурное (схематическое) изображения модели, от которого можно перейти к другому, математическому, ее виду: $Y = M(X)$. Модель – это закономерность, преобразующая входные значения в выходные. А как известно из математики, с выражением $Y = M(X)$ можно решить три вида задач, которые приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Формы записи модели и типы решаемых задач

	Известно	Неизвестно	Решение
Прямая задача	X, M	Y	$Y = M(X)$
Обратная задача	Y, M	X	$X = M^{-1}(Y)$
Задача настройки модели	X, Y	M	$M = f(X, Y)$

Ряд моделей может быть недоопределен – это означает, что вариантов ответов много (два, три, сто или бесконечное множество). Если нужен один ответ, то

проблему надо доопределять, дополнять условиями. «Недоопределен» означает, что можно произвольно, кроме гипотез, законов, ответа, потребовать дополнительно выполнение еще каких-то условий. Возможно, при построении модели что-то не было учтено, не хватает каких-то законов. Рецепт понятен: модель надо достроить. Но может быть иначе. Решений много и есть, видимо, лучшие решения, есть и похуже. Тогда для нахождения лучшего решения следует сузить область решений, накладывая определенные ограничения, чтобы отсеять остальные. Такие задачи часто называют **задачами управления**.

Часть определений, которым надо безусловно удовлетворить, называются **ограничениями**.

Часть определений, относительно которых высказывают только пожелания («быть как можно больше или меньше»), называются **критериями**.

В целом получается обратная задача. А то, что надо определить — управляемая переменная. То есть интересуются: как следует изменить входной параметр (управление), чтобы обеспечить выполнение законов, не выйти за ограничения и чтобы при этом критерий принял наилучшее значение?

Пример. Модель: $y = -x^2 + 4 \cdot x - 3$. Вопрос: $x = ?$ Доопределение модели: y должен быть максимизирован, $x \geq 2.5$. Так как y должен быть максимизирован, то мы должны стараться двигаться вверх вдоль графика функции (**рис. 1.8**) и следить, чтобы значение x не стало меньше 2.5. Как видно из рисунка, значение y станет максимальным при $x = 2.5$. Ответ: $y = 0.75$, $x = 2.5$.

Отметим, что создать модель бывает проще, чем сразу дать себе ответ на интере-

сующий вопрос. Наверное, на практике вы замечали, что часто гораздо проще составить уравнения, чем угадать решение задачи. Например: решено разделить огромный шар размером с Землю на две половинки, полученную половинку снова поделить пополам и так далее. Попробуйте ответить на вопрос: сколько раз (n) надо провести такую операцию, чтобы размер делимой частички в результате достиг размера атома? Наверняка, сразу ответить на этот вопрос не удастся, интуиция подводит, придется составить модель.

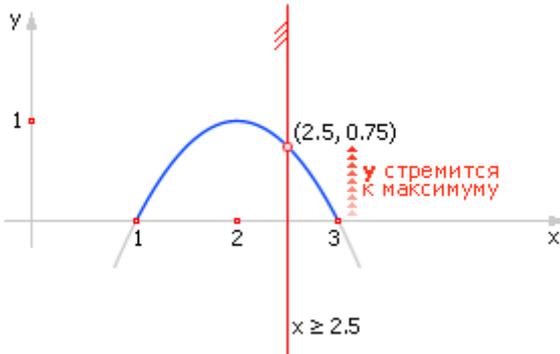


Рис. 1.8. Графическая иллюстрация решения задачи с ограничениями

Пусть $D = 6\,400\text{ км} = 6\,400\,000\text{ м}$ – диаметр шара (Земли), а $d = 10^{-9}\text{ м}$ – диаметр атома. Тогда модель есть выражение: $2^n = D/d$ или $2^n = 6\,400\,000/10^{-9}$. Отсюда получаем: $2^n = 6.4 \cdot 10^{15}$ или $n = \log_2(6.4 \cdot 10^{15})$. Итак, приблизительно, $n = 53$. Неожиданный результат, не правда ли?! Можно ли было его предугадать?

