

**А. Н. Герега**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Картина не так проста, как хотелось бы.

Э. Шрёдингер

Различные науки дают многочисленные примеры сложных систем: одни из них оказываются весьма простыми, другие – действительно сложны. И несмотря на то, что существует элемент договорённости в проведении границы между более и менее сложными системами, есть, конечно, объективные различия – и количественные, и качественные.

### **СЛОЖНОСТЬ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ И МЕРА**

Априори понятна тонкость и многогранность этого понятия. Возможность отыскания для него определения и меры (а может быть, и набор мер) базируется на понимании, что «объективная простота-сложность системы существует вне сознания человека», что «субъективно лишь восприятие сложности, зависящее от конкретных условий познания» [1].

В науках о сложном есть разные определения – от безыскусно-незамысловатых, интуитивных-понятных [2] до математически выверенных, требующих интеллектуальных затрат для освоения [3, 4]. Наличие спектра определений имеет объективную и субъективную составляющую: их выбор диктуют, по крайней мере, специфика дисциплины, цели и методы исследования.

Когда в работе обходятся простым, подчеркнута нестрогим определением, по сути, апеллируя к собственной интуиции, это иногда кажется естественным [5, 6], иногда явно недостаточным [2]. Например, авторы [2] считают, что «относительно свойств системы, наличие которых позволяет отнести её к разряду «сложных», целесообразно сказать следующее: она состоит из большого числа взаимосвязанных и взаимодействующих элементов; естественно ожидать, что сложная система способна выполнять сложную функцию». А в [3] полагают, что только «при наивном подходе их можно описать как системы, состоящие из большого числа частей ... как одного, так и различного рода», что «системы могут быть сложными не только потому, что они состоят из большого числа частей: можно говорить и о сложном поведении» [3]. Такое замечание позволяет думать, что

одним из первых вопросов, который должен выяснить исследователь – какого рода сложность присуща системе, потому что почти все реальные задачи содержат много взаимодействующих элементов, параметров, ограничений и т.п., и слишком сложны, чтобы их *полностью* понять и описать [7].

Релятивистское, интуитивно-понятное определение сложности системы предлагает автор [8]: тем сложнее, чем больше переменных требуется для описания её состояния.

На пути к количественному определению есть и такое деление систем [9]: «малые, или простые, – это системы с детерминированным взаимодействием элементов, число которых относительно невелико, примерно,  $10^1-10^4$ , и позволяет проследить их поведение во всех деталях. Большие, или сложные, системы характеризуются гораздо большим числом элементов, порядка  $10^4-10^6$  и выше, и гораздо более сложным, стохастическим поведением элементов. Активность системы здесь подвержена случайным колебаниям, и потому большая система невозможна без известного саморегулирования. Можно ожидать, что... последует стадия превращающихся, или ультрасложных, систем с числом элементов  $10^7-10^{10}$  и с такой сложной организацией связей между элементами, что система становится способной к росту, развитию, превращению» [9].

Не следует слишком буквально относиться к количественным оценкам – это именно оценки, а также к подобному сравнению стохастического и детерминированного [4, 10-12]. Современная наука понимает, что стохастическое может быть более упорядоченным, чем детерминированное [13-14]. Речь идёт о, так называемой, S-теореме Ю.Л. Климонтовича, которая вводит один из возможных критериев относительной степени упорядоченности систем, позволяющий, в частности, различать процессы деградации и самоорганизации.

В заключение параграфа – академическое определение: сложная система – это составной объект, части которого можно рассматривать как отдельные системы, объединённые в единое целое в соответствии с определёнными принципами или связанные между собой заданными отношениями. Части сложных систем (подсистемы) можно расчленить, часто лишь условно, на более мелкие подсистемы и т.д., вплоть до выделения элементов сложных систем, которые либо объективно не подлежат дальнейшему расчленению, либо относительно их неделимости имеется договорённость [15].

### **ИЗМЕРЕНИЕ СЛОЖНОСТИ**

Количественная оценка сложности получила своё наибольшее развитие в работах А. Н. Колмогорова, Г. Чейтина, Р. Соломонова [16-

19], которые независимо друг от друга ввели представление о сложности  $n$ -значной последовательности  $K^{(n)}$  – величине, равной длине (в битах) самой короткой компьютерной программы, способной воспроизвести данную последовательность. В [20] для расчёта сложности предложен предел

$$K = \lim_{n \rightarrow \infty} [K^{(n)}/n],$$

который позволяет исключить возможные колебания  $K^{(n)}$ .