Еще несколько примеров. Тривиальные модели: $x = 5^\circ$; телефон друга Сидорова – 371–21–41. Такие модели не несут в себе прогностических свойств, поскольку на основе известной информации невозможно вычислить каким-либо образом другую ин-

формацию. Зная телефон одного друга Сидорова, невозможно вычислить телефон другого его друга. Это так называемые **пра-модели** (pra-model). Фактически это данные.

Заметим, что недооценка в современных условиях понятия моделирования ведет к использованию в АРМ коммерческого назначения только данных. Такие АРМ не способны решать прогностические задачи и решают, в основном, только учетные задачи (см. **рис. 1.9**). Чтобы проиграть ситуацию на предприятии на будущее, узнать, к чему приведет то или иное решение, следует в состав АРМ включать модели (см. **рис. 1.10**).

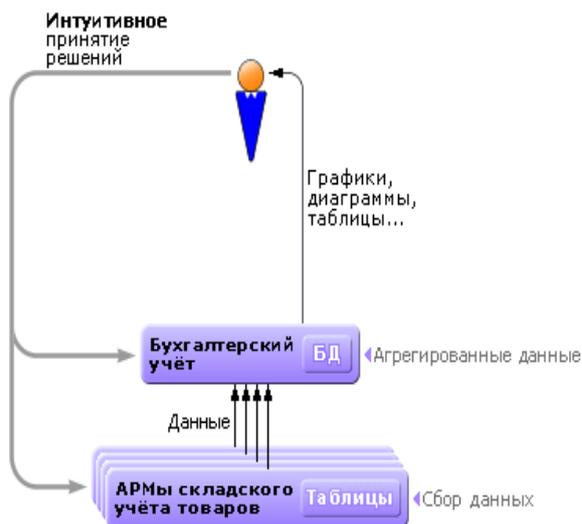


Рис. 1.9. Типовая схема взаимодействия АРМ в АСУ (без решения задач прогнозирования)

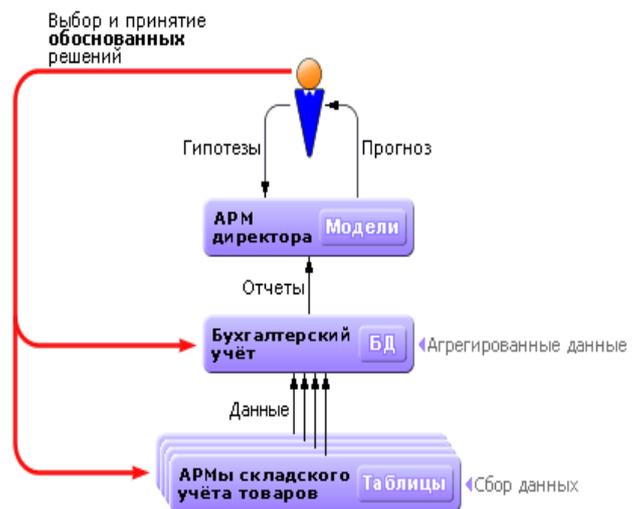


Рис. 1.10. Схема взаимодействия АРМ в АСУ (при постановке задач прогнозирования)

На **рис. 1.11** показана пирамида моделей, различных по степени прогностичности.

Обратите внимание: уровень «Модель» «питается» информацией, структурированной по типу предыдущего уровня «Пра-модель», то есть она потребляет на входе данные, перерабатывает их и возвращает тоже данные, то есть модели более низкого уровня (пра-модели). Подчеркнем еще раз, что данные – это тоже модели! Уровень «Супра-модель»

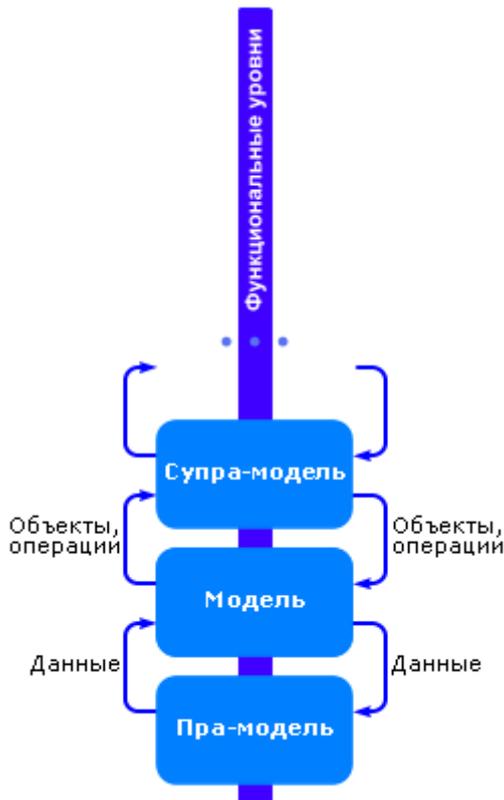


Рис. 1.11. Соотношение типов моделей по степени прогностичности

потребляет на входе *модели* в виде объектов и операций, перерабатывает их и возвращает *модели*. Примером таких супра-моделей могут служить грамматики, способные преобразовывать модели (уравнения). Данный принцип справедлив и для всех последующих (вышестоящих) уровней. Пирамида на **рис. 1.11** представлена в виде функциональных уровней; это означает, что каждый последующий уровень мощнее предыдущего, т. е. позволяет получить больший, более мощный качественный результат. Более детально [рис. 1.12](#).

Модели могут принимать различную форму, в зависимости от способа мышления исследователя, его взгляда на мир, используемой алгебры. Использование различных математических аппаратов впоследствии приводит к различным возможностям в решении задач. Модели могут быть:

- феноменологические и абстрактные;
- активные и пассивные;
- статические и динамические;
- дискретные и непрерывные;
- детерминированные и стохастические;
- функциональные и объектные.

Феноменологические модели сильно привязаны к конкретному явлению. Изменение ситуации часто приводит к тому, что моделью воспользоваться в новых условиях достаточно сложно. Это происходит оттого, что при составлении модели ее не удалось построить с точки зрения подобия внутреннему строению моделируемой системы. Феноменологическая модель передает внешнее подобие.

пользоваться в новых условиях достаточно сложно. Это происходит оттого, что при составлении модели ее не удалось построить с точки зрения подобия внутреннему строению моделируемой системы. Феноменологическая модель передает внешнее подобие.