Последовательности имеют прямое отношение к сложным системам: с их помощью можно характеризовать и эволюцию состояний системы, и степень упорядоченности, и характеристики элементов и многое другое. Это возможно благодаря комбинаторной трактовке энтропии и информации в предлагаемой мере: энтропийная сложность связана с вероятностной интерпретацией реализации конкретных состояний системы, зависящих от разнообразия комбинаций её элементов. Это представление восходит к предложенной Л. Больцманом функциональной зависимости между энтропией и количеством динамических состояний, осуществляющих реализованное термодинамическое состояние [21].

Представляет интерес и, т.н., кардинальная сложность, которая рассматривается как мера разнообразия элементов множества. Она приравнивается мощности – кардинальному числу множества; для конечных множеств – это просто число элементов.

### **ВОЗМОЖНЫЕ ПОДХОДЫ**

Системное исследование предполагает решение двух взаимосвязанных задач: во-первых, изучение системных объектов как формы существования и движения реального мира, как проявление его упорядоченности; во-вторых, конструирование системы категорий, отражающей системные связи изучаемых объектов и делающей упорядоченным само познание [22].

Один из эффективных способов изучения систем – использование информационного подхода: построение информационной абстракции сложной системы – кибернетической модели.

Понятию «сложность» в кибернетике придают принципиально качественный смысл: сложной называют систему, не имеющую простых описаний. «Это предполагает наряду с большим количеством используемых элементов и параметров, большое их разнообразие (не сводящееся к простым закономерностям), а также большое разнообразие и нерегулярность связей между элементами» [23].

Используя информационный подход и выявляя аспекты, общие в системах разной природы, кибернетика предлагает и метод их

изучения – компьютерный эксперимент. Спектр проблем, доступных исследованию кибернетическими методами по сравнению с аналитическими математическими, значительно шире, и охватывает практически все области знаний. «Благодаря этому, кибернетику, подобно математике, можно использовать в качестве аппарата исследования в других науках» [23].

Для изучения деталей поведения сложной системы часто используют не одну модель, а совокупность почти независимых моделей, которые создаются и изучаются отдельно, но при этом остаются взаимосвязанными и взаимодополняющими. Создание группы моделей и организация «взаимодействия» между ними, взаимодействия информационного, происходящего в информационном пространстве исследователя – первый шаг в преодолении сложности. Вторым, на другом уровне исследования, является выделение в каждой модели абстракций, организация их иерархии, упорядочение и структурирование. Такой способ управления сложными системами известен с древности: *divide et impera* – разделяй и властвуй.

Наши современники называют такую технологию работы со сложными структурами декомпозицией [24]. Цель, которую они преследуют, – сложность модели должна быть организована, *систематизирована*.

При анализе сложной системы основное внимание обращают либо на объекты, составляющие систему, либо на происходящие процессы. Разделение по алгоритмам концентрирует внимание на порядке происходящих событий, а предметная декомпозиция придает особое значение агентам, которые являются объектами или субъектами действия.

Такой подход также не нов: дуальность взглядов история науки прослеживает со времён Древней Греции [25-27]. Пассивный взгляд, в современной терминологии – объектный подход, предлагал Демокрит, утверждавший, что мир состоит из атомов; эта позиция философа ставила в центр всего материю, объект. А Гераклит выделял понятие процесса и был, по сути, предтечей алгоритмического подхода.

Количественную оценку функциональных и структурных характеристик дополняют исследования, проводимые методами качественной теории сложных систем. К ним в первую очередь относятся исследование устойчивости, в том числе построение областей стабильности характеристик в пространстве параметров, выделение типичных режимов функционирования и оценка их достижимости, анализ асимптотического поведения, управляемости и наблюдаемости таких систем и другие [23].

Несколько аспектов делают качественные (нерасчётные) модели незаменимыми. Во-первых, удачный подход к изучению проблемы, верное выделение системы, формулировка базовых положений и т. п. является существенной, иногда определяющей частью исследования («нет ничего практичней хорошей теории» [28]). Во-вторых, качественная теория несёт мировоззренческий аспект, что бывает не только интересно, но и полезно.

Наконец, третье, если теория не позволяет рассчитать эффект, то она, возможно, позволит предсказать его, указать условия, при которых его можно наблюдать, а также сопутствующие явления, необходимые и достаточные условия и др. Кроме того, по отношению к сложным явлениям даже «объяснение в принципе» при помощи качественных моделей предпочтительнее его отсутствия [29].

### **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для моделирования сложных систем необходимо формализовать процессы их функционирования, представить в виде последовательности чётко определяемых событий, явлений или процедур, и затем построить математическое описание.

Элементы сложных систем обычно описывают как динамические (в широком смысле), к которым, кроме классических относят также и другие детерминистические и стохастические объекты – такие как конечные и вероятностные автоматы, системы массового обслуживания, кусочно-линейные агрегаты и т. п.

При формализации сопряжения элементов сложных систем обычно вход (выход) элемента представляют в виде совокупности «элементарных» входов (выходов) по числу характеристик, описывающих соответствующие сигналы. Предполагается, что характеристики сигналов передаются в сложных системах по «элементарным каналам», связывающим входы и выходы соответствующих элементов, независимо. Сопряжение элементов сложных систем задаётся соотношением, по которому данному входу  $i$ -го элемента ставится в соответствие тот выход  $j$ -го элемента, который связан с ним [30]. Причём, такие искусственные системы «часто являются копиями естественных, или, по крайней мере, создаются для выполнения подобных функций» [31].

Наличие имитационной модели позволяет применять специальные методы идентификации сложных систем и обработки экспериментальных данных, полученных в результате натурных испытаний систем. Испытываемый объект рассматривается как сложная система с неизвестными параметрами сопряжений и элементов. Эти параметры оценивают посредством сравнения

значений функциональных и структурных характеристик сложных систем, полученных экспериментально и в результате моделирования. Это ставит искусственные системы в положение моделей естественных, что принципиально возможно благодаря наличию общих свойств, и даёт возможность определять поправки к первоначальным значениям параметров, добиваясь достаточной точности оценки неизвестных величин методом последовательных приближений [2].

Кроме объективной «борьбы» со сложностью, существует и субъективная, связанная с преодолением ограниченности когнитивных способностей человека. С помощью апробированных методов исследователь может раздвинуть их рамки. Для этого используют декомпозицию системы, выделение абстракций, построение иерархических систем из немногих типов подсистем, по-разному скомбинированных и организованных, и другие приёмы. В этом случае мы, с одной стороны, не превысим возможности человеческого мозга потому, что для понимания любой части системы необходимо будет одновременно удерживать в памяти информацию лишь о сравнительно немногих объектах, с другой, – получим возможность использовать принцип экономии мышления: будем «собирать» систему, как в детском конструкторе, из простых, хорошо знакомых частей, роль которых играют устойчивые промежуточные формы.

В классической работе [32] Дж. Миллер определил максимальное количество структурных единиц информации, которые могут находиться в кратковременной памяти – семь плюс-минус две. Человек способен варьировать это число, доводя фактический объём оперативной памяти до значительных величин за счёт укрупнения отдельных единиц информации. Такое перекодирование есть «подлинный источник жизненной силы мыслительного процесса» [33]. Оно объясняет, как может большое количество информации, содержащееся даже в сравнительно простых системах, обрабатываться в кратковременной памяти человека, которая, будь она действительно ограничена семью элементами, стала бы «узким местом» работы с информацией.

В [34] высказана мысль, что «машина определяет то, что может и что не может человек». Это и верно, и неверно одновременно: в конце цепочки всегда стоит человек, именно он и определяет, что возможно в области познания.

### **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Основной метод исследования сложных систем – математическое моделирование, основной инструментарий – имитация

на компьютере процессов их функционирования, т.е. машинный эксперимент [15].

Идея имитационного моделирования интуитивно привлекательна благодаря своей простоте. Им удобно воспользоваться, когда невозможна законченная математическая постановка задачи, либо не разработаны аналитические методы для решения сформулированной математической модели или они сложны и трудоёмки. Имитационный подход может оказаться единственным в условиях трудности или невозможности постановки реального эксперимента, проведения натуральных наблюдений. Кроме того, он даёт возможность полностью контролировать время, в течение которого осуществляется процесс, замедлять или ускорять его протекание, что бывает очень и важно, и удобно [35].