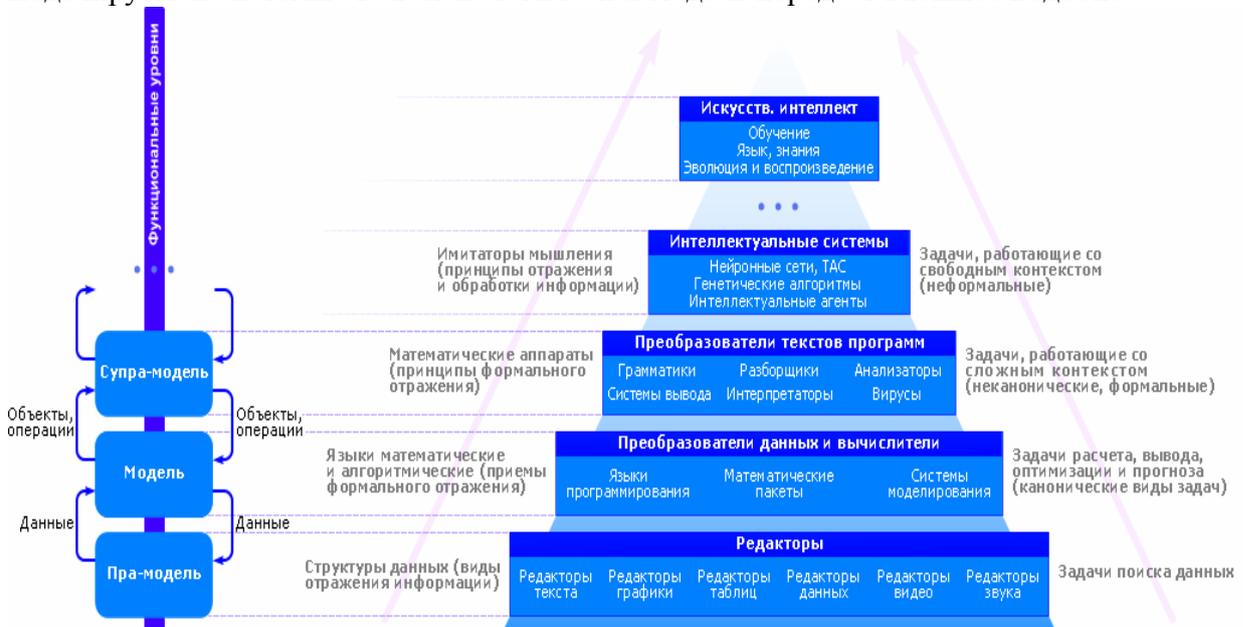


Рис. 1.12. Соотношение типов моделей по степени прогностичности (полная схема)

Абстрактная модель воспроизводит систему с точки зрения ее внутреннего устройства, копирует ее более точно. У нее больше возможностей, шире класс решаемых задач.

Активные модели взаимодействуют с пользователем; могут не только, как пассивные, выдавать ответы на вопросы пользователя, когда тот об этом попросит, но и сами ак-

тивируют диалог, меняют его линию, имеют собственные цели. Все это происходит за счет того, что активные модели могут самоизменяться.

Статические модели описывают явления без развития. Динамические модели отслеживают поведение систем, поэтому используют в своей записи, например, дифференциальные уравнения, производные от времени.

Дискретные и непрерывные модели. Дискретные модели изменяют состояние переменных скачком, потому что не имеют детального описания связи причин и следствий, часть процесса скрыта от исследователя. Непрерывные модели более точны, содержат в себе информацию о деталях перехода.

Детерминированные и стохастические модели. Если следствие точно определено причиной, то модель представляет процесс детерминировано. Если из-за неизученности деталей не удастся описать точно связь причин и следствий, а возможно только описание в целом, статистически (что часто и бывает для сложных систем), то модель строится с использованием понятия вероятности.

Распределенные, структурные, сосредоточенные модели. Если параметр, описывающий свойство объекта, в любых его точках имеет одинаковое значение (хотя может меняться во времени!), то это система с сосредоточенными параметрами. Если параметр принимает разные значения в разных точках объекта, то говорят, что он распределен, а модель, описывающая объект, – распределенная. Иногда модель копирует структуру объекта, но параметры объекта сосредоточены, тогда модель – структурная.

Если описание идет с точки зрения поведения, то модель построена по *функциональному признаку*. Если описание каждого объекта отделено от описания другого объекта, если описываются свойства объекта, из которых вытекает его поведение, то модель является *объектно-ориентированной*.

Каждый подход имеет свои достоинства и недостатки. Разные математические аппараты имеют разные возможности (мощность) для решения задач, разные потребности в вычислительных ресурсах. Один и тот же объект может быть описан различными способами. Инженер должен грамотно применять то или иное представление, исходя из текущих условий и стоящей перед ним проблемы.