Имитации в качестве моделирующего процесса является полезным методом решения сложных задач. Имитационные модели можно представить в виде спектра возможных вариантов – от макетов реальных объектов до совершенно абстрактных математических моделей [35]. Все они принадлежат к системам, функционирующим по типу «серого ящика»: обеспечивают выходной сигнал в функционирующей системе, при этом нам в какой-то мере понятно, как он формируется [7].

Моделирование всегда применяется вместе с другими общенаучными и специальными методами; особенно тесно оно связано с экспериментом. В мо-

дельном эксперименте, в отличие от обычного, в процесс познания включается промежуточное звено – модель, являющаяся одновременно и средством, и объектом экспериментального исследования, заменяющим оригинал [36]. В модельно-кибернетическом эксперименте вместо оперирования с изучаемым объектом находят алгоритм его функционирования, который и выступает в качестве модели.

---

*\*Проектирование модели по принципу «стеклянного ящика» является, как правило, более сложной задачей, чем построение «серого». Она реализуется тремя группами специалистов: психологами и специалистами в области инженерии знаний и предметной области. Главная идея такой модели – представление знаний в виде, в котором их хранит и использует эксперт. Модель, построенная по принципу «стеклянного ящика» предпочтительней, но в связи с большой трудоемкостью разработки используется редко.*

Имитационные модели неспособны формировать решения в таком же виде, как аналитические: для получения с её помощью необходимой информации осуществляют «прогоны» [35]. Они нужны для анализа поведения системы в условиях, которые определяются экспериментатором, и, кстати, являются ярким примером, что выбор типа модели и её конкретной реализации оказывает определяющее влияние на подход к решению проблемы и на то, как будет выглядеть это решение [24, 37].

Это позволяет говорить о том, что имитационное моделирование – не столько теория явления или процесса, сколько методология решения проблем по его изучению, а сама имитационная модель – логико-математическое представление системы [38]. Такое моделирование позволяет установить тенденции развития явлений, указать пути для поиска корректных решений уже вне, в продолжение модели.

Ещё одним существенным фактором является невозможность исследования в натуральных экспериментах альтернативных вариантов, сложность поддержания неизменных рабочих условий в течение всего времени проведения экспериментов. Эрнст Мах рекомендовал [39]: «Составив определённое заключение на основании одного конкретного случая, надлежит постепенно и как можно шире модифицировать сопутствующие ему обстоятельства, стремясь, насколько это возможно, остаться при первоначальном заключении. Не существует иного способа, который с большой надёжностью и меньшими умственными усилиями приводил бы к простейшему объяснению всех явлений природы».

Можно выделить ключевые этапы имитационного моделирования. Во-первых, это выделение системы, во-вторых, формулировка модели – переход от реальной системы к некоторой логической схеме. Третий этап – отбор данных, необходимых для построения модели. Затем разработка алгоритмов имитации процессов и расчёта параметров, создание компьютерной программы, сам эксперимент, оценка адекватности, интерпретация результатов и прогноз [35, 40].

При создании имитационной модели важно определить уровень точности описания реального процесса, т. е. выбрать уровень детализации описания системы, который, в свою очередь, зависит от цели, поставленной исследователем [41], и может привести к построению иерархии моделей объекта, расширению и обогащению знаний о нём [42], а также определить степень достоверности полученной информации.

## АДЕКВАТНОСТЬ МОДЕЛИ

Вопрос адекватности важен для любого типа моделей, но в случае имитационных – ответ на него наиболее интересен. Согласно [38] ответ может быть таким: адекватная модель математически и логически отражает с определённой степенью приближения моделируемую систему, процесс, принцип или явление; существует соответствие между логические элементы модели и реальной системы; вероятностные характеристики модели отражают характер реальных случайных событий; модель измеряет то, что подлежит измерению, и выходные данные – информативны. Причём, оценивать следует адекватность и концептуальной модели, и её реализации.

Часто наблюдение за поведением системы и сравнение его с ожидаемым позволяет обнаружить ошибки в модели. Это одна из причин, по которой в последнее время много внимания уделяют вопросам визуализации трудно воспринимаемых абстрактных понятий [43].

Иногда при создании модели сразу вводится идеализированное описание взаимодействия, функций, параметров и др., при этом основным критерием приемлемости модели будет (когда это возможно) проверка опытом, а в некоторых случаях – математическая оценка погрешностей, заложенных в модель при разработке упрощающих предположений [44].

Но прежде чем подвергать проверке правильность модели, ещё до сравнения с экспериментальными данными, можно убедиться в её неприемлемости по анализу простых предельных случаев [45]. Такая проверка является необходимым, но недостаточным условием.

Имитационная модель не отражает реальное положение вещей: если не принимать это во внимание, имитация явлений может привести к неверному решению. Имитационная модель в принципе неточна, степень её точности измерить невозможно, а можно лишь говорить о степени её чувствительности к изменению параметров. На чём, в таком случае, базируется чувство успешности продвижения к цели?

Умственные усилия обладают эвристическим действием: они стремятся во имя достижения результата ассимилировать и использовать любой подходящий предмет [46]. Когда усилия подчинены достижению цели, даже обычный путь проб и ошибок может приводить к нужной коррекции дальнейших шагов, иногда лишь частично осознаваемой.

Трудно определить причину успеха как некую вещь. Этим объясняется широкое распространение искусств, умений, ремёсел,

возникших как практические навыки или случайные удачи, и до сих пор составляющих важнейшую часть технологий, которые редко удаётся специфицировать полностью [46]. Интересна в качестве примера может быть технология изготовления дамасской стали: оказывается, это был ритуал, по которому каждый город халифата присылал в столицу стальные полосы, где, сплетая их в жгут, получали кузнечной сваркой сталь.

Неспецифицируемость процесса, благодаря которому мы *чувствуем* успешность продвижения к цели, объясняется не только запасом сведений, но и знанием обычаев и законов, квалификацией и мастерством, волнением сопереживания созиданию, умениями и привычками, которыми пользуемся, которым следуем, которыми обладаем, которым наслаждаемся, не будучи детально осведомлены об их содержании. Такая уверенность – результат личностного знания, проявляющегося в логической недетализуемости действия [46].

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Системный подход обладает чрезвычайно эффективной технологией преодоления сложности, которая является атрибутом объекта исследования – системы названы по этому свойству – и, следовательно, освободиться от которой нельзя: избавившись (если удастся) от сложности, мы выхолостим ситуацию, «выплеснем вместе с водой ребёнка», обострим проблему подмены объекта исследования.

Исходя из того, что «главной целью обычно является понимание, а не число» [47], что «внешний мир настолько сложен, что учёный-естествоиспытатель бывает доволен, если ему удастся уловить и понять хотя бы некоторые, самые простые из присущих миру закономерностей [22], можно абстрагироваться от излишней сложности, игнорировать несущественные детали и, таким образом, иметь дело с обобщенной, идеализированной моделью объекта [33]. При этом, правда, возникает непростой вопрос, что является существенным.