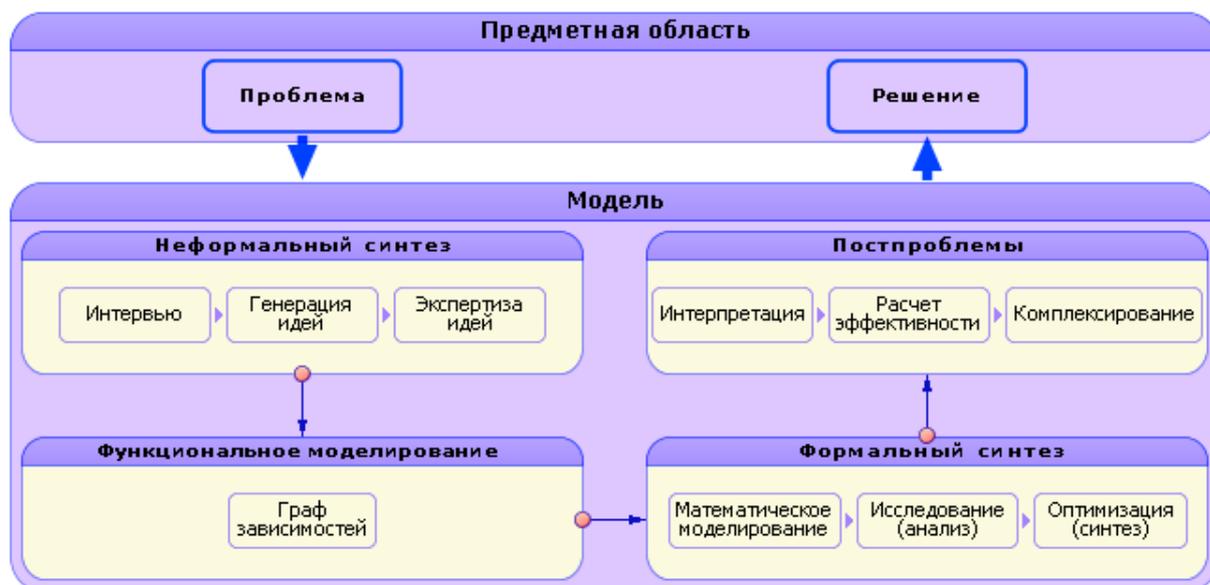


Рис. 1.13. Схема процесса моделирования (уточненный вариант)

Полный (расширенный) вариант схемы, представленной на [рис. 1.13](#), см. на [рис. 1.14](#). После прочтения всего курса лекций рекомендуется вернуться к [рис. 1.14](#) и на более глубоком уровне ознакомиться с ним. Ссылка действует в электронной версии. В печатном варианте на двух следующих страницах представлены «левая» и «правая» части. Приведенная выше классификация является идеальной. Модели сложных систем обычно