Для модели реального процесса или явления сложность – неслучайное, обусловленное многими факторами свойство: это сложность предметной области, неудовлетворительность способов описания, необходимость обеспечить достаточную гибкость модели, множество различных, порой взаимоисключающих требований к ней, проблемы адекватности, отсутствие ясного представления у исследователей о явлении, эволюция понимания явления и модели в процессе работы, и другие [48]. И это значит, что сколь-нибудь адекватное отображение реальных задач даже в упрощённых моделях будет сложным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мамчур Е.А., Овчинников Н.Ф., Уёмов А.И. Принцип простоты и меры сложности. – М.: Наука, 1989. – 304 с.
2. Бусленко Н. П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. – М.: Советское радио, 1973. – 440 с.
3. Хакен Г. Информация и самоорганизация. – М.: Мир, 1991. – 240 с.
4. Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика. – Череповец: Меркурий-пресс, 2000. – 528 с.
5. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
6. Оран Б., Бóрис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990. – 660 с.
7. Величковский Б.М. Современная когнитивная психология. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 336 с.
8. Рапопорт А. Математические аспекты абстрактного анализа систем. / В кн. Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969.
9. Поваров Г.Н. Сложность систем как показатель научно-технического прогресса. / Проблемы исследования систем и структур. – М.: Наука, 1965.
10. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. – М.: Мир, 1991. – 368 с.
11. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. – М.: Мир, 1988. – 240 с.
12. Николис Дж. Динамика иерархических систем. – М.: Мир, 1989. – 488 с.
13. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. Новый подход к статистической теории открытых систем. – М.: Наука, 1990. – 320 с.
14. Климонтович Ю.Л. Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем. //УФН. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1231- 1243.
15. Советский энциклопедический словарь – М.: Советская энциклопедия, 1982. – 1600 с.
16. Колмогоров А.Н., Успенский В.А. К определению алгоритма. //Успехи математических наук. – 1958. – т.13, вып.4. – С. 3-28.
17. Chaitin G. J. Randomness and mathematical proof. //Scientific American. – 1975. – No.232. – p. 47-52.
18. Solomonoff R. J. A formal theory of inductive inference. Part I. //Information and Control. – 1964. – Vol. 7, No.1. – p.1- 22.
19. Solomonoff, R. J. A formal theory of inductive inference. Part II. //Information and Control. – 1964. – Vol. 7, No.2. – p. 224- 254.
20. Martin-Löf P. The definition of random sequences. //Information and Control. – 1966. – Vol. 9, No.6. – p. 602 – 619.
21. Больцман Л. О связи между вторым началом механической теории теплоты и теорией вероятностей в теоремах о тепловом равновесии. /В кн. Больцман Л. Избранные труды. – М.: Наука, 1984. – 590 с.
22. Каган М.С. О системном подходе к системному подходу. /В кн. Избранные труды. Т. 1. – СПб.: Петрополис, 2006. – 200 с.
23. Математический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – 847 с.

24. Буч Г., Рамбо Дж., Джекобсон А. Унифицированный язык моделирования. – М.: ДМК, 2001. – 432 с.
25. Ленин В.И. Философские тетради. – М.: Изд-во политической литературы, 1973. – 752 с.
26. Рассел Б. Человеческое познание. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1957. – 556 с.
27. Рассел Б. История западной философии. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета, 1997. – 816 с.
28. Кирхгоф Г. Собрание сочинений, т.2. – М.-Л: Гостехиздат, 1941.
29. Берталанфи, Л. фон. Общая теория систем: критический обзор. /В кн. Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23-82.
30. Форрестер Д. Основы кибернетики предприятия. Индустриальная динамика. – М.: Прогресс, 1971. – 340 с.
31. Холл А.Д., Фейджин Р.Е. Определение понятия системы. /В кн. Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969. – С. 252-282.
32. Miller G.A. The magical number seven, plus or minus two. // Psychological Review. – 1956. – № 63. – p. 81-97.
33. Солсо Р. Когнитивная психология. – СПб.: Питер, 2002. – 592 с.
34. Марков Б.В. Человек в эпоху масс-медиа. / В кн. Информационное общество. – М.: АСТ, 2004. – 510 с.
35. Шеннон Р. Имитационное моделирование – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
36. Философский энциклопедический словарь – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 816 с.
37. Рамбо Дж., Якобсон А., Буч Г. UML: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 656 с.
38. Мартин Ф. Моделирование на вычислительных машинах. – М.: Советское радио, 1972. – 288 с.
39. Мах Э. Механика. Историко-критический очерк её развития – Ижевск: РХД, 2000. – 456 с.
40. Попов Ю.П., Самарский А.А. Вычислительный эксперимент. / В кн. Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. – М.:Наука, 1988 – 176 с.
41. Томашевский В.М. Моделирование систем. – К.: ВНУ, 2005. – 352 с.
42. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 496 с.
43. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем. – СПб: БХВ-Петербург, 2002.–464 с.
44. Седов Л. И. Об основных моделях в механике. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – 151 с.
45. Вейль Г. Математическое мышление. – М.: Наука, 1989. – 400 с.
46. Полани М. Личностное знание. – М.: Прогресс, 1985. – 346 с.
47. Тобочник Я., Гулд Х. Компьютерное моделирование в физике (в 2 томах). – Т. 1. – М.: Мир, 1990. – 352 с.; т.2. – М.: Мир, 1990. – 400 с.
48. Кац М., Улам С. Математика и логика. – М.: Мир, 1971. – 252 с.