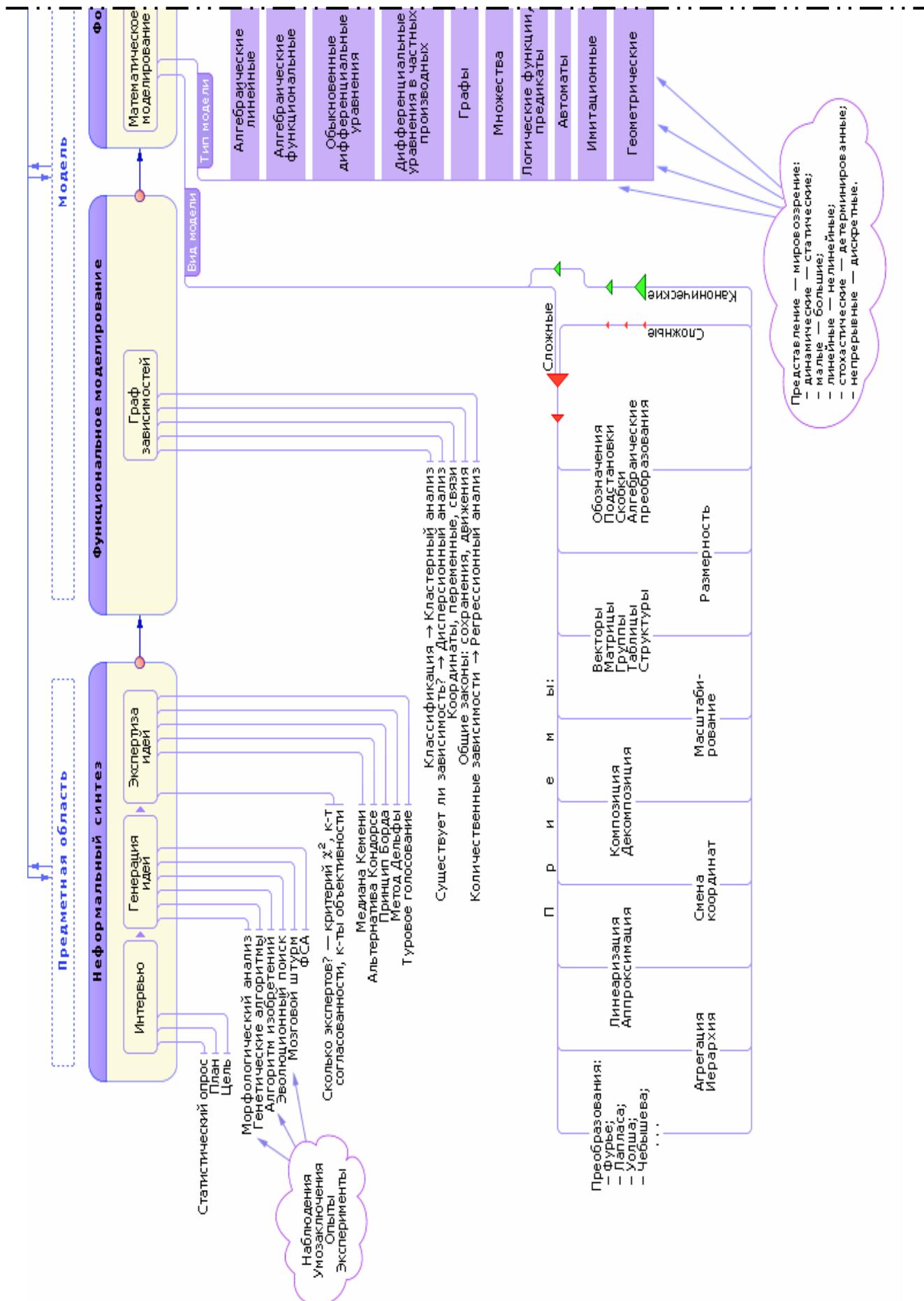


Рисунок 1.14 а). Расширенный вариант схемы процесса моделирования,

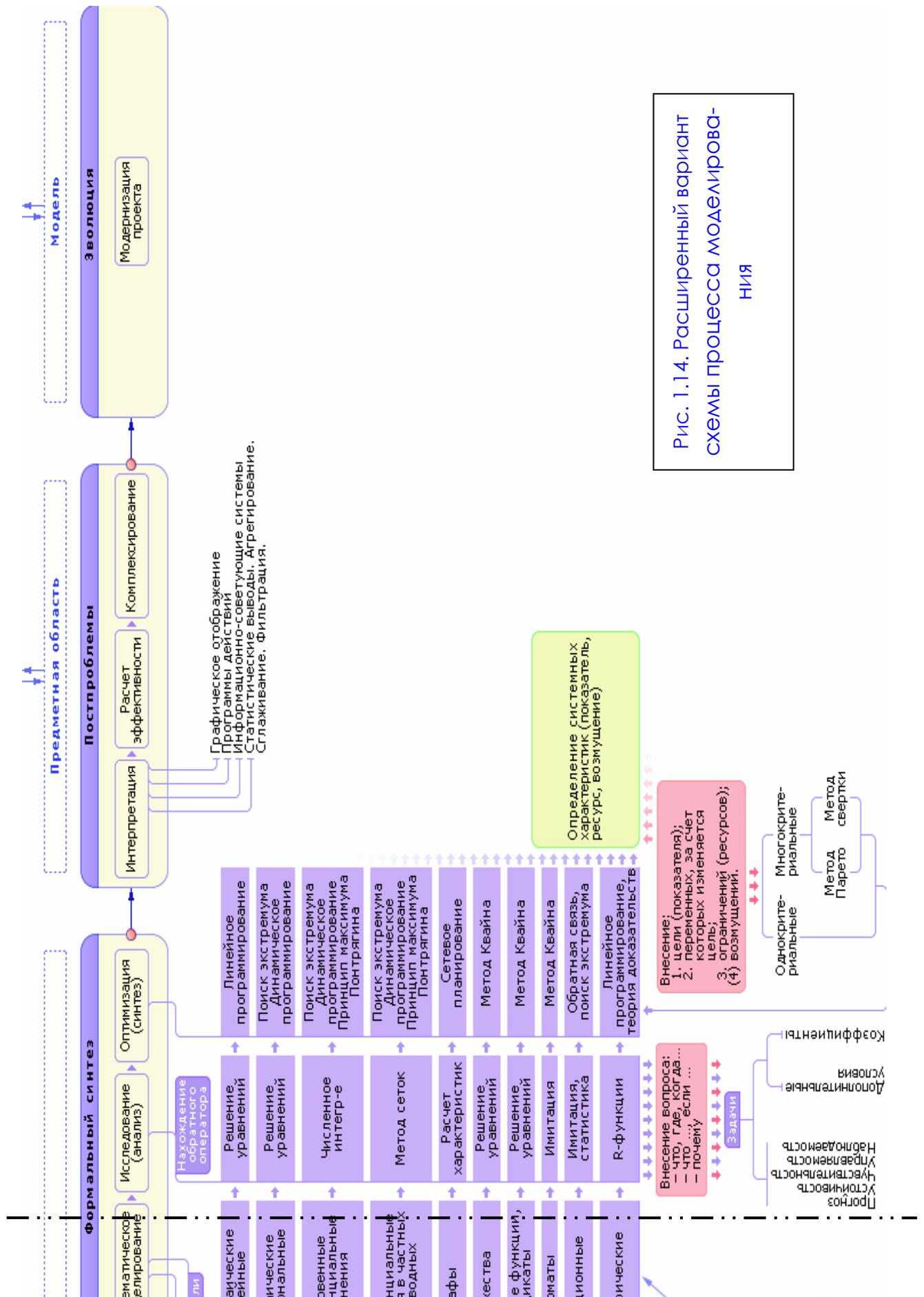


Рис. 1.14. Расширенный вариант схемы процесса моделирования

Рис. 1.14 б). Расширенный вариант схемы процесса моделирования, правая

имеют комплексный вид, используют в своем составе сразу несколько представлений. Если удастся свести модель к одному типу, для которого уже сформулирована алгебра, то исследование модели, решение задач на ней существенно упрощается, становится типовым. Для этого модель должна быть различными способами (упрощением, переобозначением и другими) приведена к каноническому виду, то есть к виду, для которого уже сформулирована алгебра, ее методы. В зависимости от используемого типа модели (алгебраические, дифференциальные, графы и т. д.) на разных этапах ее исследования используются различные математические аппараты.

На **рис. 1.15** представлены этапы построения модели.

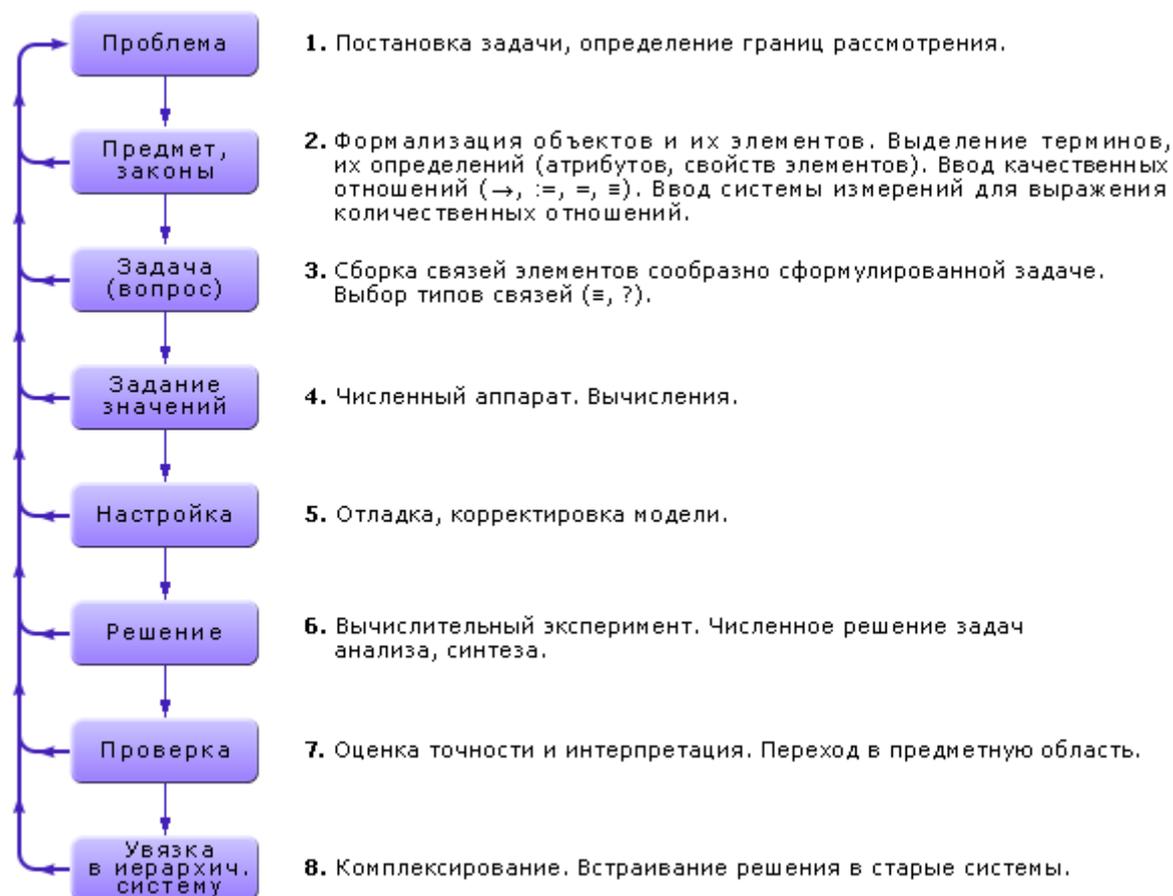


Рис. 1.15. Этапы процесса моделирования

Спираль, которая была рассмотрена на **рис. 1.3**, представлена на **рис. 1.15** как виток. Но обратите внимание на возможность возвращения с каждого этапа на более ранний (или более ранние) при обнаружении ошибки. Спираль имеет достаточно сложный вид, прошита дополнительными связями.

Общее описание технологии моделирования расположено в [файле справки](#) системы «Stratum-2000» в разделе «Теория моделирования» («Помощь» > «Теория моделирования»). Сначала данный раздел стоит прочитать бегло, а затем подробно — после того, как вы усвоите весь курс и накопите опыт описания объектов на примерах и опыте, приобретенном в ходе выполнения курсовой работы.

Конечно, моделирование, как уже было сказано, в соединении с проектированием — это технология решения проблем, задач. Но у каждой технологии все-таки есть граница, за которой она менее эффективна. Такая граница есть и здесь. Посмотрите снова на **рис. 1.13**. Очевидно, что первые этапы решают менее формализованные задачи, а последующие — все более формальные. Соответственно, методы первых этапов менее формализованы, а последующих — более формальные, мощные. Это означает, что самые трудные и ответственные этапы для моделировщика — первые. Здесь от него требуется больше ин-

туитивных решений. И ошибка на более ранних этапах больше сказывается на дальнейших решениях, возвращаться и переделывать приходится гораздо больше, чем на последних этапах. Поэтому удачные решения на первых этапах вызывают пристальный интерес системотехников, наука моделирования проявляет к ним повышенное внимание. Поскольку формальные методы легко автоматизируются, то последние этапы схемы поддержаны программными продуктами и легко доступны конечным пользователям, но наибольший интерес сегодня представляют программные продукты, поддерживающие первые этапы – системы, помогающие формализовать задачи. А также системы, обеспечивающие сквозное проектирование, доведенное до моделирования и конечной реализации (автоматическое порождение кода по описанию проекта).

[на начало лекции](#)
[на содержание документа](#)